

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

جامعة 20 أوت 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 : Biochimie appliquée

Intitulé :

Étude de l'impact de la microencapsulation par des  
cellules de levure sur les composés phénoliques et  
l'activité antioxydante de fraise *Fragaria x ananassa* D.

Présenté Par : Dames Amani, Dardar Khawla,  
Dechir Meriem & Haddad Asma.

**Membre de Jury:**

Dr. Fekreche F. MCA	Président	Univ. du 20 Août 1955 – Skikda
Dr. Laib I. MCA	Promoteur	Univ. du 20 Août 1955 – Skikda
Dr. Becheker I. MCA	Examineur	Univ. du 20 Août 1955 – Skikda

Année universitaire : 2022/2023

## **Remerciement**

Avant tout, nous remercions **Allah** tout puissant qu'il nous a guidé tout au long de notre vie, qu'il nous a donné le courage et la patience pour passer tous les moments difficiles et qu'il nous a permis d'achever ce travail et de pouvoir le mettre entre vos mains aujourd'hui.

Nous remercions particulièrement notre encadreur **Dr. LAIB I.** pour ces Précieuses orientations, ses encouragements constants, son souci de s'assurer que ce travail est au niveau requis, sa façon de traiter avec nous aussi que ses bons caractères. Nous le remercions également vu qu'elle a simplifié l'information et la rend accessible à assimiler avec sa grande patience tout au long de notre préparation et jusqu'à la dernière étape.

Et nous avons que l'honneur que **Dr. FEKRECHE F.** et **Dr. BECHEKER I.** soient les membres de jury de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



## Dédicace

A dieu qui ma donné la santé, la volonté, la patience pour réalise  
ce travail.

Aucune phrase ne saurait exprimer toute l'affection et l'amour que j'ai pour vous. Mes tres  
chers parents «**Salah**» et «**Fouzia**» qui ont la patience de nous élever et nous enseigner que  
dieu vous donne longue vie couronné de santé.

Je vous aime tous les deux.

A mon cher époux **Taki eddine** qui a toujours été a mes cotés pour me soutenir et  
m'encourager qui dieu le garde pour moi

A mes précieux freres: **Fares** et **Zakaria** symbole de tendresse.

A mes précieux soeurs : Douâ et Rimas nour el yakin mes soutien dans la vie et ma petit  
belle Miral

A ma belle mère «**Zohra**» et mon beau père «**Salah**» et tous sa famille

A tout mes amies proches surtout: **Lamis** et **Marwa**

A mes chers grands parents «**Youcef**» «**Khroufa**» et «**Fatima**». Que dieu prolonge  
votre vie.

Je n'oublier pas ma perte mon cher grand pere «**Ali**». Que dieu t'accorde le paradis. Je  
t'iame

Je remercie ma grande famille «**Dames**» et «**Daas amiour**»

« Que Dieu m'accorde le succès dans mon travail et me rende comme une  
goutte de pluie, partout où je vais, la bonté grandit. »

**Amani**



## Dédicace

À Dieu qui m'a donné la santé, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

À celle qui s'est sacrifiée pour moi et n'a jamais ménagé ses efforts pour me rendre heureux, ma chère mère « **Rahima** ».

À mon cher père « **Riad** », au visage bienveillant et aux bonnes actions, qui ne m'a jamais refusé son aide tout au long de sa vie.

À mes frères « **Mohammed Amin** » et « **Iyad Islam** », ainsi qu'à ma sœur « **Hadjer** ».

À mes chers amis, vous êtes mes compagnons dans ce merveilleux voyage d'ambition et de défis. Je vous remercie pour les beaux moments et le soutien constant que vous m'avez apportés. Mon mémoire porte vos empreintes et nos souvenirs communs, et je vous en serai éternellement reconnaissant « **Asma, Imen, Meriem, Amani, Yasmin** ».

J'adresse mes plus sincères félicitations et remerciements à ma merveilleuse famille qui a été à mes côtés tout au long de ce voyage, la famille « **Bouglouf** » et « **Dardar** ».

À mes grands-mères « **Mebarka** » et « **Zakia** »

À ma tante « **Zahra** ». Et à ma personne préférée qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, qu'Allah le protège pour moi.

Je tiens particulièrement à remercier mon amie « **Hiba** » pour son aide et son soutien tout au long de cette période de la mémoire.

Louange à Allah, pour mener à bien cette recherche scientifique.

**Khawla**



## Dédicace

À Dieu qui m'a donné la santé, la volonté et la patience pour réaliser ce travail. Aucune phrase ne saurait exprimer toute l'affection et l'amour que j'ai pour vous, mes très chers parents « **Salah** » et « **Louiza** », qui avez la patience de nous élever et de nous enseigner. Que Dieu vous donne une longue vie couronnée de santé. Je vous aime tous les deux.

À mes précieux frères « **Mohamed Lamine** » et « **Rabah** », symboles de tendresse. Que Dieu vous protège.

À mes précieuses sœurs « **Aida** », « **Kenza** », « **Maissa** » et Mes belles-sœurs « **Fatima** » et « **Nada** » mes soutien dans la vie, et toutes ces enfants la source de mon honneur.

À mon fiancé « **Nour el Islam** », qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que Dieu le garde pour moi.

À ma belle-mère « **Nadia** » et mon beau-père « **Farhat** », que Dieu vous accorde une longue vie et à toute votre famille.

À toutes mes chères amies, chacune avec son nom.

À mes chères collègues : « **Amani** », « **Asma** » et « **khawla** »

À mes chers grands-pères « **Boukhmis** » et « **Mahmouda** », que Dieu vous accorde le paradis.

À mes chères grandes-mères « **Saad** » et « **Wannassa** », que Dieu vous protège.

Je remercie ma grande famille « **Dechir** » et « **Ghoudbane** ».

Que Dieu m'accorde le succès dans mon travail et fasse en sorte que, tel une goutte de pluie, partout où je vais, la bonté grandisse.

**Meriem**



## Dédicace

À Dieu qui m'a donné la santé, la volonté et la patience pour réaliser ce travail.

Et tous ceux qui m'ont soutenu et encouragé dans les moments  
difficiles.

En raison de la luminosité qu'ils apportent à ma vie, je ressens une profonde gratitude envers mes chers parents « **Newara** » et « **Rabah** » pour leur soutien constant, leur aide inestimable et les sacrifices qu'ils ont consentis pour moi. Leur confiance inébranlable en mes capacités est une véritable source d'inspiration pour moi. Je les aime tous les deux du plus profond de mon cœur.

À mes chers frères, que Dieu les préserve, et en particulier à mon bras droite  
« **Samir** ».

À mes précieuses sœurs « **Noura** », « **Rachida** », « **Saida** », « **Zahra** », « **Warda** » et ma petite sœur « **Ines** » Pour leur soutien constant envers moi, et la femme de mon frère « **Nihed** ». Votre présence et votre soutien sont inestimables pour moi.

A tous mes amies proches surtout « **Imen** » et « **Rayen** »

À mes chères collègues « **khawla** », « **Meriem** » et « **Amani** ».

Je tiens également à remercier tout particulièrement mon amie « **Hiba** ».

Pour son aide.

Je remercie ma grande famille « **Haddad** » et « **Safi** ».

Que Dieu m'accorde le succès dans mon travail et fasse en sorte que, tel une goutte de pluie, partout où je vais, la bonté grandisse.

**Asma**

# SOMMAIRE

Résumé	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale.....	1

## Chapitre I : Présentation de la plante *Fragaria x ananassa* D.

1. Généralités.....	3
2. Description et classification botanique.....	3
2.1.Description botanique.....	3
2.2.Classification botanique.....	4
3. Les variétés.....	4
4. Production mondiale et Algérienne.....	5
4.1.Mondiale.....	5
4.2.Algérienne.....	5
5. Composition physico-chimiques.....	6
6. Composés phénoliques de la fraise.....	7
7. Utilisations.....	10
7.1.Application alimentaire et traditionnelle.....	10
7.2.Application médicale.....	10
7.3.Application cosmétiques.....	11
8. Activités pharmacologique.....	11
8.1.Activités antioxydantes.....	11
8.2.Activités anti-inflammatoires.....	11
8.3.Activités cardioprotectrices.....	12
8.4.Syndrome anti métabolique.....	12
8.5.Activités anti-obésité.....	13
8.6.Activités antidiabétiques.....	13
8.7.Activités anticancéreuses.....	13
8.8.Activités neuroprotectrices.....	13
8.9.Activités antimicrobiennes.....	14

## Chapitre II : Polyphénols

1. Définition.....	15
2. La structure chimique des polyphénols.....	15
3. Classification.....	15
4. Localisation des polyphénols.....	16
5. La biosynthèse et le métabolisme des polyphénols.....	17
6. Rôle biologique des polyphénols.....	17
7. L'utilisation chimique des polyphénols.....	18
8. Activité antioxydante.....	18
9. Les effets potentiels sur la santé.....	19
10. Facteurs de variabilité de polyphénols.....	20
10.1.Facteurs externe.....	20
10.1.1. Lumière.....	20
10.1.2. Température.....	20

## Chapitre III : L'encapsulation

1. Définition de l'encapsulation.....	21
2. L'objectif de l'encapsulation.....	21
3. Les types de l'encapsulation.....	22
3.1.Nano encapsulation.....	22
3.2.Micro encapsulation.....	23
3.3.Macro encapsulation.....	23
4. Procédés d'encapsulation.....	24
5. Technique de l'encapsulation.....	24
5.1.La pulvérisation/séchage par atomisation.....	25
5.2.Le spray chilling ou spray-cooling.....	26
5.3.L'encapsulation par extrusion.....	26
5.4.Le revêtement en lit fluidisé.....	27
5.5.L'inclusion complexe.....	27
5.6.La coacervation.....	27
6. L'encapsulation dans des cellules de levures.....	28
6.1.Levure.....	28
6.1.1. Morphologie.....	28

6.1.2. Classification.....	28
6.1.3. Métabolisme.....	29
6.2.Prétraitements avant l'encapsulation de la levure.....	29
6.2.1. Autolyse.....	29
6.2.2. Plasmolysis.....	29

#### **Chapitre IV : Matériel et méthode**

1. Matériau végétal.....	32
2. Extraction des composés phénoliques.....	32
3. Encapsulation des composés phénoliques dans les souches de levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	33
3.1.Culture de la souche de levure <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....	33
3.2.Plasmolyse des souches de levures.....	33
3.3.Microencapsulation des composés phénoliques.....	33
3.4.Efficacité d'encapsulation.....	34
4. Dosage des polyphénols totaux.....	34
5. Dosage des flavonoïdes.....	35
6. Dosage des tanins.....	35
7. Analyse par Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) en Réflexion Totale Atténuée (ATR) des Extraits de <i>Fragaria x ananassa</i> Avant et Après encapsulation.....	35
8. Méthode DPPH.....	36
9. Méthode ABTS.....	36
10. Analyse statistique.....	37

#### **Chapitre V : Résultats et discussion**

1. Teneurs en composés phénolique de la fraise.....	38
1.1.Les courbes d'étalonnage.....	38
1.2.Effet de l'encapsulation sur la teneur en composés phénoliques.....	39
2. Les résultats obtenus par le spectro ftir.....	44
3. Effet de l'encapsulation sur l'activité antioxydante des extraits de fraise.....	46
Conclusion Générale.....	49
Références bibliographiques.....	50

## Résumé

Cette étude visait à examiner les effets de l'encapsulation sur la quantité de composés phénoliques (polyphénols, flavonoïdes et tanins) et sur l'activité antioxydante du fruit *Fragaria x ananasa Duch.* L'encapsulation a été réalisée en utilisant de la levure (*Saccharomyces cerevisiae*) pour encapsuler les composés phénoliques. L'impact de l'encapsulation sur la teneur en composés phénoliques et sur l'activité antioxydante du fruit a été évalué. Les résultats ont indiqué que la quantité de polyphénols totaux, de flavonoïdes et de tanins est significativement réduite par l'encapsulation. Une quantité plus élevée de polyphénols totaux est conservée par les cellules plasmolysées par rapport aux cellules intactes, mais les cellules intactes présentent une meilleure rétention des flavonoïdes et des tanins. Globalement, une diminution de la quantité totale de polyphénols est observée suite à l'encapsulation. De plus, l'activité antioxydante des extraits est également affectée par l'encapsulation. L'activité antioxydante des microcapsulés diminue lors de l'utilisation de la méthode DPPH, tandis que l'activité antioxydante des microcapsules est augmentée par l'encapsulation selon la méthode ABTS.

**Mots clés :** *Fragaria x ananasa Duch.*, *Saccharomyces cerevisiae*, polyphénols, encapsulation, activité antioxydante.

## **Abstract**

This study aimed to examine the effects of encapsulation on the quantity of phenolic compounds (polyphenols, flavonoids, and tannins) and the antioxidant activity of *Fragaria x ananasa* Duch. fruit. Encapsulation was performed using yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) to encapsulate the phenolic compounds. The impact of encapsulation on the content of phenolic compounds and the antioxidant activity of the fruit was evaluated. The results indicated that the quantity of total polyphenols, flavonoids, and tannins is significantly reduced by encapsulation. A higher amount of total polyphenols is retained by plasmolyzed cells compared to intact cells, but intact cells show better retention of flavonoids and tannins. Overall, a decrease in the total amount of polyphenols is observed following encapsulation. Additionally, the antioxidant activity of the extracts is also affected by encapsulation. The antioxidant activity of the microencapsulated samples decreases when using the DPPH method, while the antioxidant activity of the microcapsules is increased by encapsulation according to the ABTS method.

**Keywords:** *Fragaria x ananasa* Duch., *Saccharomyces cerevisiae*, polyphenols, encapsulation, antioxidant activity.

## الملخص

هدفت هذه الدراسة إلى فحص تأثير التغليف على كمية المركبات الفينولية (البوليفينولات والفلافونويدات والتانينات) ونشاط مضادات الأكسدة لثمرة *Fragaria x ananasa Duch.* تم تنفيذ عملية التغليف باستخدام الخميرة (*Saccharomyces cerevisiae*) لتغليف المركبات الفينولية. تم تقييم تأثير التغليف على محتوى المركبات الفينولية ونشاط مضادات الأكسدة للثمرة. أشارت النتائج إلى أن كمية البوليفينولات الكلية والفلافونويدات والتانينات تقل بشكل ملحوظ بواسطة التغليف. يتم الاحتفاظ بكمية أكبر من البوليفينولات الكلية في الخلايا المتفرقة بالمقارنة مع الخلايا السليمة ، ولكن الخلايا السليمة تظهر احتفاظاً أفضل بالفلافونويدات والتانينات. بشكل عام ، يتم ملاحظة انخفاض في الكمية الإجمالية للبوليفينولات بعد عملية التغليف. بالإضافة إلى ذلك ، يتأثر أيضاً نشاط مضادات الأكسدة للمستخلصات بواسطة التغليف. ينخفض نشاط مضادات الأكسدة للميكروكبسولات عند استخدام طريقة DPPH ، في حين يتم زيادة نشاط مضادات الأكسدة للميكروكبسولات بواسطة التغليف وفقاً لطريقة ABTS.

**الكلمات الرئيسية:** *Fragaria x ananasa Duch.* ، *Saccharomyces cerevisiae* ، البوليفينولات، التغليف، نشاط مضادات الأكسدة.

## Liste des abréviations

<b>%</b>	: Pourcentage
<b>µl</b>	: Microlitre
<b>Abs</b>	: Absorbance
<b>ABTS</b>	: AzinoBis éThylbenzothiazoline Sulfonique
<b>ADN</b>	: Acide DésoxyriboNucléique
<b>AH</b>	: Antioxydant donneur d'Hydrogène
<b>ANOVA</b>	: Analyse de la variance
<b>Ans</b>	: Années
<b>ARN</b>	: Acide Ribonucléique
<b>ATR</b>	: Réflexion Totale Atténuée
<b>BAS</b>	: Bioactivité spécifique
<b>C</b>	: Carbone
<b>C°</b>	: Degré Celsius
<b>CH</b>	: La chitosane
<b>Cm</b>	: Centimètre
<b>CNSL</b>	: Liquide de coque de noix de cajou
<b>CT</b>	: Cholestérol
<b>DO</b>	: Densité Optique
<b>DPPH</b>	: C <sub>18</sub> H <sub>12</sub> N <sub>5</sub> O <sub>6</sub>
<b>DPPH</b>	: Diphénylpicrylhydrazyle
<b>DSA</b>	: Direction des Services Agricoles
<b>EAG</b>	: L'équivalent acide gallique
<b>EAT</b>	: Équivalent d'Acide Tannique
<b>EE</b>	: L'Efficacité d'Encapsulation
<b>EQ</b>	: Équivalent Quercétine
<b>ES</b>	: L'Extrait Sec
<b>g</b>	: Gramme
<b>H</b>	: Hydrogène
<b>h</b>	: Heure
<b>Ha</b>	: Hectares
<b>HDL</b>	: High-Density Lipoprotein
<b>IC</b>	: Concentration Inhibitrice

<b>IRE</b>	: Élément de réflexion interne
<b>K</b>	: Constante de vitesse d'adsorption
<b>K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub></b>	: Persulfate de potassium
<b>Kg</b>	: Kilogrammes
<b>L</b>	: Litre
<b>LAR</b>	: LeucoAnthocyanidine Réductase
<b>LDL</b>	: Low-Density Lipoprotein
<b>m mol</b>	: Milli mole
<b>mg</b>	: Milligramme
<b>Min</b>	: Minute
<b>ml</b>	: Millilitre
<b>Mme</b>	: Madame
<b>N</b>	: Azote
<b>Na cl</b>	: Chlorure de sodium
<b>Na<sub>2</sub>co<sub>3</sub></b>	: Le carbonate de sodium
<b>NDMA</b>	: N-nitrosodiméthylamine
<b>NH</b>	: Groupement amine
<b>nm</b>	: Nanomètre
<b>OH</b>	: Hydroxyde
<b>PAL</b>	: L-phénylalaninr ammonia- lyase
<b>PH</b>	: Potentiel hydrogène
<b>PH<sub>2</sub>O</b>	: L'eau physiologique stérile
<b>POD</b>	: Peroxydase
<b>PPO</b>	: Polyphénol oxydase
<b>SCA</b>	: <i>Saccharomyces cerevisiae</i> pour la fermentation haute
<b>SCB</b>	: <i>Saccharomyces cerevisiae</i> après plasmolyse
<b>SNV</b>	: Science de la Nature et de la Vie
<b>SPA</b>	: <i>Saccharomyces pastorianus</i>
<b>T</b>	: Ton
<b>TAL</b>	: Tyrosine ammonia- lyase
<b>TPE</b>	: La concentration totale de polyphénols, flavonoïdes et tanins encapsulés
<b>Tpp</b>	: tripolyphosphate de pentasodium

- TPT** : La concentration de composés phénoliques (polyphénols, flavonoïdes et tanins) de l'extrait non encapsulé
- Tr/ min** : Tours par minute
- β** : Beta
- μg** : Microgramme
- μm** : Micromètre

## Liste des figures

<b>Figure 1:</b> Répartition de la culture de la fraise en Algérie.....	6
<b>Figure 2:</b> Evolution de la culture de la fraise dans la région de Jijel (2002 à 2017).....	6
<b>Figure 3:</b> Principaux composés polyphénoliques présents dans les fraises : A : Structures chimiques, B : Pourcentages.....	10
<b>Figure 4:</b> Structure chimique des fractions phénoliques : (a) Pyrocatechol (b) Résorcinol (c) Pyrogallol (d) Phloroglucinol.....	15
<b>Figure 5:</b> La classification et les structures chimiques des polyphénols.....	16
<b>Figure 6:</b> Présentation schématique de la procédure de séchage par pulvérisation.....	25
<b>Figure 7:</b> Technologies d'extrusion : générateur de gouttelettes à aiguille simple qui est généralement entraîné par de l'air (a) et dispositif de disque de fixation (b).....	26
<b>Figure 8:</b> Micrographie de <i>S. cerevisiae</i> .....	28
<b>Figure 9:</b> Fruits des fraises <i>Fragaria x ananassa</i> D. (Originale, 2023).....	32
<b>Figure 10:</b> Courbes d'étalonnage : A : Acide gallique, B : Quercétine, C : Acide tannique.....	39
<b>Figure 11:</b> Diagramme de teneur decomposés phénoliques : A : polyphénols totaux ; B : flavonoïdes ; C : tanins.....	40
<b>Figure 12:</b> Diagramme d'efficacité de l'encapsulation encomposés phénoliques : : polyphénols totaux ; B : flavonoïdes ; C : tanins.....	42
<b>Figure 13:</b> Le spectre FT-IR des cellules de levure .....	45

## **Liste des tableaux**

<b>Tableau 1</b> : Production mondiale de fraise en 2015.....	5
<b>Tableau 2</b> : Composition nutritionnelle des fraises fraîchesa (Quantité dans 100 g de fraises)...	7
<b>Tableau 3</b> : les Concentrations des principaux composés phénoliques dans fraises.....	8
<b>Tableau 4</b> : IC50des extraits encapsulés et non encapsulés.....	46

---

## **INTRODUCTION GENERALE**

---

## Introduction générale

---

Les fraises occupent une position de premier plan parmi les fruits en raison de leur concentration élevée en composés phytochimiques bénéfiques pour la santé (**Giampieri *et al.*, 2012; Sabbadini *et al.*, 2020**). De nombreuses études scientifiques ont apporté des preuves solides de la présence de diverses molécules bioactives dans les fraises, telles que l'acide ascorbique, qui est une forme de vitamine C bénéfique pour la santé, ainsi que des composés polyphénoliques tels que l'acide ellagique et l'acide férulique. Les fraises contiennent également des flavonoïdes, notamment les anthocyanines, les catéchines et les acides phénoliques, qui ont été étudiés pour leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires et potentiellement bénéfiques pour la santé cardiovasculaires (**Capocasa *et al.*, 2016**).

Les bienfaits des fraises sont attribuables en grande partie à leur composition riche en polyphénols. Cependant, il est important de noter que ces composés sont souvent sensibles à la dégradation et à l'oxydation lorsqu'ils sont exposés à l'air, à la chaleur ou à la lumière. Pour préserver leur intégrité et éviter cette fragilité, l'encapsulation des polyphénols devient essentielle. L'encapsulation consiste à envelopper les molécules de polyphénols dans des structures protectrices, telles que des nanoparticules, des liposomes ou des microcapsules. Cette enveloppe permet de créer une barrière physique entre les polyphénols et leur environnement, réduisant ainsi leur exposition aux facteurs externes qui pourraient les dégrader (**Costa *et al.*, 2021**).

L'encapsulation offre plusieurs avantages. Elle permet une meilleure stabilité des polyphénols, prolongeant ainsi leur durée de conservation. De plus, elle peut améliorer leur biodisponibilité, c'est-à-dire la capacité du corps à absorber et à utiliser efficacement les polyphénols. En protégeant les polyphénols de la dégradation, l'encapsulation permet également de préserver leurs propriétés biologiques et leurs bienfaits potentiels pour la santé. Les techniques d'encapsulation des polyphénols sont largement étudiées et utilisées dans le domaine de la recherche alimentaire et de la formulation de compléments alimentaires. Elles offrent des possibilités intéressantes pour développer des produits à base de fraises ou d'autres sources de polyphénols, en maximisant leurs avantages pour la santé et en minimisant leur dégradation (**Pasukamonset *et al.*, 2016**).

L'encapsulation à l'aide de levure peut être considérée comme un exemple de traitement peu coûteux et à grande échelle de substances biologiquement actives pour leur administration efficace à l'organisme humain (**Round et Nelson, 2006; kasote *et al.*, 2018; Labuschange, 2018**).

Ainsi, certaines études ont montré que l'encapsulation de substances biologiquement actives à l'aide de cellules de levure (*Saccharomyces*) présente plusieurs avantages, car le matériau d'encapsulation s'est révélé peu coûteux, bien combiné aux processus de production et adapté au traitement de grandes quantités de matières premières. L'encapsulation par des cellules de levure facilite la diffusion des ingrédients actifs à travers la paroi cellulaire et la membrane pour être

## Introduction générale

---

contrôlée à une certaine température et pendant un certain temps dans un mélange prédéterminé de solutions, la paroi cellulaire de levure assurant la protection des ingrédients actifs liquides contre l'oxydation et la dégradation. L'acide chlorogénique encapsulé dans la levure s'est avéré très stable en cas de variations d'humidité et de température. Un autre avantage évident de cette méthode est qu'aucun additif autre que l'eau, la levure et les matières premières de base n'est utilisé pendant le traitement, ce qui garantit sa sécurité dans l'industrie alimentaire (**Joye et McClements, 2014; Karaman, 2020; Khameneh et al., 2021; Li et al., 2022; Oliveira et al., 2022**).

Dans ce contexte, l'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet de l'encapsulation sur la teneur en composés phénoliques et l'activité antioxydante de *Fragaria x ananassa* Duch.

Ce mémoire est structuré en deux parties distinctes :

La première partie, intitulée "Synthèse bibliographique", a pour objectif d'effectuer une analyse approfondie de la littérature existante sur les polyphénols, l'encapsulation et la plante étudiée. L'objectif principal est de regrouper et de résumer les connaissances actuelles dans ces domaines spécifiques.

La deuxième partie présente le matériel et les méthodes utilisés pour la réalisation de la microencapsulation, ainsi que les protocoles de quantification des composés phénoliques tels que les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tanins. L'évaluation de l'activité antioxydante est également effectuée à l'aide de tests tels que l'activité antiradicalaire DPPH et ABTS. Les résultats obtenus à partir de ces analyses sont ensuite discutés et interprétés.

En conclusion générale, l'ensemble des résultats est récapitulé et des perspectives sont proposées pour de futures recherches dans ce domaine.

---

**Chapitre I : Présentation de la plante**

*Fragaria xananassa* D.

---

### 1. Généralités

La fraise est largement appréciée et consommée dans diverses formes, qu'il s'agisse de sa consommation fraîche ou de sa transformation. Ce fruit est reconnu comme une source importante de nutriments essentiels, notamment des sucres, des vitamines, des minéraux, ainsi que des composés bioactifs tels que l'acide ascorbique, les caroténoïdes, les composés phénoliques et les folates. La plupart de ces composés sont des antioxydants naturels qui contribuent à l'apport nutritionnel de qualité de la fraise (**Giampieri *et al.*, 2015**).

La fraise est un fruit non climactérique qui doit être cueilli à maturité complète pour garantir une qualité de vente maximale. Cependant, en raison de son taux de respiration élevé, de sa faible résistance mécanique et de sa forte vulnérabilité aux agents pathogènes, ce fruit est très périssable (**Neri *et al.*, 2014**).

En plus de l'agriculture et de la commercialisation des fraises, l'industrie de la fraise englobe également la transformation de ce fruit. Environ 21% de la production de fraises est consacrée à la fabrication de divers produits dérivés tels que des yaourts, des jus, des confitures et d'autres produits (**Serrano, 2015**).

### 2. Description et classification botanique

#### 2.1. Description botanique

Contrairement à la plupart des autres espèces de la famille des Rosaceae, le fraisier est une plante vivace qui pousse en touffe, avec une tige très courte et des feuilles composées en rosette. Les bourgeons axillaires du fraisier se transforment en stolons appelés "filets" ou "coulons", qui s'enracinent naturellement aux nœuds et produisent de nouveaux plants. Les fleurs blanches du fraisier donnent naissance à des fraises une fois fécondées. D'un point de vue histologique, la fraise n'est pas le véritable fruit du fraisier. En réalité, c'est le réceptacle qui se remplit de sucres, se développe en volume et enrobe les ovaires en son parenchyme après la fécondation. Au cours de la maturation, le réceptacle prend une couleur rouge, tandis que les vrais fruits se forment à partir des akènes résultant de la fécondation des carpelles. La taille et le poids des fraises peuvent varier au sein d'une même variété et même d'une même plante, en fonction de leur ordre de formation. Les fruits les plus anciens, qui apparaissent en premier, sont généralement plus grands que les plus jeunes qui se développent ultérieurement. La morphologie du fruit est un critère distinctif pour identifier une variété particulière de fraise. Cependant, même au sein d'une même variété, il existe une grande

## Chapitre I : Présentation de la plante *Fragaria x ananassa* D.

---

variabilité en termes de forme. On peut trouver des fraises en forme de rein, de sphère, d'œuf, de cône ou encore d'ellipse (**Rakotoarisoa, 2006**).

### 2.2. Classification botanique

- **Domaine** : Biota
- **Règne** : Plantae
- **Sous-Règne** : Viridiaeplantae
- **Infra-Règne** : Streptophyta
- **Classe** : Equisetopsida
- **Clade** : Tracheophyta
- **Clade** : Spermatophyta
- **Sous-Classe** : Magnoliidae
- **Super-Ordre** : Rosanae
- **Ordre** : Rosales
- **Famille** : Rosaceae
- **Genre** : *Fragaria*
- **Espèce** : *Fragaria ananassa* (**Ouaret et al., 2018**).

### 3. Les variétés

Le monde compte plus de 600 variétés de fraisiers qui sont classées en trois catégories selon leur sensibilité à la durée du jour :

- Les variétés à jours courts (ou non remontantes) nécessitent une durée de jour plus courte, avec moins de 13 heures d'ensoleillement (généralement en automne ou au printemps) pour pouvoir produire des fleurs (**ACI, 2017**).
- Les variétés intermédiaires (aussi connues sous le nom de semi-remontantes) produisent des fleurs deux fois par an, au printemps et en automne, avec environ 14h30 d'ensoleillement (**ACI, 2017**).
- Les variétés neutres (ou remontantes) ont la capacité de fleurir toute l'année, sous réserve que les températures soient favorables, avec une durée de jour d'environ 16 heures d'ensoleillement (**ACI, 2017**).

### 4. Production mondiale et Algérienne

#### 4.1. Mondiale

La production annuelle mondiale de fraises dépasse légèrement les 4,3 millions de tonnes et est concentrée dans deux pays principaux (tableau 1), les États-Unis et l'Espagne, qui ont presque doublé leur production en plus de 15 ans. En ce qui concerne le commerce de la fraise, l'Espagne est le plus grand producteur et exportateur de fraises en Europe. Les trois principaux pays exportateurs sont l'Espagne, les Pays-Bas et la Belgique, tandis que les plus grands importateurs en 2010 étaient l'Allemagne, la France et le Royaume-Uni (ACI, 2017).

**Tableau 1.** Production mondiale de fraise en 2015 (ACI, 2017).

Pays	Fabrication[t]	Pourcentage %
Etats-Unis	1 294 180	28 %
Turquie	300 940	7 %
Espagne	275 300	6 %
Égypte	238 432	5 %
Corée du Sud	231 803	5 %
Mexique	226 657	5 %
Japon	177 500	4 %
Pologne	176 748	4 %
Russie	165 000	4 %
Allemagne	156 911	4 %
Italie	153 875	4 %
Maroc	140 600	3 %
Autres pays	819 888	19 %
Total	4 356 834	100 %

#### 4.2. Algérienne

Il est important de mentionner la "lemkerkba", ou la fraise autochtone dodue de Skikda, lorsque nous parlons de la culture de la fraise en Algérie (figure 1). Cette variété de fraise a été cultivée depuis les années 1920 et compte actuellement près de 300 hectares de terres dédiées à sa production, principalement dans la commune de Tamalous (130 ha) et au chef-lieu de la wilaya (102 ha) de Skikda. La culture intensive de la fraise a été lancée en Algérie en 1989 avec l'introduction de

## Chapitre I : Présentation de la plante *Fragaria x ananassa* D.

la plasticulture, qui permet une production à grande échelle. Elle a ensuite été testée sur 4 hectares à Jijel en 2001-2002. Aujourd'hui, les wilayas de Tipaza et Jijel se partagent le marché de la fraise avec la wilaya de Skikda. Au total, environ 1200 hectares sont dédiés à la culture intensive de la fraise en Algérie, et la fête de la fraise est célébrée chaque année dans ces trois wilayas (ACI, 2017).



Figure 1. Répartition de la culture de la fraise en Algérie (Madrp, 2017).

✚ Selon les informations de la Direction des Services Agricoles de la Wilaya de Jijel, la région de Jijel a enregistré une augmentation significative de la superficie cultivée en fraises entre 2002 et 2017 (figure 2), comme le démontre la figure présentée ci-dessous.

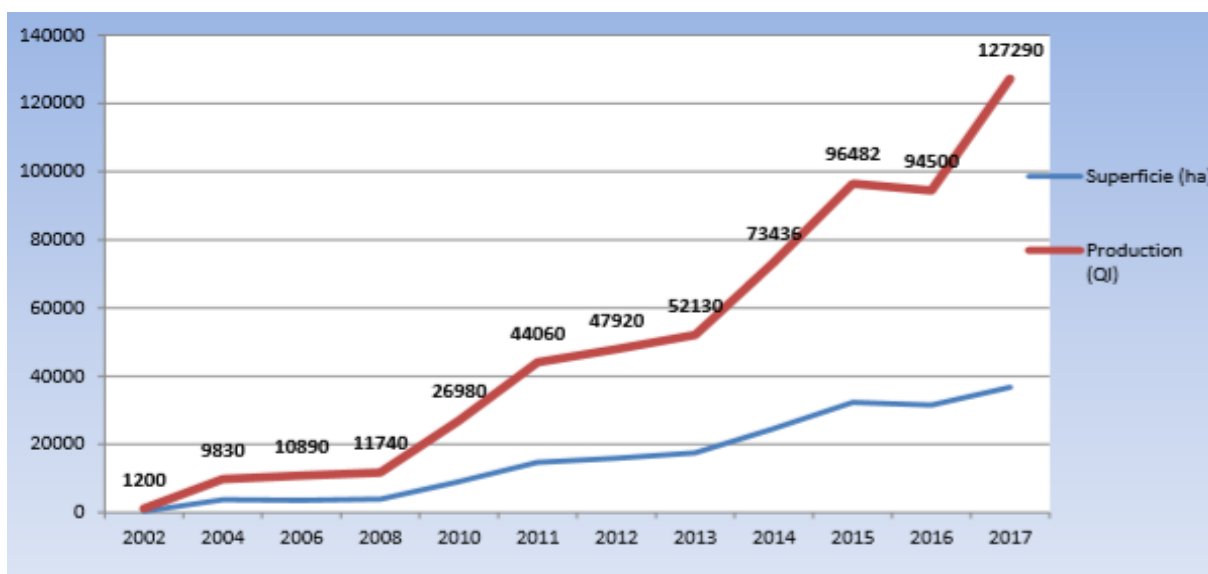


Figure 2. Evolution de la culture de la fraise dans la région de Jijel (2002 à 2017) (DSA Jijel, 2019).

### 5. Composition physico-chimiques

La fraise (*Fragaria x ananassa*) est largement consommée sous forme fraîche ou transformée et figure parmi les baies les plus répandues. En raison de ses impacts commerciaux et économiques considérables, elle est sans conteste la baie la plus étudiée sur les plans nutritionnel, génomique et

## Chapitre I : Présentation de la plante *Fragaria x ananassa* D.

agronomique. Sa teneur élevée en vitamine C et en folates (tableau 2) lui confère une composition nutritionnelle remarquable (Giampieri *et al.*, 2014).

**Tableau 2.** Composition nutritionnelle des fraises fraîches (Quantité dans 100 g de fraises) (Giampieri *et al.*, 2014).

Proximités et glucides		Contenu minéral		Contenu en vitamines	
Eau (g)	90,95	Calcium (mg)	16,00	Vitamine C (mg)	58,00
Energie (kcal)	32,00	Fer (mg)	0,41	Thiamine (mg)	0,02
Protéines (g)	0,67	Magnésium (mg)	13,00	Riboflavine (mg)	0,02
Cendres (g)	0,40	Phosphore (mg)	24,00	Niacine (mg)	0,39
Lipides totaux (g)	0,30	Potassium (mg)	153,00	Acide pantothénique (mg)	0,13
Glucides (g)	7,68	Sodium (mg)	1,00	Vitamine B6 (mg)	0,05
Sucres (g)	4,89	Zinc (mg)	0,14	Folate (µg)	24,00
Saccharose (g)	0,47	Cuivre (mg)	0,048	Choline (mg)	5,70
Glucose (g)	1,99	Manganèse (mg)	0,39	Vitamine A, RAE (µg)	1,00
Fructose (g)	2,44	Sélénium (µg)	0,40	Lutéine + zéaxanthine (µg)	26,00
Fibres alimentaires (g)	2,00			Vitamine E, α-tocophérol (mg)	0,29
				Vitamine K, phylloquinone (µg)	2,20

### 6. Composés phénoliques de la fraise

La fraise est un fruit de composition variée, leur couleur est principalement déterminée par l'accumulation d'anthocyanes et de composés polyphénoliques (Giampieri *et al.*, 2014). Leur teneur en polyphénols est particulièrement élevée comparativement aux autres fruits (tableau 3).

## Chapitre I : Présentation de la plante *Fragaria x ananassa* D.

**Tableau 3.** Concentrations des principaux composés phénoliques dans les fraises (**Giampieri *et al.*, 2014**).

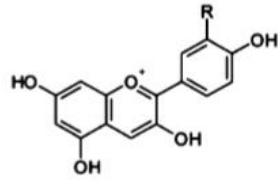
Groupe	Composé	Concentration (mg/100 g poids frais)
Anthocyanes	Cyanidine-3-glucoside	1,10
	Pelargonidine-3-glucoside	25,30
	Pelargonidine-3-rutinoside	1,10
	Cyanidine-3-malonylglucoside	0,4
	Pelargonidine-3-malonylglucoside	6,00
Flavonols	Glycosides de quercétine	1,81
	Glycosides de kaempférol	0,84
Flavan-3-ols	(+)-catéchine	4,50
	Proanthocyanidines	
	Dimères de procyanidine	9,10
	Trimères de procyanidine	7,90
Ellagitanins	Agrimoniine	8,80
	Acide ellagique	0,52
Glycosides d'acide ellagique	Pentoside d'acide ellagique, désoxyhexoside d'acide ellagique, désoxyhexoside de méthyl ellagique	0,58
Conjugués d'acide cinnamique	Hexoses coumaroyl	5,40
	Glucose cinnamoyle	5,00

La fraise (*Fragaria x ananassa*) est également enrichie par une vaste variété de constituants phénoliques (figure 3) (**Giampieri *et al.*, 2014**). Les flavonoïdes, principalement les anthocyanes, sont la principale classe de ces composés, les composés polyphénoliques des fraises les plus connus. À cet égard, plusieurs études ont confirmé que les anthocyanes représentent les composés phénoliques les plus importants quantitativement présents dans les fraises et que les dérivés de la pelargonidine et de la cyanidine sont les plus représentatifs. Ils ont différentes propriétés (par exemple, photoprotectrices, antioxydantes, anti-inflammatoires, anticancéreuses, antimutagènes) et peuvent également moduler les voies enzymatiques ; c'est ainsi que certains d'entre eux peuvent agir dans la prévention des maladies liées au stress oxydatif. De plus, la consommation quotidienne d'anthocyanes est très constante et considérée comme le groupe de composés phénoliques le plus consommé dans

## Chapitre I : Présentation de la plante *Fragaria x ananassa* D.

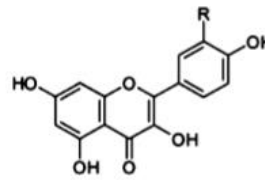
l'alimentation humaine : il a été estimé que la consommation quotidienne pouvait atteindre 12,5 mg/jour aux États-Unis (Giampieri *et al.*, 2014).

### Anthocyanins



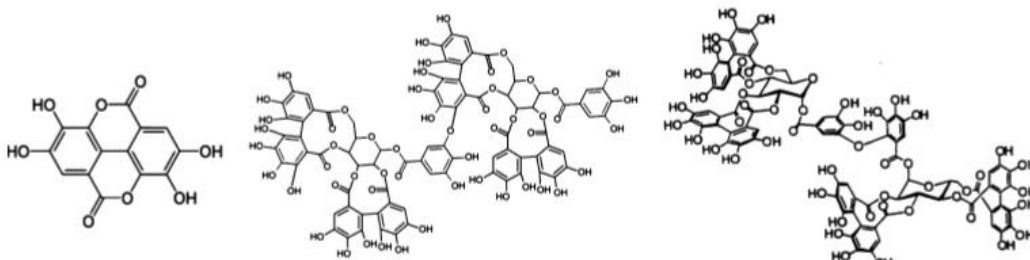
R= OH, Cyanidin  
R= H, Pelargonidin

### Flavonols



R= OH, Quercetin  
R= H, Kaempferol

### Ellagitannins

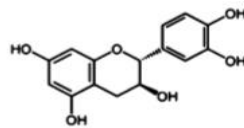


Ellagic acid

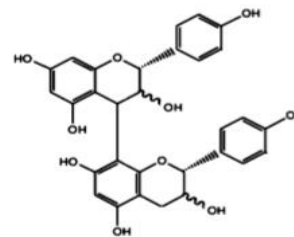
Sanguin H-6

Agrimoniin

### Flavanols

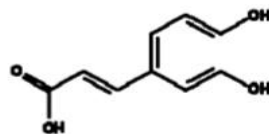


(+) Catechin

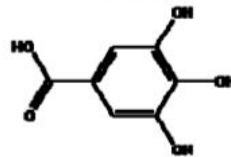


Propelargonidin

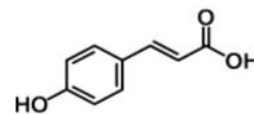
### Phenolicacids



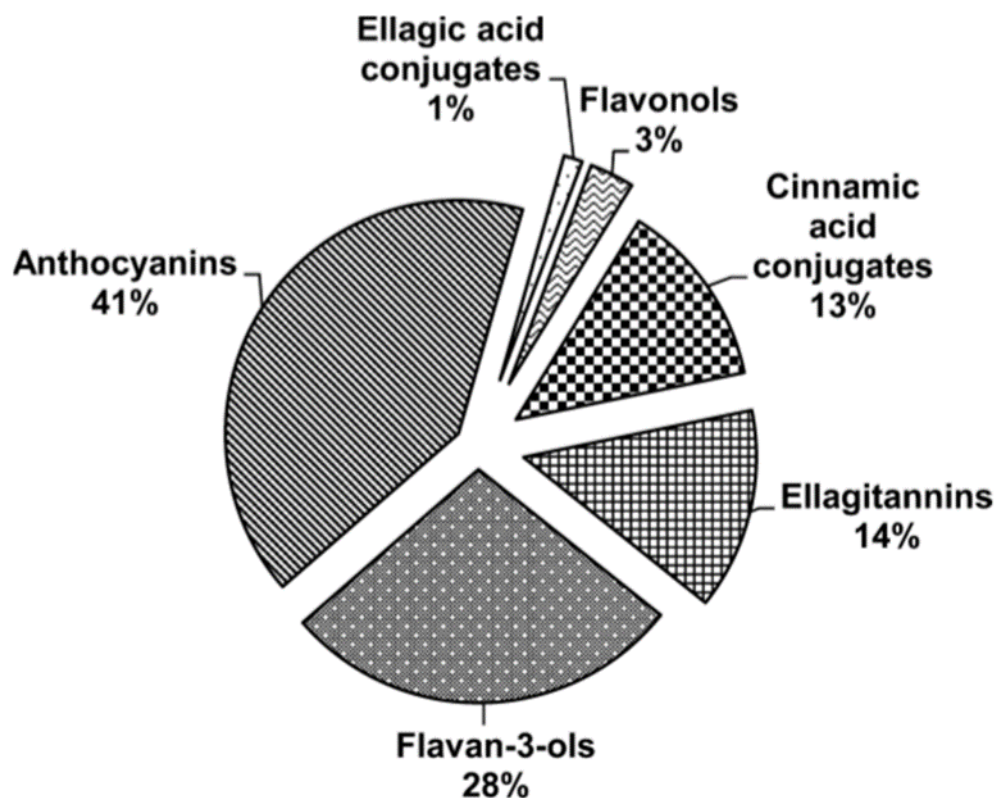
Caffeic acid



Gallic acid



Coumaric acid



**Figure 3.** Principaux composés polyphénoliques présents dans les fraises : A : Structures chimiques, B : Pourcentages (Giampieri *et al.*, 2014).

## 7. Utilisations

La fraise est un fruit polyvalent qui peut être utilisé dans de nombreux domaines différents. Que ce soit en cuisine, en cosmétique, en médecine ou en alimentation fonctionnelle, la fraise offre une gamme de propriétés bénéfiques pour la santé et le bien-être.

### 7.1. Application alimentaire et traditionnelle

Les fruits sont souvent transformés en boissons alcoolisées. La fraise est couramment utilisée dans l'industrie pour la fabrication de gelées, de crèmes glacées, de marmelades, de yaourts, de confitures et d'autres produits de dessert (Rapuru *et al.*, 2022).

### 7.2. Application médicale

Ils ont également été utilisés dans la médecine traditionnelle pour traiter des affections telles que l'inflammation de l'estomac, les voies urinaires, la peau, le cœur et les vaisseaux sanguins (Youdim *et al.*, 2000; Mazza, 2007; Basu *et al.*, 2010; Giampieri *et al.*, 2012), ainsi que les maladies rénales (Rapuru *et al.*, 2022).

### 7.3. Application cosmétiques

En plus de son utilisation comme fruit comestible, la fraise est employée dans l'industrie de la fabrication de déodorants et de cosmétiques en raison de ses propriétés odorantes, ainsi que de son utilisation comme agent aromatisant (**Rapuru et al., 2022**).

## 8. Activités pharmacologique

Actuellement, l'accent est mis sur la consommation de fraises en raison de leurs propriétés biologiques qui fournissent différents avantages pour la santé humaine. Ces propriétés comprennent des activités antioxydantes, cardioprotectrices, anticancéreuses, anti-inflammatoires, antidiabétiques, antimétaboliques, anti-obésité, neuroprotectrices et antimicrobiennes (**Afrin et al., 2016**).

### 8.1. Activités antioxydantes

Les fraises ont été reconnues pour leur capacité antioxydante, qui est attribuée aux composés bioactifs qu'elles renferment. Des études réalisées en laboratoire ont démontré que les constituants bioactifs présents dans les fraises agissent comme des antioxydants naturels en réduisant la présence d'espèces réactives de l'oxygène, en liant les ions métalliques et en neutralisant ou en éliminant les radicaux libres. Des études portant sur des sujets humains ont suggéré que la consommation régulière de fraises stimule les défenses antioxydantes endogènes, améliore la capacité antioxydante du plasma sanguin, protège les protéines plasmatiques contre les dommages et augmente les propriétés antioxydantes non-urate du plasma. De plus, la consommation de fraises riches en antioxydants améliore l'état antioxydant du plasma sanguin et les concentrations en composés bioactifs, renforce la résistance des globules rouges à l'hémolyse et réduit le taux de mortalité des cellules mononucléaires (**Santos et al., 2022**).

### 8.2. Activités anti-inflammatoires

Le processus inflammatoire est un mécanisme physiologique qui défend l'organisme contre différents types d'agressions, mais sa dysrégulation peut causer des dommages irréversibles aux tissus de l'hôte et conduire à la progression de maladies. La consommation régulière de fruits et légumes est recommandée pour lutter contre les maladies associées à l'inflammation chronique. Les fraises sont particulièrement intéressantes pour leurs propriétés anti-inflammatoires, comme en témoignent plusieurs études *in vitro* et *in vivo*. Des études menées sur des sujets humains ont évalué l'impact des boissons contenant des fraises sur les réponses insuliniques et inflammatoires après les repas, révélant des effets positifs. Les résultats ont montré une réduction significative des concentrations de cytokines inflammatoires, notamment l'IL-6 et la protéine C-réactive (**Afrin et al., 2016**).

### 8.3. Activités cardioprotectrices

Les maladies cardiovasculaires sont la principale cause de décès dans le monde, avec plus de 17,3 millions de décès par an, un nombre qui devrait atteindre plus de 23,6 millions d'ici 2030. Les facteurs de risque comprennent l'obésité, le diabète de type 2, le syndrome métabolique, l'hypertension artérielle et le profil lipidique (faible taux de cholestérol HDL et taux élevé de triglycérides). Des études ont montré que la consommation de composés de baies, tels que les phénoliques et les micronutriments, peut réduire le risque de maladies cardiovasculaires. Les flavonoïdes alimentaires, principalement présents dans les myrtilles et les fraises, ont été rapportés pour prévenir l'hypertension artérielle. Des études ont également montré que la consommation de fraises pouvait réguler positivement les profils lipidiques, réduire l'oxydation des lipides, améliorer la défense antihémolytique et la fonction plaquettaire, et atténuer les effets postprandiaux d'un repas riche en graisses chez des sujets hyperlipidémiques. Dans une étude randomisée, les participants ont également présenté une diminution du taux de LDL et de cholestérol total après une consommation de fraises lyophilisées. Cependant, aucune amélioration n'a été observée pour l'inflammation, la glycémie, l'adiposité ou la tension artérielle (Afrin *et al.*, 2016).

### 8.4. Syndrome anti métabolique

Le syndrome métabolique est une condition médicale comprenant la résistance à l'insuline, la dyslipidémie, l'obésité et l'hypertension artérielle qui affecte 20 à 40% de la population adulte dans le monde. Des études ont montré que la consommation d'un régime à base de plantes, y compris des légumes et des fruits, est associée à une prévalence ou un risque plus faible de développer le syndrome métabolique. Des études expérimentales ont également montré que la consommation de fraises, d'extraits ou de polyphénols purifiés peut limiter l'absorption et le transport du glucose, normalisant ses niveaux sanguins. Des études sur des sujets obèses atteints du syndrome métabolique ont montré que la consommation de fraises lyophilisées peut améliorer les facteurs de risque athérosclérotiques, réduisant de manière significative le LDL et le CT, le malondialdéhyde sérique et les molécules d'adhérence. De plus, la consommation de confiture de fraises peut réduire l'hyperglycémie postprandiale. Cependant, l'ajout d'antioxydants naturels à une confiture à faible teneur en sucre n'a pas montré de bénéfice supplémentaire. Des études ont également montré que la poudre de fraise lyophilisée peut réduire les niveaux de cholestérol total et de LDL chez les femmes présentant trois caractéristiques du syndrome métabolique (Afrin *et al.*, 2016).

### 8.5. Activités anti-obésité

Les fruits et légumes, en particulier les fraises, sont reconnus comme un outil bénéfique pour la gestion du poids et la prévention des maladies liées à l'obésité. Une étude pilote a montré que la consommation régulière de fraises contribue à la suppression des maladies chroniques liées à l'obésité, mais la poudre de fraise n'a pas induit de changements significatifs dans les marqueurs sanguins d'inflammation et de statut antioxydant. Dans une étude distincte, la poudre de fraise lyophilisée a augmenté la production de TNF- $\alpha$  chez les monocytes traités par lipopolysaccharide et la réponse proliférative des cellules CD8+ T activées par CD3/CD28 (Afrin *et al.*, 2016).

### 8.6. Activités antidiabétiques

Le diabète sucré est un problème de santé croissant pour l'être humain, avec 387 millions de patients diabétiques dans le monde actuellement, chiffre présumé atteindre 592 millions d'ici 2035. Des études ont montré qu'une consommation accrue de fruits, en particulier de baies et de légumes, est associée à une incidence réduite du diabète. Des études précliniques ont montré que la supplémentation en fraises, en particulier, ou leur fraction flavonoïde purifiée, inhibait l'absorption et le transport du glucose et normalisait ses niveaux dans le sang. Une enquête longitudinale prospective a révélé qu'une consommation accrue de fruits (y compris les fraises) était significativement corrélée à un risque plus faible de diabète de type 2. Une étude a montré que la consommation de fraises lyophilisées pendant une courte période a amélioré certains facteurs de risque de maladies cardiovasculaires chez les sujets atteints de diabète de type 2 (Kuswardani *et al.*, 2023).

### 8.7. Activités anticancéreuses

Les fraises ont des activités anticancéreuses, antioxydantes et géno-protectrices dans divers types de cellules cancéreuses et de modèles animaux. Des études ont montré qu'une consommation accrue de fruits du sous-groupe botanique Rosaceae, comme les fraises, réduit le risque de carcinome épidermoïde de l'œsophage humain et de cancer de la tête et du cou. Les fraises ont également démontré une réduction significative de l'excrétion du carcinogène N-nitrosodiméthylamine (NDMA) et ont inhibé la progression des lésions précancéreuses de l'œsophage (Salas-Arias *et al.*, 2023).

### 8.8. Activités neuroprotectrices

Les maladies neurodégénératives liées au vieillissement sont un grave problème de santé. Des études épidémiologiques ont montré que la consommation d'antioxydants et de composés bioactifs est associée à une réduction du risque de ces maladies. Les phénols végétaux tels que les acides phénoliques, les flavonoïdes et les terpènes ont des effets neuroprotecteurs potentiels, en améliorant

la fonction neurologique. Une étude clinique a montré que la consommation prolongée de fraises est associée à un ralentissement du déclin cognitif chez les personnes âgées (**Spagnuolo et al., 2023**).

### 8.9. Activités antimicrobiennes

Les polyphénols présents dans les fraises ont été étudiés pour leur activité antimicrobienne contre les bactéries, les levures, les champignons pathogènes et les parasites. Le mécanisme antimicrobien implique l'inhibition des enzymes extracellulaires, la privation de substrats nécessaires à la croissance microbienne, l'anti-adhérence des bactéries aux cellules épithéliales, des actions directes sur le métabolisme microbien, la déstabilisation et la perméabilisation des membranes cytoplasmiques. Les extraits de fraises ont inhibé la croissance de divers microbes entéropathogènes, notamment les espèces *Bacillus*, *Clostridium*, *Campylobacter*, *Escherichia*, *Helicobacter*, *Salmonella* et *Staphylococcus*, ainsi que sur des espèces fongiques telles que *Candida krusei*, *Candida albicans*, *Trichophyton tonsurans* et *Aspergillus fumigatus*, et un parasite intestinal humain, *Giardia duodenalis*. Les ellagitanins sont les principaux phénols antimicrobiens contre ces pathogènes. Les extraits de fraises ont également montré une forte activité antifongique contre différentes souches d'espèces fongiques (**Koraqi et al., 2023**).

---

## **Chapitre II : Polyphénols**

---

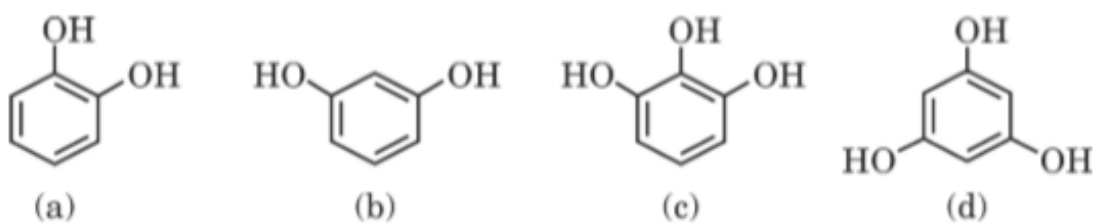
### 1. Définition

Le terme "polyphénols" ou "composés phénoliques" englobe une diversité considérable de molécules, comprenant plus de 10 000 structures identifiées à ce jour. Ces composés se distinguent par la présence d'au moins un cycle aromatique dans leur structure, accompagné d'un nombre variable de groupes hydroxyle, qui peuvent être substitués ou non.

La plupart des composés phénoliques présents dans les plantes sont des dérivés de l'acide trans-cinnamique. Cet acide est synthétisé à partir de la L-phénylalanine et de la tyrosine grâce à l'action de deux enzymes, la L-phénylalanine ammonia-lyase (PAL) et la tyrosine ammonia-lyase (TAL), respectivement. Ces enzymes marquent le point de transition entre le métabolisme primaire, via la voie du shikimate, et le métabolisme secondaire, via la voie des phénylpropanoïdes (**Chehrit-Hacid, 2016**).

### 2. La structure chimique des polyphénols

La structure chimique des polyphénols (figure 4) a toujours un substituant hétéroatomique autre que des groupes hydroxyle. Les liaisons ester et éther sont courantes, ainsi que divers dérivés d'acide carboxylique. Pendant ce temps, les liaisons ester sont courantes dans les composés tanins hydrolysables. Indépendamment des liaisons simples hétéroatomiques, les structures carbonées peuvent devenir complexes. À cet égard, diverses liaisons carbone-carbone rejoignent les éthers et esters labiles hydrolytiquement, courantes dans les tanins condensés non hydrolysables (**Abdel et Mansour, 2017**).



**Figure 4.** Structure chimique des fractions phénoliques : (a) Pyrocatechol (b) Résorcinol (c) Pyrogallol (d) Phloroglucinol (**Abdel et Mansour, 2017**).

### 3. Classification

Les polyphénols sont très répandus dans les plantes et se trouvent dans les aliments tels que les légumes, les fruits et le thé. Ils sont composés de plus de 8000 variantes structurales et sont classés en fonction de leur structure chimique (figure 5), notamment en flavonoïdes, acides phénoliques, tanins et stilbènes. Les polyphénols sont des métabolites secondaires des plantes et contiennent des

## Chapitre II : Polyphénols

cycles aromatiques avec des groupes hydroxyles. Ils sont souvent présents dans des mélanges complexes et ne sont pas facilement absorbés sous leur forme naturelle (Ding *et al.*, 2018).

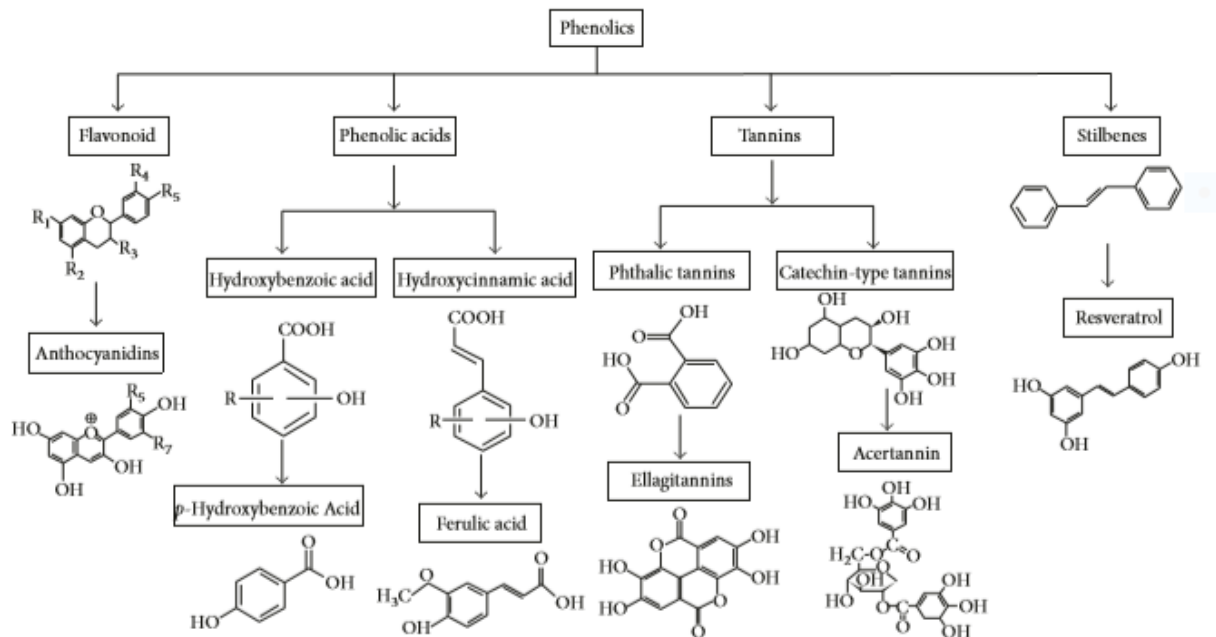


Figure 5. La classification et les structures chimiques des polyphénols (Ding *et al.*, 2018).

### 4. Localisation des polyphénols

Les polyphénols sont distribués dans deux compartiments cellulaires principaux : les vacuoles et la paroi. Dans les vacuoles, ils sont conjugués avec des sucres ou des acides organiques pour augmenter leur solubilité et réduire leur toxicité pour la cellule. Dans la paroi, ils sont principalement liés à des structures telles que la lignine et les flavonoïdes, ce qui contribue à la résistance des parois cellulaires, à la régulation de la croissance des plantes et à la défense contre les agents pathogènes (Naczki *et Shahidi*, 2006).

Les polyphénols sont localisés de manière spécifique au niveau des tissus en fonction de leur rôle dans la plante. À l'intérieur des feuilles, la répartition des composés varie, avec les anthocyanes et les flavonoïdes étant principalement présents dans l'épiderme. Dans la plante entière, certains composés ne sont accumulés que dans des organes spécifiques. Par exemple, chez la pomme, les polyphénols sont impliqués dans la coloration de la peau par le biais des anthocyanes et dans la qualité organoleptique de la chair, notamment pour l'amertume ou l'astringence (Bénard, 2009).

### 5. La biosynthèse et le métabolisme des polyphénols

Les composés polyphénoliques résultent de l'assemblage de fragments plus restreints et de motifs structuraux dérivés de phénols naturels plus basiques. Ils sont issus de la voie de la phénylpropanoïde pour l'acide shikimique (provenant du shikimate) ou de la voie des acides phénoliques pour les gallo-tannins et analogues. Les flavonoïdes et l'acide caféique sont également impliqués dans la biosynthèse des polyphénols. Les dérivés sont biosynthétisés à partir de la phénylalanine et de la malonyl-CoA. Le complexe de gallo-tannins se développe par l'oxydation *in vitro* de la 1,2,3,4,6-pentagalloyl-glucose ou par des processus de dimérisation, ce qui entraîne la formation de tannins hydrolysables. Pour les anthocyanidines, précurseurs de la biosynthèse des tanins condensés, la dihydroflavonol réductase et la leucoanthocyanidine réductase (LAR) sont des enzymes cruciales qui catalysent la réaction chimique avec l'ajout ultérieur de motifs de catéchine et d'épicatéchine pour des tanins plus grands et non hydrolysables (**Tanner *et al.*, 2003**).

La forme glycosylée se développe grâce à l'activité de la glucosyltransférase et augmente la solubilité des polyphénols (**Krasnow et Murphy, 2004**).

Une enzyme importante est le polyphénol oxydase (PPO). Cette enzyme catalyse l'oxydation des o-diphénols pour produire des o-quinones. Il convient de mentionner que cette polymérisation rapide des o-quinones produit des pigments polyphénoliques noirs, bruns ou rouges. C'est la cause du brunissement des fruits. Chez les insectes, en revanche, la PPO sert au durcissement de la cuticule (**Krasnow et Murphy, 2004**).

Une enzyme majeure est la laccase qui initie le clivage des cycles hydrocarbonés et catalyse l'ajout d'un groupe hydroxyle aux composés phénoliques. Cette enzyme majeure se trouve dans les champignons, y compris le *Panellus stipticus*. Ces organismes sont capables de dégrader la lignine, un polymère aromatique complexe dans le bois qui est hautement résistant à la dégradation par les systèmes enzymatiques conventionnels (**Hertweck, 2009**).

### 6. Rôle biologique des polyphénols

Il est important de souligner que les phénols naturels et les polyphénols ont un rôle significatif dans l'écologie de la plupart des plantes. L'impact de ces composés dans les tissus végétaux peut être subdivisé de la manière suivante (**Lattanzio *et al.*, 2006**) :

- La régulation de la libération d'hormones de croissance comme l'auxine peut être à la fois inhibée et stimulée.

## Chapitre II : Polyphénols

---

- Les plantes utilisent des pigments pour se colorer et se protéger contre l'ionisation des rayons UV.
- Les polyphénols peuvent agir comme des phytoalexines pour prévenir les infections microbiennes.
- Les "molécules de signalisation" jouent un rôle dans la maturation ainsi que dans d'autres processus de croissance.

### 7. L'utilisation chimique des polyphénols

Les polyphénols ont des utilisations chimiques importantes, notamment comme colorants pour teindre des tissus non synthétiques en utilisant des extraits riches en tanins et autres polyphénols, comme l'écorce de grenade en Inde (**Jindal et Sharma, 2004**).

Ils ont également été traditionnellement utilisés pour tanner le cuir. Aujourd'hui, les polyphénols sont utilisés comme précurseurs en chimie verte (**Polshettiwar et Varma, 2008**).

Le liquide de coque de noix de cajou (CNSL) est une source importante de matière première phénolique pour l'industrie des polymères. Il est utilisé dans la fabrication de peintures, de revêtements, de vernis, de résines, de caoutchouc, de tensioactifs, de polymères à base de polyuréthane, de résines époxy et de bois (**Edoga et al., 2006**).

### 8. Activité antioxydante

Les polyphénols agissent en tant qu'antioxydants par différents mécanismes, tels que la suppression directe des radicaux libres réactifs, la chélation des ions métalliques traces impliqués dans la formation de radicaux libres, l'inhibition des enzymes impliquées dans la production de radicaux libres et la régénération des antioxydants liés à la membrane tels que l' $\alpha$ -tocophérol (**Rice-Evans et al., 1996; Nijveldt et al., 2001; Liu et Guo, 2005**).

Les polyphénols, en tant qu'antioxydants puissants, s'engagent dans la neutralisation des radicaux libres en cédant soit un électron, soit un atome d'hydrogène. Deux mécanismes principaux d'antioxydation sont actuellement envisagés : le transfert d'atome d'hydrogène et le transfert d'électron unique. Les polyphénols agissent en tant qu'antioxydants à effet chaîne brisée en donnant un atome d'hydrogène à un radical libre, tandis que dans le transfert d'électron unique, un cation radical stable se forme. L'efficacité de chaque processus peut être évaluée en fonction de l'énergie de dissociation des liaisons et du potentiel d'ionisation du phénol (**Quideau et al., 2011; Makris et Boskou, 2014**).

## Chapitre II : Polyphénols

---

Il est possible que ces réactions surviennent lors de la neutralisation des espèces réactives de l'oxygène (ROS =  $O_2^{\bullet-}$ ,  $HO^{\bullet}$ ,  $RO^{\bullet}$ ,  $ROO^{\bullet}$  avec R = alkyle, etc...) produites en excès pendant le stress oxydatif, telles que les réponses inflammatoires après une infection microbienne ou une exposition aux polluants ou aux radiations (**Böhm *et al.*, 1998; Bravo, 1998; Dangles, 2006**).

### 9. Les effets potentiels sur la santé

Différents extraits polyphénoliques, tels que ceux issus de la pulpe d'olive, des pépins de raisin, de la peau de raisin et de l'écorce de pin maritime, sont commercialisés comme ingrédients dans les compléments alimentaires, les aliments fonctionnels et les cosmétiques, sans revendication légale de santé établie. Il convient de mentionner qu'il n'existe pas de niveaux recommandés d'apport alimentaire en polyphénols établis ("Dietary Reference Intake") (**Watson, 2012**).

D'autre part, les structures diverses des composés phénoliques empêchent toute déclaration générale quant à leurs effets spécifiques sur la santé. De plus, certaines allégations concernant les effets potentiels sur la santé de certains aliments enrichis en polyphénols restent à prouver (**Halliwell, 2007**). Certains composés phytoestrogènes sont des polyphénols alimentaires ayant une affinité significative pour les récepteurs d'oestrogènes. Ces composés phytoestrogènes ont des effets positifs ou négatifs sur la santé des humains et du bétail (**Woclawek-Potocka *et al.*, 2013**).

Les informations sur les recherches en cours concernant les effets des polyphénols *in vitro* et *in vivo* sont limitées et vagues. Les principales raisons en sont les suivantes :

- L'absence de biomarqueurs validés *in vivo*, en particulier en termes de cancérogenèse ou d'inflammation.
- Les études à long terme n'ont pas prouvé ou démontré d'effets avec un mécanisme d'action, une efficacité ou une spécificité.
- L'application invalide de concentrations de test non physiologiques dans les études *in vitro*.

Ces applications sont ensuite sans pertinence pour la conception d'expériences *in vivo* (**Williamson et Manach, 2005**).

Chez les rats, des expériences ont montré que les polyphénols sont absorbés dans l'intestin grêle (**Carbonaro *et al.*, 2001**). Il a été suggéré que les polyphénols peuvent être liés à des complexes protéine-polyphénol modifiés par les enzymes de la microflore intestinale, ce qui permet la formation de composés dérivés par fission de cycle qui sont mieux absorbés (**Del Rio *et al.*, 2010**).

### 10. Facteurs de variabilité de polyphénols

#### 10.1. Facteurs externes

Le métabolisme phénolique est particulièrement sensible à l'action des facteurs externes comme la lumière, la température, les microorganismes pathogènes et les traitements appliqués par l'homme (**Dinelli *et al.*, 2006**).

##### 10.1.1. Lumière

La lumière agit de façon quantitative et qualitative et est corrélée à une augmentation des teneurs en composés phénoliques et plus particulièrement de flavonoïdes dans les tissus. L'activité de certaines enzymes de la voie de biosynthèse des polyphénols est stimulée par la lumière (**Hireche, 2013**).

##### 10.1.2. Température

La température peut modifier les teneurs en polyphénols chez les fruits pendant la phase de croissance, mais également après la récolte. Pour certains les plantes, un stress thermique semblerait apparaître à partir de 35°C, causant l'accumulation de composés phénoliques tels que les flavonoïdes et les acides hydroxy cinnamiques. En effet, un stress thermique provoqué par des températures froides (4°C) ou élevées entraîne une augmentation des activités PAL et CHS qui a pour conséquence d'augmenter les teneurs en composés phénoliques. En outre, l'oxydation des composés phénoliques par les polyphénols oxydases (PPO) et peroxydases (POD) est inhibée, ce qui maximise l'accumulation des polyphénols (**Hireche, 2013**).

---

## **Chapitre III : L'encapsulation**

---

### 1. Définition de l'encapsulation

L'encapsulation est une technologie qui consiste à enfermer un ingrédient actif dans un noyau entouré d'une matrice polymère pour créer une capsule. L'ingrédient actif doit avoir un effet bénéfique, et la matrice polymère est nécessaire pour le transport. La matrice polymère est composée de différents matériaux d'encapsulation (**Matiacevich et Sáez, 2018; Castromonte *et al.*, 2020**).

Les microcapsules peuvent prendre différentes formes selon le processus de microencapsulation utilisé, notamment des formes de réservoir, de réservoir vésiculaire, de matrice inclusive ou mixte. La forme de réservoir consiste en un noyau unique contenant le composé actif enveloppé dans une matrice polymère, tandis que la forme de réservoir vésiculaire contient plusieurs noyaux avec le composé actif également enveloppé dans une matrice polymère. La matrice inclusive est un mélange homogène du composé actif avec la matrice polymère, dont le rapport peut varier. La forme mixte est une combinaison de la matrice inclusive et d'une couche externe de matrice polymère. Les différentes morphologies peuvent être obtenues en variant les conditions du processus de microencapsulation (**López, 2012; Matiacevich et Sáez, 2018; Castromonte *et al.*, 2020**).

La microencapsulation est une technique très utile pour protéger les ingrédients actifs des facteurs environnementaux, améliorer leur manipulation et masquer les goûts ou les odeurs désagréables. De plus, la libération contrôlée du composé actif peut aider à améliorer son efficacité en le faisant agir au lieu souhaité (**Matiacevich et Sáez, 2018; Castromonte, 2020**).

Selon la taille des capsules ou particules générées, il existe trois types d'encapsulation : encapsulation, microencapsulation et nanoencapsulation. Chacun a des caractéristiques distinctes qui les différencient les uns des autres (**Prakash *et al.*, 2018; Assadpour et Jafari, 2019**).

### 2. L'objectif de l'encapsulation

En fonction des domaines et des applications, l'objectif de l'encapsulation est d'assurer la protection, la compatibilité et la stabilisation d'une substance active dans une formulation. Elle permet d'améliorer l'apparence d'un produit et de masquer les odeurs ou les goûts indésirables. De plus, l'encapsulation peut être utilisée pour modifier et contrôler le profil de libération d'une substance active, afin d'obtenir, par exemple, un effet prolongé ou déclenché (**Akdim, 2017**).

L'encapsulation présente un avantage considérable en ce qui concerne la modification des propriétés physiques du produit d'origine, dans le but de (**Desai et Park, 2005**) :

- Faciliter la manipulation.

## Chapitre III : L'encapsulation

---

- Aider à séparer les composants du mélange qui réagirait autrement entre eux.
- Fournir une concentration adéquate et une dispersion uniforme d'un agent actif.

Dans l'ensemble, l'encapsulation peut être perçue comme une méthode permettant de capturer un ou plusieurs objets à l'intérieur d'un matériau dans le but de :

- Son immobilisation.
- Sa protection.
- Le contrôle de sa libération.
- Sa structuration et Sa fonctionnalisation.

### 3. Les types de l'encapsulation

L'encapsulation se réfère à un processus par lequel une substance est confinée à l'intérieur d'une autre substance afin de former des particules avec un diamètre allant de quelques nanomètres à quelques millimètres. La substance confinée est connue sous le nom de matériau central, d'agent actif, de phase interne ou de charge utile, tandis que la substance utilisée pour l'enfermer est appelée revêtement, membrane, coque, matériau de transport, matériau de paroi, phase externe ou matrice (Zuidam et Nedovic, 2010).

Le matériau de revêtement joue un rôle essentiel en protégeant les ingrédients sensibles des réactions indésirables, tout en permettant une régulation précise de la libération de ces ingrédients (Bakowska-Barczak et Kolodziejczyk, 2011).

Selon la taille des particules produites, il existe plusieurs types d'encapsulation, tels que la nanoencapsulation, la microencapsulation et la macroencapsulation.

#### 3.1. Nano encapsulation

La nanoencapsulation se réfère à la création de films, de couches et de revêtements à l'échelle nanométrique dans le but de protéger les molécules ou les ingrédients alimentaires/aromatiques. Cette approche permet de former une barrière de protection de taille nanométrique de manière précise et ciblée. Les avancées dans les technologies de nanoencapsulation présentent des opportunités prometteuses pour relever les défis de l'industrie alimentaire, en particulier en ce qui concerne la distribution efficace des ingrédients fonctionnels bénéfiques pour la santé et la libération contrôlée des composés aromatiques. La nanoencapsulation permet de miniaturiser les substances en utilisant des techniques telles que la nanocomposite, la nanoémulsification et la nanostructuration, afin de créer un produit final. Elle joue un rôle crucial en tant que moyen de transport pour acheminer

## Chapitre III : L'encapsulation

---

spécifiquement l'ingrédient fonctionnel vers le site d'action souhaité, tout en fournissant une protection contre les processus de dégradation chimique ou biologique lors des étapes de traitement, de stockage et d'utilisation. De plus, il est impératif que ce système de distribution permette un contrôle précis de la libération de l'ingrédient fonctionnel. Il est également essentiel que le système de distribution soit en adéquation avec les caractéristiques physico-chimiques et qualitatives du produit final. Les systèmes de nanotransporteurs peuvent se baser sur des glucides, des protéines ou des lipides.

Parmi les différentes approches disponibles, la gélation ionique se distingue par son caractère doux, sa simplicité et son absence de solvants organiques, permettant ainsi de former des particules stables de dimensions nanométriques. Cette méthode repose sur l'interaction entre des polymères à charge positive, tels que la chitosane (Ch), et des polyanions, tels que le tripolyphosphate de pentasodium (TPP), ce qui entraîne la formation de liaisons croisées entre les molécules, à la fois à l'intérieur et entre les molécules. Cette formation de liaisons se produit sans nécessiter l'application de températures élevées ou l'utilisation de substances de réticulation toxiques (**Bratovic et Suljagic, 2019**).

### 3.2. Micro encapsulation

Les microcapsules sont des particules dont la taille varie de 1 µm à 1 000 µm et qui renferment un composé actif. Elles permettent une libération prolongée de ce composé, favorisant ainsi son efficacité dans les parties distales du tractus digestif. De plus, les microcapsules peuvent servir de bouclier protecteur pour les probiotiques, en les préservant des acides de l'estomac et en les acheminant jusqu'à l'intestin grêle où ils exercent leur action bénéfique (**Loyeau et al., 2018; Prakash et al., 2018; Timilsena et al., 2019; Vázquez-Maldonado et al., 2020**).

### 3.3. Macro encapsulation

Contrairement aux membranes spécifiquement développées pour l'encapsulation de cellules, les membranes couramment utilisées dans les études de macro-encapsulation sont fabriquées à partir de matériaux de filtration standard, conçus pour diverses applications de séparation sous pression. Ces matériaux ont été conçus pour fonctionner selon des processus convectifs, les rendant adaptés à une utilisation dans la macro-encapsulation. Les membranes standard, qu'elles soient sous forme de feuilles plates ou de fibres creuses, ont été conçues pour des séparations basées sur le tamisage et possèdent une épaisseur et une structure de paroi appropriées pour résister à des pressions transmembranaires élevées. Les propriétés fonctionnelles de ces matériaux sont généralement déterminées par leur porosité relative (**Uludag et al., 2000**).

### 4. Procédés d'encapsulation

Plusieurs approches peuvent être employées pour faciliter l'encapsulation des composés bioactifs. Le choix de la méthode d'encapsulation la plus appropriée dépend principalement du type de matériau de base utilisé et des caractéristiques souhaitées pour le produit final où l'encapsulation sera appliquée. En outre, la sélection du matériau constituant la paroi de la capsule exerce une influence majeure sur les propriétés de la substance encapsulée, en particulier sur l'efficacité de l'encapsulation, et nécessite une considération minutieuse (**Dias et al., 2017**).

Diverses classifications des procédés industriels d'encapsulation peuvent être établies en fonction de différents critères :

- L'utilisation ou non de solvant organique.
- La nature du milieu dispersant : liquide, gazeux ou à l'état supercritique.
- L'utilisation de polymères préformés, de lipides ou de monomères.
- Le procédé utilisé pour réaliser la microencapsulation.

Parmi les différentes approches de classification des procédés industriels d'encapsulation, celle qui distingue les procédés en trois groupes est la plus fréquemment utilisée (**Bile, 2015**) :

- Les procédés mécaniques :

Ces procédés se fondent sur le dessèchement ou la solidification de gouttelettes renfermant tous les constituants de la future particule.

- Les procédés chimiques :

Ces procédés se distinguent par une synthèse simultanée de la membrane (ou de la matrice) et de l'encapsulation du principe actif, sans recourir à des matrices enrobantes préexistantes.

- Les procédés physico-chimiques :

Ces procédés sont influencés par deux facteurs : 1) la solubilité des agents enrobants, qui peut varier en fonction des conditions physiques telles que la température, le pH, l'ajout d'un solvant non compatible ou d'un polymère incompatible, et 2) les changements d'état des agents enrobants, tels que la fusion et la solidification. (**Bile, 2015**).

### 5. Technique de l'encapsulation

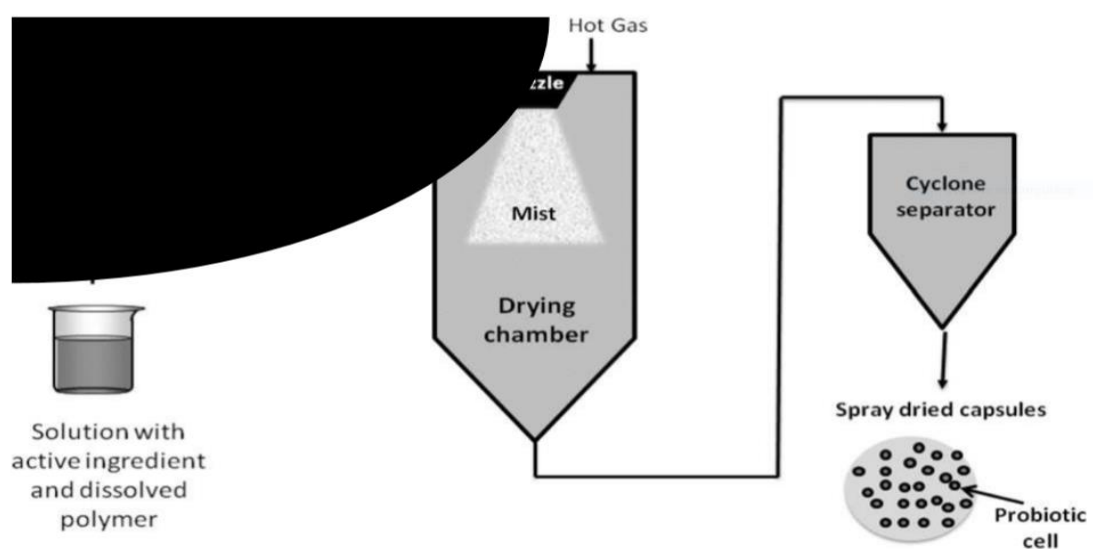
Les méthodologies d'encapsulation peuvent être classées en trois catégories principales : les processus physiques, physico-chimiques et chimiques. Les processus physiques englobent des

## Chapitre III : L'encapsulation

techniques telles que la pulvérisation-séchage, l'extrusion, la pulvérisation et l'utilisation de fluides supercritiques. Les processus physico-chimiques incluent la coacervation simple ou complexe et l'encapsulation dans des liposomes. Quant aux processus chimiques, ils comprennent la polymérisation interfaciale, l'inclusion moléculaire et l'évaporation du solvant. Pour développer un système d'encapsulation efficace, il est essentiel de prendre en compte la stabilité du noyau à encapsuler, les propriétés des matériaux d'encapsulation et l'adaptabilité du système de livraison à l'application finale (Augustin et Sanguansri, 2008).

### 5.1. La pulvérisation/séchage par atomisation

Le processus de pulvérisation-séchage est une méthode efficace pour obtenir des poudres sèches à partir d'un liquide. Les gouttelettes du liquide sont dispersées dans un gaz de séchage chaud, permettant l'évaporation du solvant et la formation de particules solides. Cette technique est largement employée dans l'industrie alimentaire pour réduire la teneur en eau des produits et assurer leur stabilité microbiologique. De plus, elle est utilisée couramment pour encapsuler des ingrédients alimentaires tels que les arômes, les lipides et les caroténoïdes (Gharsallaoui *et al.*, 2007). Le séchage par pulvérisation est une technique utilisée pour déshydrater efficacement les probiotiques et leur support en les pulvérisant dans un gaz de séchage. Cette méthode permet une évaporation rapide de l'eau, ce qui prépare les cellules à mieux résister à des conditions environnementales difficiles telles que des températures élevées, un environnement acide ou la présence de sels biliaries. En d'autres termes, cette technique renforce la robustesse des probiotiques en les préparant à des environnements hostiles (Figure 6).



**Figure 6.** Présentation schématique de la procédure de séchage par pulvérisation (Burgain *et al.*, 2011).

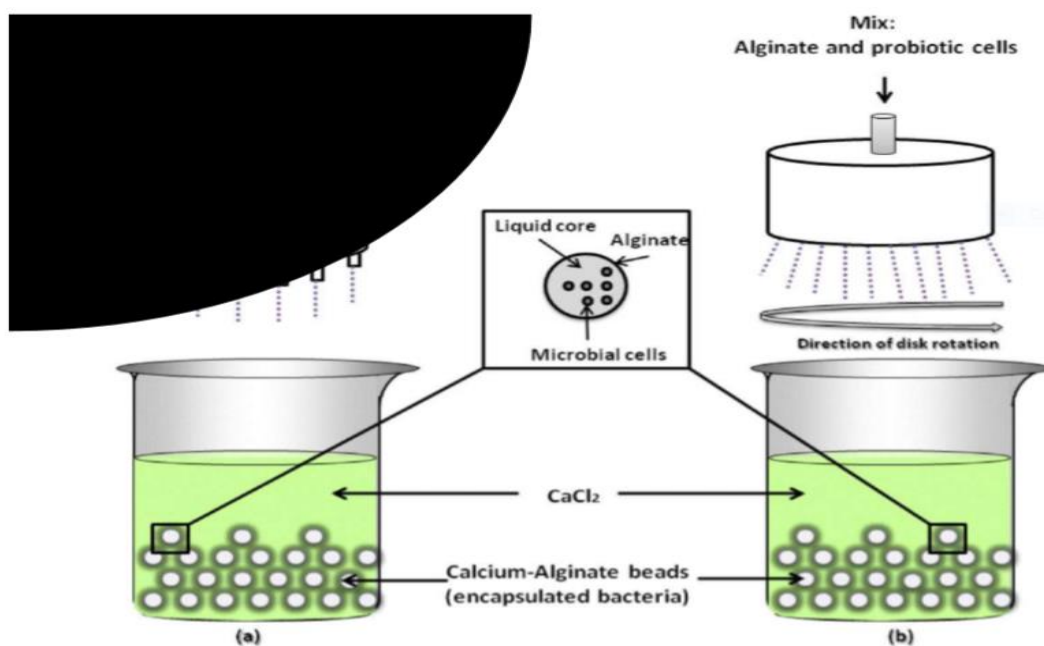
## Chapitre III : L'encapsulation

### 5.2. Le spray chilling ou spray-cooling

Le spray-chilling est une méthode de fabrication permettant d'enrober un agent actif avec des lipides. Elle implique la pulvérisation d'une dispersion de lipides en gouttelettes dans une chambre réfrigérée, où elles sont solidifiées pour former de fines particules. Cette technique est utilisée pour encapsuler des agents actifs qui sont solubles dans les lipides, ou qui se présentent sous forme de particules sèches ou d'émulsions aqueuses. Les particules obtenues peuvent être maintenues à basse température, adoptant une structure similaire à celle obtenue par granulation en lit fluidisé. La température de fusion des lipides utilisés se situe généralement entre 34 et 42°C pour le spray-chilling, tandis qu'elle est plus élevée pour le spray-cooling (Zuidam et Nedovic, 2010).

### 5.3. L'encapsulation par extrusion

L'extrusion est une méthode utilisée pour encapsuler des saveurs volatiles et instables dans des matrices de glucides vitreux, offrant ainsi une durée de conservation considérablement prolongée et une barrière pratiquement imperméable à l'oxygène. Des périodes de conservation allant jusqu'à 5 ans ont été signalées pour les huiles aromatiques extrudées, comparativement à environ un an pour les saveurs séchées par pulvérisation et quelques mois pour les huiles d'agrumes non encapsulées. L'extrusion offre une solution pratique pour l'encapsulation de saveurs dans ces matrices de glucides vitreux, garantissant leur stabilité et préservant leur qualité sur une longue période (Figure 7) (Zasytkin et Porzio, 2004).



**Figure 7.** Technologies d'extrusion : générateur de gouttelettes à aiguille simple qui est généralement entraîné par de l'air (a) et dispositif de disque de fixation (b) (Burgain *et al.*, 2011).

## Chapitre III : L'encapsulation

---

### 5.4. Le revêtement en lit fluidisé

Le revêtement par pulvérisation est une méthode de revêtement de poudre qui implique la suspension des particules dans un flux d'air à une température précise, puis la pulvérisation d'un matériau de revêtement sur ces particules. Le matériau de revêtement doit avoir une viscosité appropriée, être thermiquement stable et capable de former un film sur la surface des particules. Le débit d'air est ajusté pour assurer la circulation des particules, favoriser le séchage et prévenir l'agglomération. La composition du matériau de revêtement ainsi que les paramètres du processus sont contrôlés avec précision afin de garantir une qualité de revêtement uniforme sur l'ensemble des particules (Zuidam et Nedovic, 2010).

### 5.5. L'inclusion complexe

La méthode de complexation inclut l'encapsulation d'une molécule (ligand) à l'intérieur d'une cavité d'un autre matériau (substrat) par le biais d'interactions chimiques spécifiques. Cette approche est fréquemment employée pour encapsuler des molécules volatiles telles que les huiles essentielles et les vitamines, dans le but de masquer les odeurs et les saveurs indésirables et de préserver les arômes. Les  $\beta$ -cyclodextrines et la  $\beta$ -lactoglobuline sont des exemples couramment utilisés de matériaux qui permettent cette méthode d'encapsulation (Bratovic et Suljagic, 2019).

### 5.6. La coacervation

La coacervation est un processus de formation de capsules qui exploite les propriétés colloïdales pour encapsuler des liquides et des solides. Cette méthode consiste à modifier les caractéristiques physico-chimiques du milieu, telles que la température, le pH et la polarité. Bien que cette technique soit simple et peu coûteuse, elle est limitée à des conditions spécifiques. La coacervation peut être réalisée en utilisant une solution colloïdale unique, ce qui est connu sous le nom de coacervation simple, ou en combinant deux ou plusieurs solutés colloïdaux, ce qui est appelé coacervation complexe. Dans le domaine pharmaceutique, la gélatine et les dérivés de cellulose sont les polymères les plus fréquemment utilisés dans la coacervation simple (Bratovic et Suljagic, 2019).

### 6. L'encapsulation dans des cellules de levures

#### 6.1. Levure

##### 6.1.1. Morphologie

*S. cerevisiae* est une cellule qui présente une morphologie variable, pouvant adopter une forme sphérique, ovoïde ou arrondie, avec une taille pouvant varier de 3 à 14  $\mu\text{m}$  en fonction de la composition nutritive de son environnement (Figure 8).

Tandis que certaines cellules sont cylindriques et de grandes tailles jusqu' à 20  $\mu\text{m}$  de longueur ou plus (Dimmer *et al.*, 2002).



Figure 8. Micrographie de *S. cerevisiae* (Bernstein et Bernstein, 2019).

##### 6.1.2. Classification

La classification de la levure *S. cerevisiae* selon (Nguyen, 2016), est la suivante :

- **Règne** : Fungi
- **Division** : Ascomycota
- **Sous-division** : Saccharomycotina
- **Classe** : Saccharomycets
- **Ordre** : Saccharomycetales
- **Famille** : Saccharomycetaceae
- **Genre** : *Sacharomyce*
- **Espèce** : *Saccharomyces cerevisiae*

## Chapitre III : L'encapsulation

---

### 6.1.3. Métabolisme

Selon Nguyen (2016), *Saccharomyces cerevisiae* présente une capacité de survie dans deux environnements distincts, à savoir l'environnement aérobie et l'environnement anaérobie.

### 6.2. Prétraitements avant l'encapsulation de la levure

Avant l'encapsulation de la levure, il a été observé dans des études précédentes que l'application d'un prétraitement chimique sur les cellules de levure permettant de vider leur contenu présente un intérêt pour accroître la charge en matériaux centraux, ce qui se traduit par une amélioration du rendement de l'encapsulation. Parmi les techniques les plus couramment employées à cet effet figurent l'autolyse, la plasmolyse et l'hydrolyse enzymatique (Tangler et Erten, 2008).

#### 6.2.1. Autolyse

L'autolyse désigne le processus par lequel les enzymes hydrolytiques endogènes de la cellule libèrent des composés cytoplasmiques (Alexandre et Guilloux-Benatier, 2006). Dans l'industrie alimentaire, l'autolyse est couramment employée, réalisée généralement à une température de 50°C et à un pH d'environ 5,5 (Alexandre et Guilloux-Benatier, 2006). Selon Czerniak *et al* l'efficacité d'encapsulation (EE) a été significativement améliorée suite à l'autolyse des échantillons. L'ajout d'acétate d'éthyle et l'hydrolyse avec l'enzyme lytique de levure, Glucanex R200, ont augmenté l'EE de 32,6 % (pour l'échantillon témoin, sans autolyse) à 45,3 %. L'acétate d'éthyle a renforcé la perméabilité de la membrane cellulaire, tandis que le Glucanex R200 a réalisé une hydrolyse partielle de la paroi cellulaire (Czerniak *et al.*, 2015). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Shi *et al* où une augmentation d'environ 50 % de l'efficacité d'encapsulation a été observée en réalisant une plasmolyse préalable avant le processus d'encapsulation (Shi *et al.*, 2007). Dans leur étude portant sur l'encapsulation d'huile essentielle d'origan dans des cellules de levure *S. cerevisiae*, les chercheurs ont observé une augmentation significative de la diffusion efficace et une amélioration considérable de la perméabilité des parois cellulaires chez les cellules de levure prétraitées par autolyse (Dimopoulos *et al.*, 2021).

#### 6.2.2. Plasmolysis

La plasmolyse en microencapsulation est une méthode de prétraitement qui vise à éliminer l'eau et les composants hydrosolubles de la cellule, tels que les protéines, les acides nucléiques, les saccharides et les enzymes. Cela permet d'augmenter la capacité de chargement du matériau central en créant plus d'espace (Korber *et al.*, 1996). De nombreux composés ont été utilisés pour la plasmolyse, tels que certains enzymes (comme l'adénylate kinase et la pyruvate kinase), le saccharose,

### Chapitre III : L'encapsulation

---

le NaCl, le glycérol et certains solvants organiques tels que l'acétone et l'acétate d'éthyle (**Paramera et al., 2011**). L'encapsulation de l'acide chlorogénique hydrosoluble a connu une augmentation significative, passant de 6,2% à 12,6%, grâce à l'utilisation de souches de levure plasmolysées. La plasmolyse a été réalisée en utilisant une solution de NaCl à 5% à une température de 54°C et un taux d'agitation de 150 tr/min pendant 24 heures. Ces résultats concordent avec le brevet déposé par les laboratoires Serozym (1973), qui démontre que le prétraitement des cellules de levure par plasmolyse favorise l'absorption des arômes (**Shi et al., 2007; Nakhaee et al., 2019**). Des cellules de levure plasmolysées ont été employées pour envelopper l'huile extraite des graines de pourpier, ce qui a entraîné une amélioration de l'efficacité d'encapsulation (EE) de 52,96% à 60,27% et une augmentation de la capacité de chargement de 186,87 à 211,68 g kg<sup>-1</sup> en comparaison avec les cellules non plasmolysées. Les cellules de levure ont subi une plasmolyse en étant soumises à une solution de NaCl à 10% à une température de 55°C, avec une agitation à 150 tr/min pendant une durée de 48 heures (**Kavosi et al., 2018**). Une étude comparative des différentes méthodes de prétraitement (autolyse, plasmolyse et hydrolyse enzymatique) a montré que la plasmolyse était la méthode la plus efficace pour obtenir un extrait de levure de haute qualité en termes de teneur (**Takalloo et al., 2020**).

En revanche, l'étude menée par **Paramera et al.**, a révélé l'absence d'effet de la plasmolyse avec du NaCl sur la quantité de curcumine encapsulée dans les cellules de levure. Il a été observé que la curcumine était intriquée à l'intérieur des cellules de levure par le biais d'interactions et de liaisons spécifiques avec la membrane et la paroi cellulaire de la levure. Par conséquent, l'épuisement cellulaire s'est avéré peu efficace pour accroître la charge et l'efficacité du processus (**Paramera et al., 2011**). Les composés de curcumine et de fisétine ont été encapsulés à l'intérieur des cellules de levure et de leur paroi cellulaire en utilisant une méthode d'infusion sous vide. Cette approche a permis de surmonter les limitations inhérentes au processus d'encapsulation. Après avoir optimisé cette méthode et appliqué l'infusion sous vide, les résultats ont révélé que la charge en curcumine était trois fois supérieure et celle en fisétine deux fois supérieure par rapport à la méthode conventionnelle. Les chercheurs ont également observé que la plasmolyse entraînait une réduction de la charge, tandis que la présence d'organites cytoplasmiques au sein des cellules de levure favorisait une augmentation de la charge en renforçant les interactions entre le cœur encapsulé et les organites (**Young et al., 2020**).

Différents prétraitements, tels que les ultrasons, les champs électriques pulsés et l'homogénéisation à haute pression, ont été étudiés pour la microencapsulation des levures. L'étude de **Pham-Hoang et al.**, s'est focalisée sur le chargement du  $\beta$ -carotène dans les cellules de levure (*Y. lipolytica*) en utilisant deux méthodes : l'utilisation d'un solvant et l'utilisation des ultrasons.

### Chapitre III : L'encapsulation

---

Les résultats ont révélé que l'utilisation des ultrasons conduisait à un rendement d'encapsulation quatre fois supérieur à celui obtenu avec la méthode utilisant un solvant. De plus, il a été observé que l'augmentation de la concentration de  $\beta$ -carotène dans le chloroforme augmentait son adhérence à la paroi de la levure, limitant ainsi sa pénétration à l'intérieur des cellules. Par conséquent, l'application des ultrasons pendant 6 minutes à 50 % a amélioré l'encapsulation du  $\beta$ -carotène dans les cellules de levure (**Pham-Hoang *et al.*, 2018**).

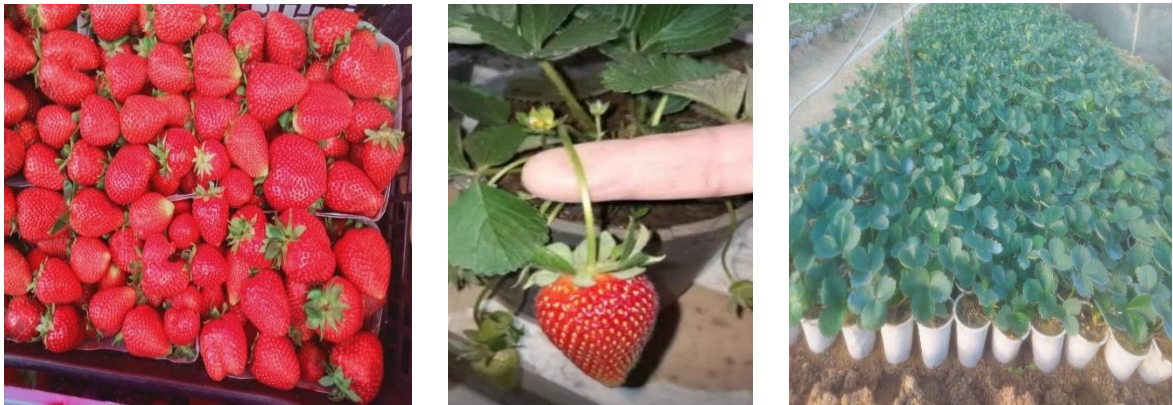
---

## **Chapitre IV : Matériel et méthode**

---

### 1. Matériau végétal

Les fruits de *Fragaria x ananassa* ont été choisis comme matériau végétal pour notre étude. Nous avons récolté ces fruits dans la région de Jijel (Jamaa Ben Hbib) le 20 février 2023. Avant l'extraction par macération (figure 9), nous avons procédé au nettoyage des fruits et nous avons veillé à ne sélectionner que ceux qui étaient suffisamment mûrs. Des prétraitements tels que l'équeutage et le découpage sont nécessaires avant d'effectuer l'extraction.



**Figure 9.** Fruits des fraises *Fragaria x ananassa* D. (Originale, 2023)

### 2. Extraction des composés phénoliques

La macération est une méthode d'extraction solide-liquide utilisée couramment, qui implique de mettre en contact un solide avec un solvant. Cette procédure permet d'extraire certains principes actifs ou nutriments du matériau solide, avec ou sans agitation (**Abidin et al., 2013**).

L'extraction de l'extrait phénolique à partir des fruits de fraise a été réalisée en suivant le protocole décrit par **Saini et al. (2019)** avec quelques modifications. Un échantillon de 1 kg de fruits frais a été soigneusement sélectionné et préparé. Les fraises ont été méticuleusement nettoyées pour éliminer toute contamination externe, puis équeutées et découpées en petits morceaux afin de faciliter le processus d'extraction.

Le processus d'extraction a débuté par une macération des morceaux de fraises dans un solvant d'éthanol à 96%. Cette macération a été effectuée pendant 24 heures à température ambiante, en préservant les échantillons de la lumière pour prévenir toute altération photochimique. L'utilisation d'un agitateur magnétique a assuré une agitation homogène du mélange pendant toute la durée de la macération. Après la macération, le mélange a été soumis à une filtration pour séparer le liquide (filtrat), des résidus solides indésirables. Par la suite, le solvant a été évaporé à l'aide d'un évaporateur

## Chapitre IV : Matériel et méthode

---

rotatif réglé à une température de 60°C. Cette étape d'évaporation a permis de concentrer les composés phénoliques extraits des fraises, en éliminant le solvant de manière contrôlée. Une fois le processus d'évaporation achevé, les extraits concentrés ont été récupérés et soumis à un processus de séchage dans une étuve maintenue à une température constante de 42°C.

### 3. Encapsulation des composés phénoliques dans les souches de levure *Saccharomyces cerevisiae*

#### 3.1. Culture de la souche de levure *Saccharomyces cerevisiae*

La souche de *Saccharomyces cerevisiae* a été utilisée. Les cellules de levure ont été cultivées sur des boîtes de Petri contenant un milieu sabouraud pendant 48 heures à une température de 27 °C. Ensuite, ces cellules ont été utilisées pour ensemercer le milieu liquide de bouillon nutritif à une densité optique de 0,2 (DO 600) et cultivées à une température de 27 °C avec une agitation de 140 tours par minute. Les cellules ont été récoltées pendant la phase de croissance logarithmique moyenne et ont été lavées trois fois avec de l'eau physiologique stérile (pH2O) en utilisant une centrifugation à 4000 tours par minute pendant 10 minutes (Nguyen *et al.*, 2018).

#### 3.2. Plasmolyse des souches de levures

40 grammes de levure ont été dissous dans 500 mL d'une solution de NaCl à 10%. Le mélange a été soumis à une plasmolyse pendant 24 heures à une température de 55°C. Ensuite, la levure a été séparée par centrifugation à une force de 2000g pendant 10 minutes. Le culot obtenu a été lavé avec de l'eau distillée et agité à température ambiante pendant 1 heure pour éliminer le NaCl, suivi d'une nouvelle centrifugation. Ce processus de lavage a été répété deux fois. Enfin, les cellules de levure ont été lyophilisées (Kurek *et al.*, 2023).

#### 3.3. Microencapsulation des composés phénoliques

L'encapsulation des extraits phénoliques dans les cellules de levure, qu'elles soient intactes ou plasmolysées, a été effectuée dans un milieu aqueux en respectant un rapport de 5:1 en masse entre la levure (intacte ou plasmolysée) et l'extrait. Un hydromodule de 1:100 a été utilisé. L'encapsulation a été réalisée dans un agitateur thermostatiquement contrôlé à 200 tours par minute, en maintenant une température constante de 37 °C pendant 24 heures. Ensuite, l'efficacité de l'encapsulation a été mesurée (Kalinina *et al.*, 2022).

## Chapitre IV : Matériel et méthode

---

### 3.4. Efficacité d'encapsulation

Le calcul de l'efficacité d'encapsulation permet de déterminer la capacité des microcapsules à encapsuler les polyphénols en mesurant le pourcentage de polyphénols encapsulés par rapport au taux initial avant l'encapsulation. Pour extraire les polyphénols totaux encapsulés, une quantité de 0,2 g de poudre a été combinée avec 2 mL d'un mélange solvant composé de méthanol, d'acide acétique et d'eau (50:8:42, v/v/v). Le mélange a été agité pendant 30 minutes pour procéder à l'extraction. Après l'extraction, le mélange a été centrifugé à une vitesse de 3000 tours par minute pendant 10 minutes afin de séparer les particules solides. La quantité de polyphénols totaux, de flavonoïdes et de tanins a ensuite été déterminée à l'aide de méthodes spectrophotométriques (**Robert *et al.*, 2010**).

La formule suivante permet de calculer la capacité d'encapsulation en utilisant le rapport entre la surface et les polyphénols totaux :

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

**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**).

### 4. Dosage des polyphénols totaux

La méthode de mesure des polyphénols totaux repose sur l'utilisation du réactif Folin-Ciocalteu, qui est composé d'acide phosphotungstique et d'acide phosphomolybdique. Lorsque les phénols sont oxydés, le réactif est réduit en un mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène, produisant une coloration dont l'absorption maximale se situe entre 725 et 750 nm. Cette coloration est proportionnelle à la quantité de polyphénols présents dans les extraits végétaux. Le dosage des polyphénols dans les extraits des fraises avant et après microencapsulation a été effectuée par la méthode de **Waterhouse (1999)**. Cette méthode consiste à mélanger 2 ml de l'extrait avec 0,2 ml de réactif Folin-Ciocalteu et 1,4 ml de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> à 7,5% (m/v), puis à incuber le mélange à l'obscurité et à température ambiante pendant 2 heures. La lecture des absorbances est ensuite effectuée à 760 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-1800 (Shimadzu). Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalent acide gallique par gramme d'extrait sec, en se référant à une courbe d'étalonnage de l'acide gallique établie avec 6 valeurs de concentrations allant de 0 à 1 mg/ml.

### 5. Dosage des flavonoïdes

La méthode employée pour évaluer la quantité de flavonoïdes repose sur une technique décrite par **Chang *et al.* (2002)** avec quelques modifications. La méthode de quantification des flavonoïdes repose sur la formation d'un complexe extrêmement stable entre les atomes d'oxygène situés sur les carbones 4 et 5 des flavonoïdes et le chlorure d'aluminium, donnant lieu à une coloration jaune qui absorbe dans le visible à 415 nm. Pour évaluer la quantité de flavonoïdes dans les extraits des fraises encapsulés et non encapsulés, 0,2 ml de chaque échantillon sont mélangés à 1,72 ml d'éthanol à 96%, 0,4 ml de chlorure d'aluminium à 10%, et 1 ml d'acétate de sodium 1M. Le mélange est agité et incubé dans l'obscurité à température ambiante pendant 30 minutes, puis la lecture de l'absorbance est effectuée à 415 nm à l'aide d'un spectrophotomètre UV-1800 (Shimadzu). Les résultats sont exprimés en mg équivalent de quercétine par gramme d'extrait sec, en se basant sur une courbe d'étalonnage de la quercétine.

### 6. Dosage des tanins

La quantification des tanins des extraits de fraises avant et après encapsulation a été réalisée en utilisant la méthode de la réaction vanilline, telle que décrite par **Price *et al.* (1978)**. Pour cela, un milieu réactionnel de 6 mL a été préparé en mélangeant 1 mL d'échantillon, 2,5 mL de réactif A (solution de vanilline à 1% p/v dans le méthanol) et 2,5 mL de réactif B (solution d'HCl ou d'H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> à 9N dans le méthanol). La réaction a été effectuée à une température de 30°C pendant 15 minutes, avant de mesurer l'absorbance à une longueur d'onde de 500 nm (A500) à l'aide d'un spectrophotomètre UV-1800 (Shimadzu). Les résultats obtenus ont été exprimés en mg équivalent d'acide tannique par gramme d'extrait sec, en se référant à une courbe d'étalonnage d'acide tannique.

### 7. Analyse par Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) en Réflexion Totale Atténuée (ATR) des Extraits de *Fragaria x ananassa* Avant et Après encapsulation

L'objectif de l'analyse FTIR était d'étudier les variations spectrales des extraits phénoliques non encapsulés, des levures, ainsi que des extraits encapsulés dans des cellules de levure intactes et plasmolysées.

Cet analyse a été réalisée à l'aide d'un spectromètre FTIR Cary-600 équipé d'un accessoire ATR (MIRacle™ ATR à une réflexion simple) et d'un élément de réflexion interne en diamant (IRE) de PIKE Technologies. Les spectres ont été enregistrés en moyennant 32 scans entre 4000 et 400 cm<sup>-1</sup>, avec une résolution de 4 cm<sup>-1</sup>. Pour chaque d'échantillon, les spectres de fond ont été soustraits à

## Chapitre IV : Matériel et méthode

---

l'aide du logiciel Resolution Pro version 5.0 (Agilent Technologies). Ensuite, les spectres ont été lissés en utilisant l'algorithme de Savitsky-Golay avec une fenêtre de 11 points. Enfin, une correction de base a été appliquée aux spectres en utilisant le filtre de Savitzky-Golay : deuxième dérivée avec une fenêtre de six points, suivie d'une normalisation vectorielle (Sala *et al.*, 2020). Ces étapes d'analyse ont permis d'obtenir des informations sur la composition chimique et les interactions moléculaires des échantillons étudiés.

### 8. Méthode DPPH

L'activité antioxydante a été évaluée par le test de DPPH (2,2-diphényl-1-picrylhydrazyle) par la méthode de Blois (1958). Ce test repose sur la réduction d'une solution alcoolique du radical DPPH • en présence d'un antioxydant donneur d'hydrogène (AH), formant une forme non radicalaire, DPPH-H. La solution colorée en pourpre foncé due à la présence de radicaux DPPH • est caractérisée par une forte absorption à 517 nm. Cependant, l'ajout d'un agent antioxydant entraîne une décoloration de la solution, ce qui modifie la colorimétrie de la solution.

Pour effectuer le test de DPPH, une solution de DPPH est préparée en dissolvant 3,94 mg de DPPH dans 100 mL d'éthanol pour obtenir une concentration de 0,01 mM. Ensuite, 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 à tester (0-1 mg/mL), suivis d'une incubation 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 pour évaluer l'activité antioxydant.

Le taux d'inhibition de DPPH a été calculé en utilisant la formule suivante:

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

Après cela, la courbe de réponse-dose pour le pourcentage d'inhibition de DPPH en fonction de la concentration de l'échantillon a été établie afin de calculer l'IC50. L'IC50 correspond à la concentration d'échantillon nécessaire pour réduire de moitié la quantité initiale de DPPH présente, et elle a été obtenue par interpolation des données de la courbe dose-réponse.

### 9. Méthode ABTS

La méthode de l'ABTS (acide 2,2'-azinobis (3-éthylbenzothiazoline)-6-sulfonique) repose sur la capacité des composés à neutraliser le radical-cation ABTS•+ formé par l'oxydation de l'ABTS

## Chapitre IV : Matériel et méthode

---

initialement incolore en présence de persulfate de potassium  $K_2S_2O_8$ . Ce radical cationique est de couleur bleu verdâtre. La réaction se déroule en deux étapes : lors de la première étape, un électron est arraché à un atome d'azote de l'ABTS pour former le radical  $ABTS^{\bullet+}$ . Dans la deuxième étape, en présence d'un antioxydant donneur de  $H^+$ , le radical d'azote concerné piège un  $H^+$  pour former l' $ABTSH^+$ . Cette réaction entraîne la décoloration de la solution (**Re et al., 1999**).

Pour préparer la solution d'ABTS, 19,2 mg d'ABTS et 3,3 mg de  $K_2S_2O_8$  sont mélangés avec 5 ml d'eau pour obtenir une solution mère. Cette solution est incubée dans l'obscurité à température ambiante pendant 16 heures. La solution d' $ABTS^+$  est préparée en diluant la solution mère avec de l'eau jusqu'à ce que son absorbance atteigne environ 0,7 à 1 à une longueur d'onde de 734 nm (**Re et al., 1999**).

Pour chaque échantillon, des volumes de 1 mL des différentes concentrations (0-1 mg/mL) des extraits de plante digérés et non digérés ont été prélevés et mélangés avec 160  $\mu$ L de la solution d'ABTS. Les tubes ont ensuite été incubés dans l'obscurité pendant 30 minutes. Les absorbances ont été mesurées à une longueur d'onde de 734 nm.

La formule suivante a été utilisée pour calculer l'activité antioxydant :

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

Pour déterminer l'index IC50, les pourcentages d'inhibition du radical ABTS ont été représentés en fonction des concentrations d'extrait.

### 10. 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 OriginLab9.6 (OriginLab Corporation. (2019). OriginPro 2019 SR1 (version 9.61.0000). Northampton, MA, USA).

---

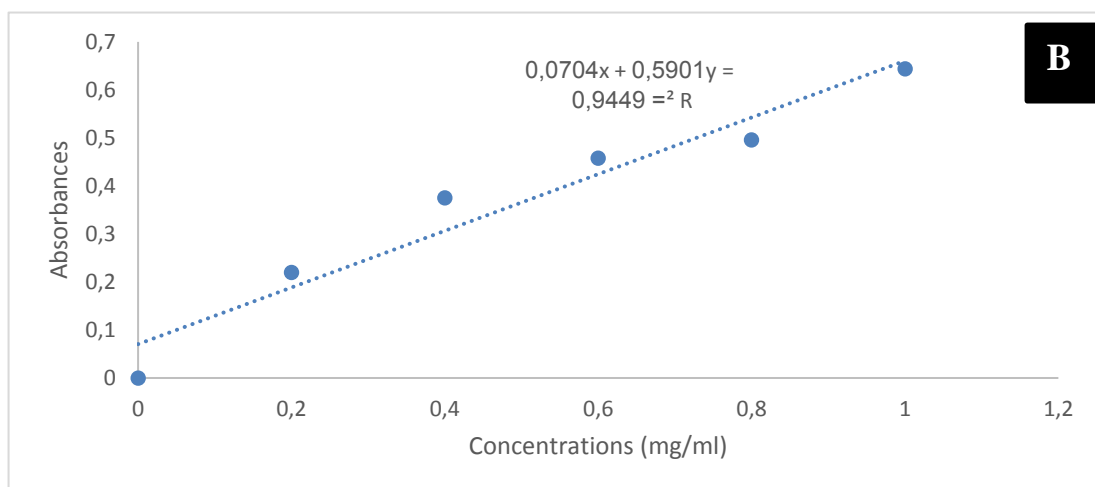
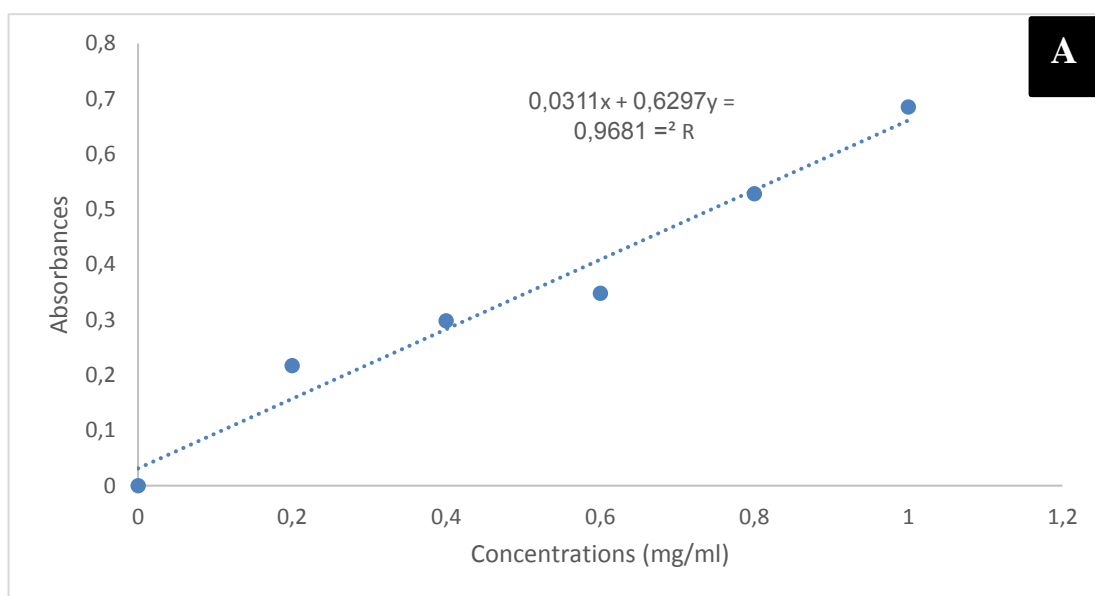
## **Chapitre V : Résultats et discussion**

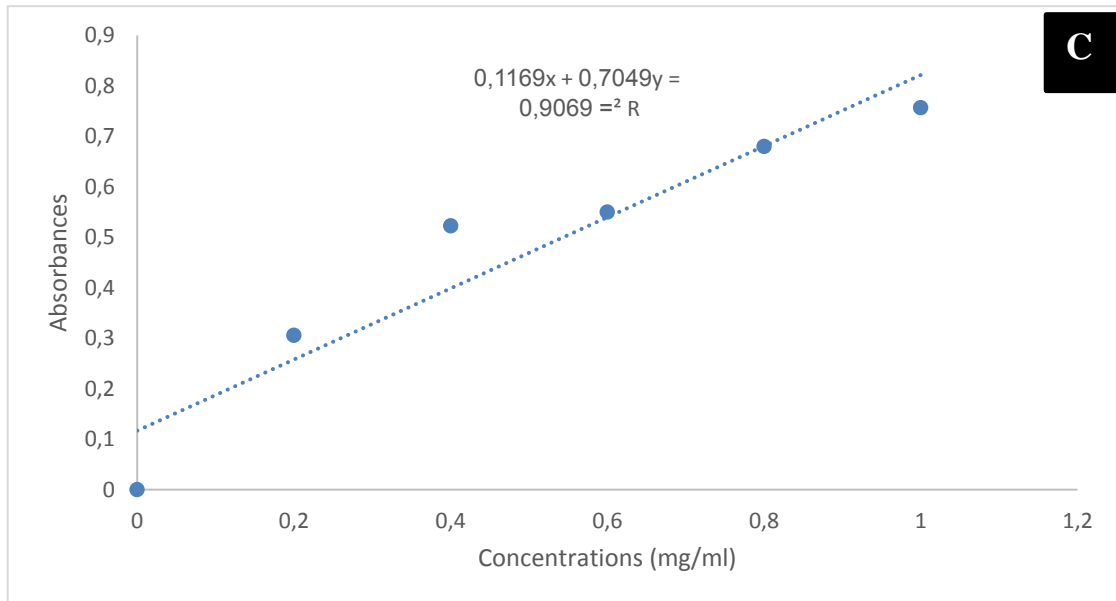
---

### 1. Teneurs en composés phénolique de la fraise

#### 1.1. Les courbes d'étalonnage

Les teneurs en polyphénols totaux, de flavonoïdes et de tanins ont été déterminées en utilisant des courbes d'étalonnage de l'acide gallique, de la quercétine et de l'acide tannique respectivement. Les résultats sont exprimés en milligrammes d'équivalent acide gallique par gramme de l'extrait sec (mg EAG/g ES) pour les polyphénols totaux, en milligrammes d'équivalent quercétine par gramme de matière sèche (mg EQ/g ES) pour les flavonoïdes, et en milligrammes d'équivalent d'acide tannique par gramme de matière sèche (mg EAT/g ES) pour les tanins (figure 10).

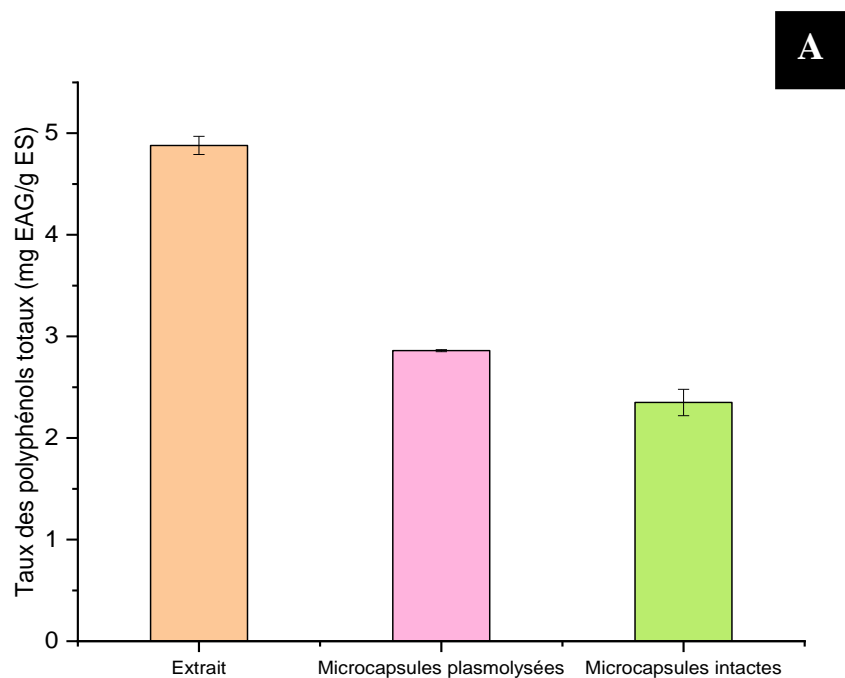


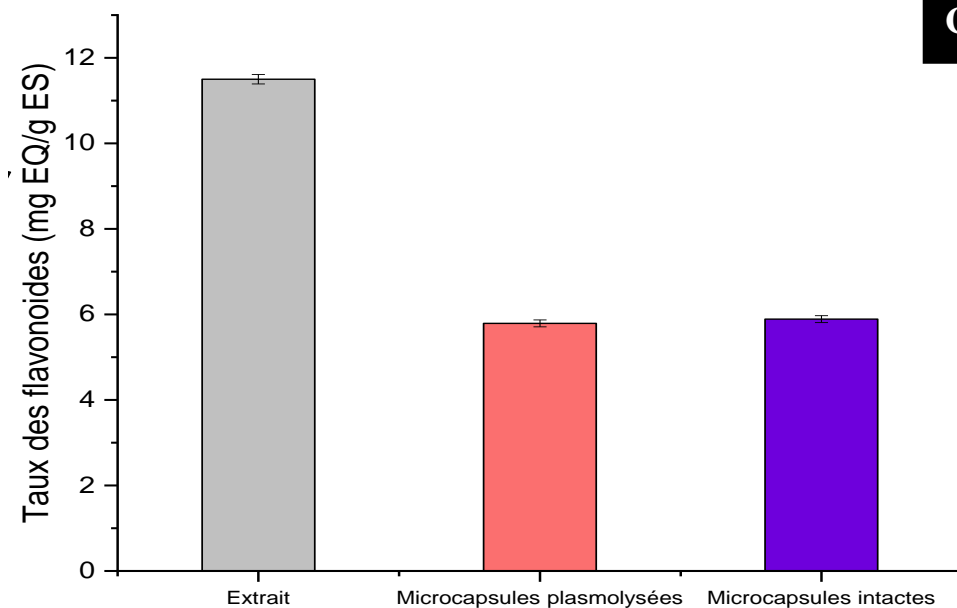
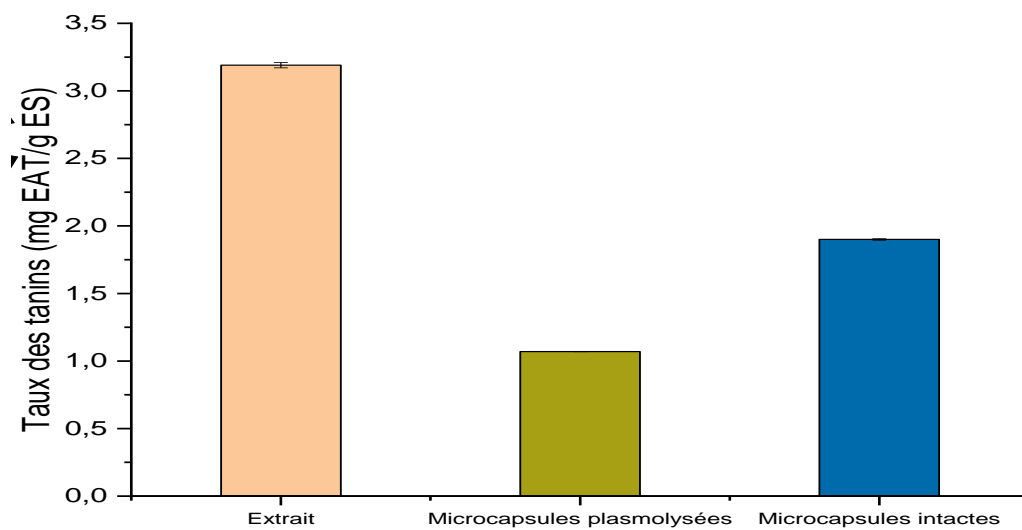


**Figure 10.** Courbes d'étalonnage : A : Acide gallique, B : Quercétine, C : Acide tannique

### 1.2. Effet de l'encapsulation sur la teneur en composés phénoliques

Les teneurs en polyphénols totaux, flavonoïdes et tanins avant et après l'encapsulation sont représentées graphiquement dans la figure 11.





**Figure 11.** Diagramme de teneur de composés phénoliques : A : polyphénols totaux ; B : flavonoïdes ; C : tanins.

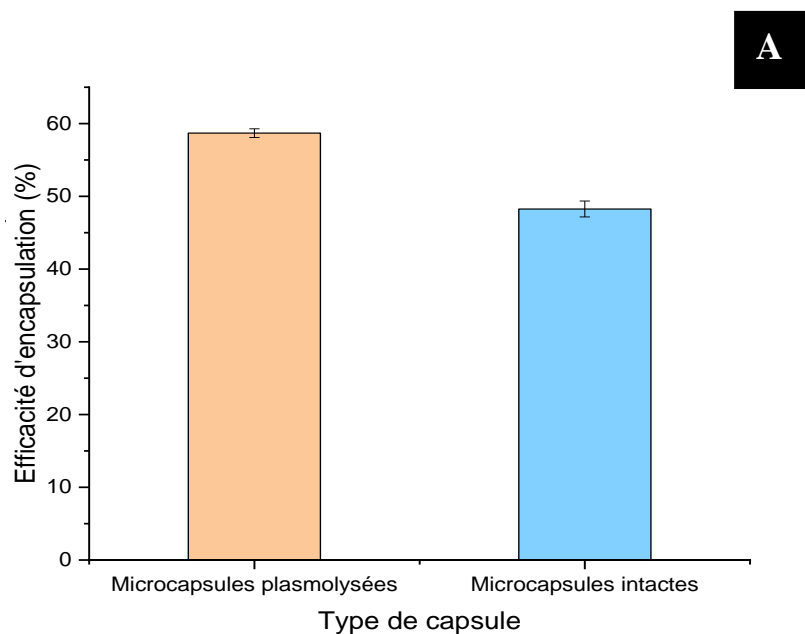
Les résultats de l'analyse ANOVA confirment de manière concluante que l'encapsulation induit une réduction significative de la concentration des composés phénoliques (les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tanins). Cependant, des observations notables révèlent une conservation nettement plus élevée des polyphénols totaux dans les cellules plasmolysées ( $2,86 \pm 0,01$  mg EAG/g ES) par rapport aux cellules intactes ( $2,35 \pm 0,13$  mg EAG/g ES). En revanche, les cellules intactes présentent

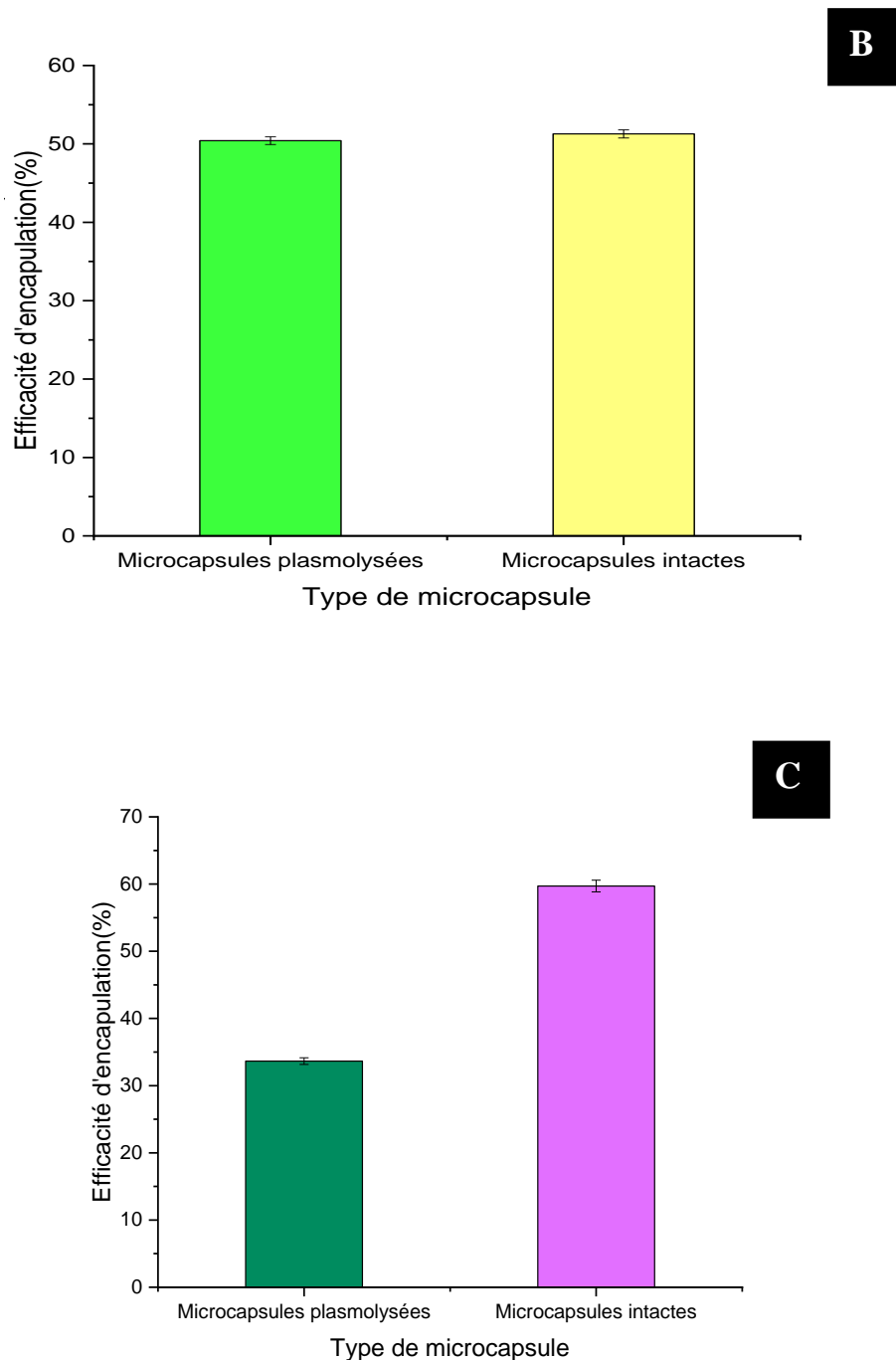
## Chapitre V : Résultats et discussion

---

une rétention supérieure de flavonoïdes ( $5,89 \pm 0,08$  mg EQ/g ES) par rapport aux cellules plasmolysées ( $5,79 \pm 0,08$  mg EQ/g ES). En ce qui concerne les tanins, une préservation plus élevée est exclusivement observée dans les cellules intactes ( $1,90 \pm 0,005$  mg EAT/g ES) par rapport aux cellules plasmolysées ( $1,07 \pm 0,001$  mg EAT/g ES). Malgré cette conservation remarquable, il est important de souligner que l'encapsulation entraîne une diminution globale de la teneur en polyphénols. Par conséquent, ces observations fournissent des preuves solides de l'impact négatif de l'encapsulation sur la quantité globale des composés phénoliques, englobant les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tanins.

Afin de renforcer ces résultats, nous avons également calculé l'efficacité de l'encapsulation, dont les données obtenues sont représentées visuellement dans la figure 12.





**Figure 12.** Diagramme d'efficacité de l'encapsulation en composés phénoliques :

A : polyphénols totaux ; B : flavonoïdes ; C : tanins.

L'analyse ANOVA révèle une différence significative ( $p < 0.05$ ) dans l'efficacité d'encapsulation entre les deux types de microcapsules testées, à savoir les capsules plasmolysées et les capsules intactes. Les résultats indiquent clairement une nette supériorité des cellules plasmolysées en termes d'encapsulation des polyphénols totaux, avec un taux d'efficacité mesuré à  $58,69 \pm 0,01\%$ . En comparaison, les cellules intactes présentent une efficacité inférieure de

## Chapitre V : Résultats et discussion

---

48,26±0,13%. En ce qui concerne les flavonoïdes, on observe une tendance inverse, avec une efficacité d'encapsulation plus élevée de 51,28±0,08% pour les cellules intactes, tandis que les cellules plasmolysées affichent une efficacité inférieure de 50,49±0,08%. Quant aux tanins, les cellules intactes se distinguent également avec une efficacité d'encapsulation de 59,71±0,005%, tandis que les cellules plasmolysées présentent une efficacité inférieure de 33,65±0,001%.

### Discussion

La teneur en polyphénols, flavonoïdes et tanins de l'extrait non encapsulé des fraises a été mesurée à 4,88±0,09 mg EAG/g ES, 11,5±0,11 mg EQ/g ES et 3,19±0,02 mg EAT/g ES respectivement. Ces résultats diffèrent des valeurs rapportées par **Nowicka et al. (2019)** pour les cinq variétés, qui ont obtenu des valeurs de 115,22 mg/100g, 118,42 mg/100g, 119,51 mg/100g, 120,98 mg/100g et 119,51 mg/100g respectivement. De même, notre résultat pour la teneur en flavonoïdes diffère de celui rapporté par **Dai et al. (2020)**, qui ont obtenu une valeur de 0,73±0,13 mg CE/g. De plus, notre résultat diffère de celui obtenu par **Dai et al. (2020)** pour la teneur en tanins, qui a été mesurée à 2,34±0,043 mg CE/g. Cette différence de résultats peut être attribuée à divers facteurs intrinsèques tels que la génétique des fraises, ainsi qu'à des facteurs extrinsèques tels que les conditions climatiques, le stade de maturité à la récolte et les conditions de stockage. De plus, les différences peuvent être influencées par le moment et la saison de la récolte, les conditions climatiques, les méthodes d'extraction et les protocoles de dosage. Il est également important de noter que la teneur en composés phénoliques peut varier en fonction de la méthode d'extraction utilisée. **Rahmani (2020)** souligne que la solubilité des composés phénoliques est influencée par leur degré de polymérisation, qui est lié à la distribution des métabolites secondaires, à l'interaction avec les autres constituants présents et au type de solvant utilisé.

Le traitement de plasmolyse des levures a amélioré la rétention des polyphénols totaux des fraises par rapport aux levures intactes, ce qui est en accord avec les résultats de **Bishop et al. (1998)** qui ont démontré qu'un traitement de plasmolyse permettait d'augmenter le rendement d'encapsulation de deux fois par rapport à l'échantillon non traité. Des études telles que celle de **Shi et al. (2007)** ont montré que le traitement de plasmolyse avec du NaCl (5% p/v) augmentait l'efficacité d'encapsulation de l'acide chlorogénique par les cellules de levure, atteignant 12,6% par rapport au contrôle qui n'obtenait que 6,2%. **Paramera et al. (2011)** ont également rapporté qu'un agent de plasmolyse tel que NaCl (10% p/v) augmentait le rendement d'encapsulation de la curcumine, atteignant 19,94%, et qu'il n'y avait pas de différence significative entre les concentrations de NaCl (10%, 20%, 30% et 40% p/p) en termes de quantité de curcumine encapsulée. Cependant, les résultats de l'étude de **Tan et al. (2020)** ont montré que la concentration de NaCl (10% p/v) donnait le rendement d'encapsulation

## Chapitre V : Résultats et discussion

---

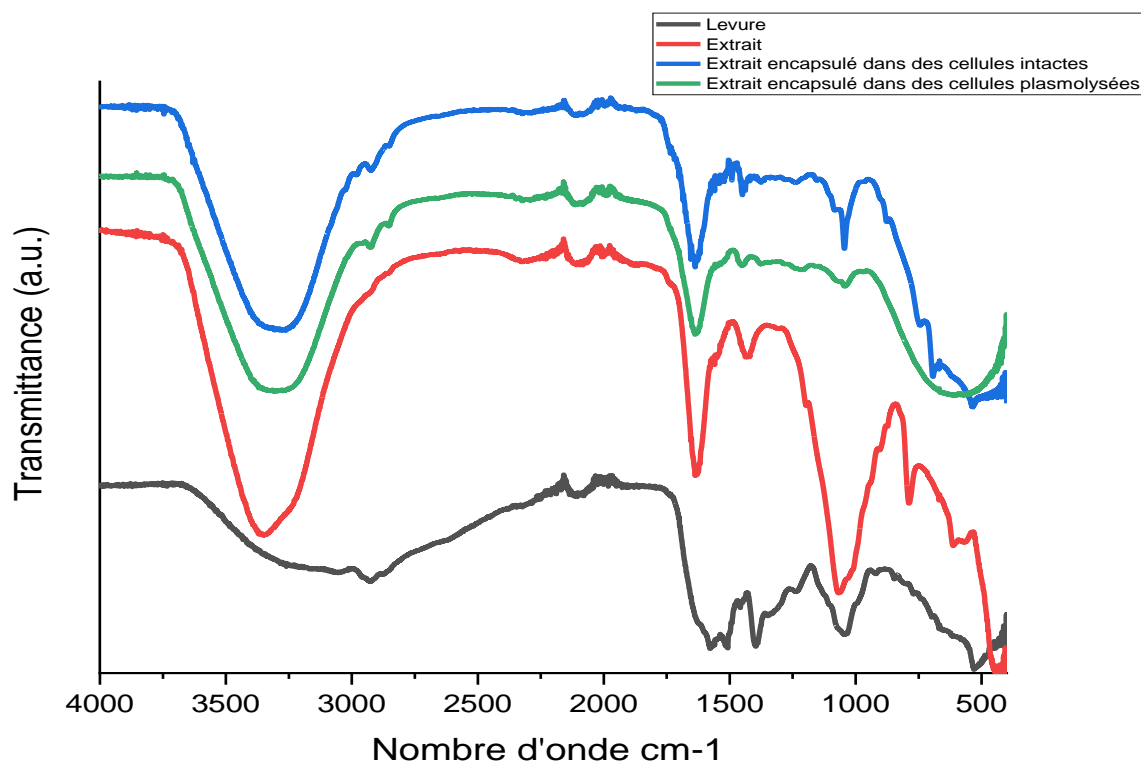
le plus élevé d'anthocyanines dans les cellules de levure par rapport au contrôle, et qu'une augmentation de la concentration de NaCl jusqu'à 15% (p/v) entraînait une diminution du rendement d'encapsulation. Cela pourrait être attribué à l'effet néfaste d'une concentration élevée de NaCl sur la membrane des cellules de levure, entravant ainsi la diffusion des composés phénoliques à l'intérieur des cellules de levure (**Tan et al., 2020**). Selon la littérature scientifique, les glycoprotéines présentes dans la couche externe de la cellule intacte (protéines exo- et trans-) limitent la perméabilité aux macromolécules (agrégats), mais favorisent l'entrée des petites molécules (**De Nobel et al., 1990**). En somme, la plasmolyse fragilise la membrane et entraîne une meilleure rétention des polyphénols totaux par rapport aux cellules intactes.

Cependant, en ce qui concerne les flavonoïdes et les tanins des fraises, les résultats obtenus mettent en évidence que les levures intactes sont plus efficaces que les cellules intactes pour la rétention de ces composés. Ce constat est en accord avec une étude réalisée par **Kurek et al. (2023)**, qui a démontré une meilleure efficacité d'encapsulation dans les levures intactes par rapport aux levures plasmolysées, avec des taux de  $52,87 \pm 0,22$  % et  $53,88 \pm 0,81$  % respectivement. Par ailleurs, une étude portant sur des anthocyanes de l'*Hibiscus sabdariffa* a révélé une efficacité d'encapsulation d'environ 27 % pour les cellules de levure de boulanger non plasmolysées (**Nguyen et al., 2018**). Nos résultats diffèrent de ceux de **Nguyen et al. (2022)**, qui ont observé une rétention quasi totale (près de 100 %) des anthocyanes après encapsulation avec la membrane de levure.

Les flavonoïdes et les tanins présents dans l'extrait de fraise possèdent des propriétés physicochimiques qui favorisent une encapsulation plus efficace dans les cellules intactes. Cette efficacité accrue peut être expliquée par l'interaction hydrophobe entre les groupes aromatiques présents dans les molécules de flavonoïdes et de tanins, et les chaînes acyles des phospholipides constituant la membrane cellulaire. Cette interaction réduit les interactions de van der Waals entre les chaînes acyles lipidiques, ce qui facilite la diffusion des molécules de flavonoïdes et de tanins à l'intérieur de la cellule (**Paramera et al., 2010**).

### 2. Les résultats obtenus par le spectro ftir

Le spectre FT-IR des cellules de levure est présenté dans la figure 13 :



**Figure 13.** Le spectre FT-IR des cellules de levure

Les liaisons chimiques entre présentes dans les cellules de levure et les polyphénols ont été étudiées par FT-IR. Le spectre FT-IR des cellules de levure pures est présenté dans la Fig. La large bande à 3500  $\text{cm}^{-1}$  est attribuée à la vibration d'étirement O-H d'alcool ou NH des protéines. Les bandes d près de 1400 et 1534  $\text{cm}^{-1}$  sont assignées respectivement à l'amide I et à l'amide II des protéines présentes dans les cellules de levure. La bande à 2920  $\text{cm}^{-1}$  provient de la vibration d'étirement asymétrique  $\text{CH}_2$  des protéines et des glucides dans les cellules de levure. La bande à 1047  $\text{cm}^{-1}$  est causée par l'étirement C-O des glucides présents dans l'ARN, l'ADN et la membrane cellulaire des cellules de levure (Du *et al.*, 2012).

Les extraits encapsulés ont révélé la présence d'une bande d'absorption importante à 3315  $\text{cm}^{-1}$ , principalement attribuée à la vibration d'étirement O-H des groupes hydroxyle des composés phénoliques et des glucides, avec une possible contribution de la vibration N-H des levures (Mohsin *et al.*, 2019). La fréquence et la largeur de cette bande à 3315  $\text{cm}^{-1}$  indiquent des interactions de liaison hydrogène intermoléculaires pour les groupes hydroxyle (Coates *et al.*, 2000). Une bande d'absorption à 2930  $\text{cm}^{-1}$  a été observée, attribuée aux vibrations d'étirement C-H provenant de la levure. La bande à 1705  $\text{cm}^{-1}$  correspond à l'étirement CO, révélant la présence de groupes carbonyle. La vibration à 1610  $\text{cm}^{-1}$  avec une épaule à 1570  $\text{cm}^{-1}$  est le résultat de chevauchements de bandes, incluant des liaisons C=C-C des cycles aromatiques, des liaisons C=N et C=C, ainsi que

## Chapitre V : Résultats et discussion

des contributions possibles de groupes amide ou carboxylate dans cette région spectrale. Dans la région de 1450 à 1300  $\text{cm}^{-1}$ , plusieurs bandes ont été observées, principalement dues aux vibrations de flexion CH et OH. L'intensité à 1210  $\text{cm}^{-1}$  est partiellement attribuée à l'étirement C-O (phénol), tandis que les bandes prédominantes dans la région ~1150-1000  $\text{cm}^{-1}$  sont attribuées aux étirements C-C et C-O des groupes ester alkyle, éther, méthoxy et alcool (Oracz et Zyzelewicz, 2019). Cependant, ces bandes ont disparu lors de l'encapsulation. La disparition des bandes d'absorption FTIR dans le cas d'une encapsulation peut être expliquée par l'interaction avec la matrice d'encapsulation : Lors de l'encapsulation, il peut y avoir des interactions entre le matériau encapsulé et la matrice d'encapsulation. Ces interactions peuvent modifier les propriétés moléculaires du matériau encapsulé, ce qui peut entraîner des changements dans ses bandes d'absorption FTIR. Par exemple, des interactions telles que des liaisons hydrogène, des interactions électrostatiques ou des interactions chimiques peuvent se produire, ce qui peut modifier les fréquences ou les intensités des bandes d'absorption.

Il est bien connu que les polyphénols interagissent principalement sous forme de colloïdes avec les protéines par des liaisons de van der Waals. L'acide tannique, un polyphénol naturel, précipite ou forme des complexes avec de nombreuses macromolécules différentes des levures telles que les polysaccharides et les protéines avec des accepteurs de liaison hydrogène. Cependant, il existe peu d'études sur l'adsorption des polyphénols sur les levures. Les levures peuvent établir des interactions faibles et réversibles entre les anthocyanes et les parois des levures (Salmon, 2006).

### 3. Effet de l'encapsulation sur l'activité antioxydante des extraits de fraise

Le tableau de la Figure 11 présente les résultats de l'activité antioxydante mesurée par IC<sub>50</sub>, à la fois avant et après l'encapsulation.

**Tableau 4.** IC<sub>50</sub> des extraits encapsulés et non encapsulés

	IC 50 (mg /ml) DPPH	IC 50 (mg /ml) ABTS
<b>Extrait</b>	0,14±0.5 <sup>c</sup>	0,12±0.25 <sup>a</sup>
<b>plasmolysées</b>	0,38±0.6 <sup>b</sup>	0,11±0.58 <sup>b</sup>
<b>Intacte</b>	0,63±0.48 <sup>a</sup>	0,10±0.42 <sup>c</sup>

Les résultats obtenus montrent que l'extrait de fraise non encapsulé présente des valeurs d'IC<sub>50</sub> de 0,14±0.5 mg/ml et 0,12±0.25 mg/ml pour les méthodes DPPH et ABTS, respectivement. Une différence significative ( $p < 0,05$ ) a été observée entre les extraits avant et après l'encapsulation.

Pour la méthode DPPH, l'encapsulation a entraîné une diminution de l'activité antioxydante, avec des valeurs d'IC<sub>50</sub> de 0,14 ± 0,24 mg/ml, 0,38 ± 0,58 mg/ml et 0,63 ± 0,5 mg/ml pour l'extrait

## Chapitre V : Résultats et discussion

---

non encapsulé, les cellules plasmolysées et les cellules intactes, respectivement. Les résultats montrent une différence significative de la valeur d'IC50 entre les cellules intactes et les cellules plasmolysées. Les cellules plasmolysées présentent une activité antioxydante supérieure par rapport aux levures intactes.

Pour la méthode ABTS, l'encapsulation a provoqué une augmentation de l'activité antioxydante. Les valeurs d'IC50 sont passées de  $0,12 \pm 0,25$  mg/ml pour l'extrait non encapsulé à  $0,11 \pm 0,58$  mg/ml et  $0,10 \pm 0,42$  mg/ml pour les cellules plasmolysées et intactes, respectivement. Les résultats montrent que la valeur d'IC50 chez les cellules plasmolysées est inférieure à celle des cellules intactes, indiquant une activité antioxydante supérieure chez les cellules intactes par rapport aux cellules plasmolysées.

En résumé, les résultats obtenus après l'encapsulation montrent des variations de l'activité antioxydante. Pour la méthode DPPH, une diminution de l'activité antioxydante a été observée, tandis que pour la méthode ABTS, une augmentation de l'activité antioxydante a été constatée.

### Discussion

L'extrait de fraise non encapsulé a révélé une forte activité antioxydante pour les deux méthodes cela a été confirmé par **Arend *et al.* (2017)** qui ont montré une forte activité des extraits de fraise. Concernant la méthode DPPH la diminution obtenue suggérant une relation entre la quantité de polyphénols totaux encapsulés et l'activité antioxydante. Cela peut être expliqué par des concentrations plus élevées de composés phénoliques observées dans les cellules plasmolysées, ce qui indique des taux d'efficacité plus élevés.

En ce qui concerne la méthode ABTS, il est possible que l'augmentation de l'activité antioxydante soit due à la synergie entre les activités antioxydantes des polyphénols et de la levure. Des études ont rapporté que les levures, telles que la levure de boulanger ou la levure sèche, présentent une activité antioxydante et antiradicale significative, ce qui en fait des ingrédients antioxydants naturels et novateurs (**Hassan, 2011**). Il a également été signalé que cette activité antioxydante et antiradicale de la levure est liée à la présence de glutathion, de produits de réaction de Maillard et d'acides aminés soufrés à l'intérieur des cellules de levure (**Karaman, 2020**).

Dans une étude portant sur les performances antioxydantes des levures, des extraits de levure ont été ajoutés à des hamburgers, et il a été observé que ces extraits empêchaient la formation de substances réactives à l'acide thiobarbiturique dans l'échantillon (**Wang et Xiong, 2005**).

Les cellules intactes ont présenté une meilleure activité antioxydante par rapport à celles plasmolysées. Cela pourrait être dû à l'effet du traitement de la plasmolyse sur les cellules de levure. La plasmolyse se réfère à la perte de matériau cytoplasmique causée par une perte d'eau par osmose, ce qui entraîne l'élimination des composants cellulaires de la levure (**Pham-Hoang, et al., 2013**).

## Chapitre V : Résultats et discussion

---

En se basant sur ces connaissances, on peut déduire que le processus de plasmolyse augmente la capacité d'absorption des molécules bioactives et l'efficacité de l'encapsulation, ainsi que la stabilité de l'ingrédient actif. Toutefois, il entraîne également une diminution de la bioactivité du matériau en raison de l'élimination de certains composants antioxydants présents dans la cellule de la levure (**Karaman, 2020**).

Dans une autre étude similaire, la stabilité oxydative et thermique de la curcumine encapsulée avec des cellules de levure a été étudiée, et la capsule de levure plasmolysée a montré une performance antioxydante plus faible par rapport à la capsule de levure non plasmolysée. Les chercheurs s'attendaient également à une activité antioxydante plus faible pour la capsule de levure non plasmolysée, car ils ont indiqué que les conditions caustiques et la chaleur élevée oxydèrent et dégraderaient tout système antioxydant intrinsèque présent dans le cytoplasme. Cependant, un niveau élevé de glutathion jusqu'à 10 mM (**Penninckx, 2002**), qui est un régulateur essentiel du stress oxydatif intracellulaire, présentait une forte activité antioxydante.

En ce qui concerne la plasmolyse de la cellule de levure, un processus de dessiccation entraîne une diminution du rapport de la forme réduite du glutathion à la forme oxydée (GSH:GSSG), ce qui provoque une diminution de la performance antioxydante équivalente à celle du Trolox (**Espindola et al., 2003**).

---

## **CONCLUSION GENERALE**

---

## Conclusion générale

---

L'objectif principal de cette étude est d'étudier l'effet de l'encapsulation sur la teneur en composés phénoliques (polyphénols, flavonoïdes et tanins) et l'activité antioxydante du fruit *Fragaria x ananasa* Duch.

L'encapsulation a été effectuée par la levure (*Saccharomyces cerevisiae*) pour encapsuler les composés phénoliques et l'activité antioxydante du fruit *Fragaria x ananasa* Duch.

L'encapsulation réduit significativement les polyphénols (polyphénols totaux, flavonoïdes et tanins). Les cellules plasmolysées conservent plus de polyphénols totaux que les cellules intactes. Les cellules intactes ont une meilleure rétention de flavonoïdes que les cellules plasmolysées. Les tanins sont mieux conservés dans les cellules intactes. Malgré cela, l'encapsulation diminue la teneur totale en polyphénols. Ces observations confirment l'effet négatif de l'encapsulation sur les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tanins.

L'encapsulation a affecté l'activité antioxydante des extraits. Pour la méthode DPPH, l'encapsulation a diminué l'activité antioxydante des cellules plasmolysées par rapport aux cellules intactes. En revanche, pour la méthode ABTS, l'encapsulation a conduit à une augmentation de l'activité antioxydante des cellules intactes par rapport aux cellules plasmolysées.

Ces résultats pourraient servir de données préliminaires pour des analyses futures concernant l'encapsulation des composés phénoliques du fruit *Fragaria x ananasa* Duch et leur activité biologique.

Mais, il serait intéressant de mener une étude plus approfondie pour :

- Élargir le cadre d'encapsulation des composés phénoliques en utilisant d'autre méthode d'encapsulation.
- Poursuivre les recherches afin d'approfondir l'évaluation de l'activité antioxydante in vitro et in vivo de l'encapsulation. En plus de cela, il serait judicieux d'envisager d'autres tests biologiques tels que l'analyse de l'activité anti-tumorale, anti-cancéreuse, anti-inflammatoire, anti-diabétique et anti-coagulante. Ces études permettraient de mieux comprendre les effets potentiels et les applications thérapeutiques de l'encapsulation des composés étudiés....
- Identifier les principes actifs responsables de cette activité pharmacologique et déterminer les conditions optimales d'encapsulation de ces principes actifs.

---

## **Références Bibliographique**

---

## Références bibliographiques

---

- Abdel, H. I., & Mansour, M. S. (2017).** Polyphenols: Properties, occurrence, content in food and potential effects. *Environmental Science and Engineering*, 6, 232-61.
- Abidin, Z. Z., Awang Biak, D. R., Mohamed, H., & Harun, M. Y. (2013).** Solid–liquid extraction in biorefinery. *Separation and Purification Technologies in Biorefineries*, 351-374.
- Afrin, S., Gasparrini, M., Forbes-Hernandez, T. Y., Reboredo-Rodriguez, P., Mezzetti, B., Varela-López, A., Giampieri, F., & Battino, M. (2016).** Promising health benefits of the strawberry: a focus on clinical studies. *Journal of agricultural and food chemistry*, 64(22), 4435-4449.
- Akdim, L. (2017).** Comparaison de méthodes d'absorption et d'encapsulation de l'huile essentielle de *Copaifera Officinalis* L. en vue d'une application en cosmétique.
- Alexandre, H., & Guilloux-Benatier, M. (2006).** Yeast autolysis in sparkling wine—a review. *Australian journal of grape and wine research*, 12(2), 119-127.
- Arend, G. D., Adorno, W. T., Rezzadori, K., Di Luccio, M., Chaves, V. C., Reginatto, F. H., & Petrus, J. C. C. (2017).** Concentration of phenolic compounds from strawberry (*Fragaria X ananassa* Duch) juice by nanofiltration membrane. *Journal of Food Engineering*, 201, 36-41.
- Assadpour, E., & Jafari, S. M. (2019).** Advances in spray-drying encapsulation of food bioactive ingredients: From microcapsules to nanocapsules. *Annual review of food science and technology*, 10, 103-131.
- Augustin, M. A., & Sanguansri, L. (2008).** Encapsulation of bioactives. *Food materials science: principles and practice*, 577-601.
- Bakowska-Barczak, A. M., & Kolodziejczyk, P. P. (2011).** Black currant polyphenols: Their storage stability and microencapsulation. *Industrial crops and products*, 34(2), 1301-1309.
- Basu, A., Rhone, M., & Lyons, T. J. (2010).** Berries: emerging impact on cardiovascular health. *Nutrition reviews*, 68(3), 168–177.
- Bénard, C. (2009).** Etude de l'impact de la nutrition azotée et des conditions de culture sur le contenu en polyphénols chez la tomate. *Université Montpellier II*.
- Bernstein, H., & Bernstein, C. (2019).** Sexual Processes in Microbial Eukaryotes. In *Parasitology and Microbiology Research*. IntechOpen.

## Références bibliographiques

---

- Bile, J. (2015).** *Microencapsulation d'agent antimicrobien pour le développement de conditionnements primaires fonctionnalisés* (Doctoral dissertation, Université Claude Bernard-Lyon I).
- Bishop, J. R. P., Nelson, G., & Lamb, J. (1998).** Microencapsulation in yeast cells. *Journal of microencapsulation*, 15(6), 761-773.
- Blois, M. S. (1958).** Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 181, 1199-1200.
- Böhm, H., Boeing, H., Hempel, J., Raab, B., & Kroke, A. (1998).** Flavonols, flavone and anthocyanins as natural antioxidants of food and their possible role in the prevention of chronic diseases. *Zeitschrift für Ernährungswissenschaft*, 37(2), 147-163.
- Bratovcic, A., & Suljagic, J. (2019).** Micro-and nano-encapsulation in food industry. *Croatian journal of food science and technology*, 11(1), 113-121.
- Bravo, L. (1998).** Polyphenols: chemistry, dietary sources, metabolism, and nutritional significance. *Nutrition reviews*, 56(11), 317-333.
- Burgain, J., Gaiani, C., Linder, M., & Scher, J. (2011).** Encapsulation of probiotic living cells: From laboratory scale to industrial applications. *Journal of food engineering*, 104(4), 467-483.
- Capocasa, F., Balducci, F., Di Vittori, L., Mazzoni, L., Stewart, D., Williams, S., Hargreaves, R., Bernardini, D., Danesi, L., Zhong, C-F., & Mezzetti, B. (2016).** Romina and Cristina: Two new strawberry cultivars with high sensorial and nutritional values. *International Journal of Fruit Science*, 16(sup1), 207-219.
- Carbonaro, M., Grant, G., & Puzstai, A. (2001).** Evaluation of polyphenol bioavailability in rat small intestine. *European journal of nutrition*, 40, 84-90.
- Castromonte, M., Wacyk, J., & Valenzuela, C. (2020).** Encapsulación de extractos antioxidantes desde sub-productos agroindustriales: una revisión. *Revista chilena de nutrición*, 47(5), 836-847.
- Cegledi, E., Garofulić, I. E., Zorić, Z., Roje, M., & Dragović-Uzelac, V. (2022).** Effect of Spray Drying Encapsulation on Nettle Leaf Extract Powder Properties, Polyphenols and Their Bioavailability. *Foods*, 11(18), 2852.

## Références bibliographiques

---

- 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.
- Chehrit-Hacid, F. (2016).** *Etude de la variabilité biochimique, physiologique et évaluation des activités biologiques des polyphénols de deux espèces du genre Pistacia (P. lentiscus L. et P. atlantica Desf.)* (Doctoral dissertation).
- Coates, J. (2000).** Interpretation of infrared spectra, a practical approach.
- Costa, M., Sezgin-Bayindir, Z., Losada-Barreiro, S., Paiva-Martins, F., Saso, L., & Bravo-Díaz, C. (2021).** Polyphenols as antioxidants for extending food shelf-life and in the prevention of health diseases: Encapsulation and interfacial phenomena. *Biomedicines*, 9(12), 1909.
- Czerniak, A., Kubiak, P., Białas, W., & Jankowski, T. (2015).** Improvement of oxidative stability of menhaden fish oil by microencapsulation within biocapsules formed of yeast cells. *Journal of Food Engineering*, 167, 2-11.
- Dai, H., Leung, C. E., Corradini, M. G., Xiao, H., & Kinchla, A. J. (2020).** Increasing the nutritional value of strawberry puree by adding xylo-oligosaccharides. *Heliyon*, 6(4), e03769.
- Dangles, O. (2006).** The physico-chemical properties of polyphenols. How do they relate to their roles in plants, foods and human health. *AgroFOOD Industry Hi-tech*, 17, 64–67.
- De Nobel, J. G., Klis, F. M., Priem, J., Munnik, T., & van den Ende, H. (1990).** The glucanase-soluble mannoproteins limit cell wall porosity in *Saccharomyces cerevisiae*. *Yeast (Chichester, England)*, 6(6), 491–499.
- Del Rio, D., Costa, L. G., Lean, M. E. J., & Crozier, A. (2010).** Polyphenols and health: what compounds are involved?. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 20(1), 1-6.
- Desai, K. G. H., & Jin Park, H. (2005).** Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying technology*, 23(7), 1361-1394.
- Dias, D. R., Botrel, D. A., Fernandes, R. V. D. B., & Borges, S. V. (2017).** Encapsulation as a tool for bioprocessing of functional foods. *Current Opinion in Food Science*, 13, 31-37.
- Dimmer, K. S., Fritz, S., Fuchs, F., Messerschmitt, M., Weinbach, N., Neupert, W., & Westermann, B. (2002).** Genetic basis of mitochondrial function and morphology in *Saccharomyces cerevisiae*. *Molecular biology of the cell*, 13(3), 847-853.

## Références bibliographiques

---

- Dimopoulos, G., Katsimichas, A., Tsimogiannis, D., Oreopoulou, V., & Taoukis, P. (2021).** Cell permeabilization processes for improved encapsulation of oregano essential oil in yeast cells. *Journal of Food Engineering*, 294, 110408.
- Dinelli, G., Bonetti, A., Minelli, M., Marotti, I., Catizone, P., & Mazzanti, A. (2006).** Content of flavonols in Italian bean (*Phaseolus vulgaris* L.) ecotypes. *Food chemistry*, 99(1), 105-114.
- Ding, S., Jiang, H., & Fang, J. (2018).** Regulation of immune function by polyphenols. *Journal of immunology research*, 2018.
- DSA, Jijel. (2019).** Production de la fraise à Jijel entre 2012 et 2019.
- Du, X., He, W., Zhang, X., Yue, Y., Liu, H., Zhang, X., Min ; D., Ge, X., & Du, Y. (2012).** Enhancing the electrochemical performance of lithium ion batteries using mesoporous Li 3 V 2 (PO 4) 3/C microspheres. *Journal of materials chemistry*, 22(13), 5960-5969.
- Edoga, M. O., Fadipe, A. L., & Edoga, R. N. (2006).** Extraction of polyphenols from cashew nutshell. *Journal of Practices and Technologies*, 9, 107–112.
- Espindola, A., Gomes, D. S., Panek, A. D., & Eleutherio, E. C. A. (2003).** The role of glutathione in yeast dehydration tolerance. *Cryobiology*, 47(3), 236-241.
- Gharsallaoui, A., Roudaut, G., Chambin, O., Voilley, A., & Saurel, R. (2007).** Applications of spray-drying in microencapsulation of food ingredients: An overview. *Food research international*, 40(9), 1107-1121.
- Giampieri, F., Alvarez-Suarez, J. M., & Battino, M. (2014).** Strawberry and human health: Effects beyond antioxidant activity. *Journal of agricultural and food chemistry*, 62(18), 3867-3876.
- Giampieri, F., Forbes-Hernandez, T.Y., Gasparri, M., Alvarez-Suarez, J.M., Afrin, S., Bompadre, S., Quiles, J.L., Mezzetti, B., & Battino, M. (2015).** Strawberry as a health promoter: an evidence based review. *Food Funct*, 6, 1386–1398.
- Giampieri, F., Tulipani, S., Alvarez-Suarez, J. M., Quiles, J. L., Mezzetti, B., & Battino, M. (2012).** The strawberry: composition, nutritional quality, and impact on human health. *Nutrition (Burbank, Los Angeles County, Calif.)*, 28(1), 9–19.
- Halliwel, B. (2007).** Dietary polyphenols: good, bad, or indifferent for your health?. *Cardiovascular research*, 73(2), 341-347.

## Références bibliographiques

---

- Hassan, H. M. (2011).** Antioxidant and immunostimulating activities of yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) autolysates. *World App l Sci J*, 15(8), 1110-9.
- Hertweck, C. (2009).** The biosynthetic logic of polyketide diversity. *Angewandte Chemie International Edition*, 48(26), 4688-4716.
- Hireche, M, 2013.** Dosage des polyphénols de la tomate «agora» et étude de leur pouvoir antioxydant .Mémoire de master. Université Hassiba Ben Bouali de Chleff.
- Jindal, K. K., & Sharma, R. C. (2004).** *Recent trends in horticulture in the Himalayas: integrated development under the mission mode*. Indus Publishing.
- Joye, I. J., & McClements, D. J. (2014).** Biopolymer-based nanoparticles and microparticles: Fabrication, characterization, and application. *Current opinion in colloid & interface science*, 19(5), 417-427.
- Kalinina, I., Fatkullin, R., Naumenko, N., Ruskina, A., Popova, N., & Naumenko, E. (2022).** Increasing the Efficiency of Taxifolin Encapsulation in *Saccharomyces cerevisiae* Yeast Cells Based on Ultrasonic Microstructuring. *Fermentation*, 8(8), 378.
- Karaman, K. (2020).** Characterization of *Saccharomyces cerevisiae* based microcarriers for encapsulation of black cumin seed oil: Stability of thymoquinone and bioactive properties. *Food chemistry*, 313, 126129.
- Kasote, D. M., Jayaprakasha, G. K., & Patil, B. S. (2018).** Encapsulation of polyphenols: An effective way to enhance their bioavailability for gut health. *Advances in plant phenolics: from chemistry to human health*, 239-259.
- Kavosi, M., Mohammadi, A., Shojaee-Aliabadi, S., Khaksar, R., & Hosseini, S. M. (2018).** Characterization and oxidative stability of purslane seed oil microencapsulated in yeast cells biocapsules. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(7), 2490-2497.
- Khameneh, B., Bazzaz, B. S. F., & Moghadam, M. N. (2021).** *Saccharomyces cerevisiae*—A Platform for Delivery of Drugs and Food Ingredients Encapsulation and Analysis. In *Biodegradation, Pollutants and Bioremediation Principles* (pp. 102-121). CRC Press.

## Références bibliographiques

---

- Koraqi, H., Petkoska, A. T., Khalid, W., Sehrish, A., Ambreen, S., & Lorenzo, J. M. (2023).** Optimization of the Extraction Conditions of Antioxidant Phenolic Compounds from Strawberry Fruits (*Fragaria x ananassa* Duch.) Using Response Surface Methodology. *Food Analytical Methods*, 1-13.
- Korber, D. R., Choi, A., Wolfaardt, G. M., & Caldwell, D. E. (1996).** Bacterial plasmolysis as a physical indicator of viability. *Applied and environmental microbiology*, 62(11), 3939-3947.
- Krasnow, M. N., & Murphy, T. M. (2004).** Polyphenol glucosylating activity in cell suspensions of grape (*Vitis vinifera*). *Journal of agricultural and food chemistry*, 52(11), 3467-3472.
- 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.
- Kuswardani, I., Yuwono, F., Dharmawan, N. E., Nugerahani, I., Ristiarini, S., Srianta, I., & Tewfik, I. (2023).** Re-formulating *Monascus* fermented durian seeds yogurt with strawberry (*Fragaria x ananassa*) puree to enhance its microbiological, physicochemical and organoleptic properties. *Food Research*, 7(1), 8-13.
- Labuschagne, P. (2018).** Impact of wall material physicochemical characteristics on the stability of encapsulated phytochemicals: A review. *Food Research International*, 107, 227-247.
- Lattanzio, V., Lattanzio, V. M., & Cardinali, A. (2006).** Role of phenolics in the resistance mechanisms of plants against fungal pathogens and insects. *Phytochemistry: Advances in research*, 661(2), 23-67.
- Li, H., Zhang, X., Zhao, C., Zhang, H., Chi, Y., Wang, L., Zhang, H., Bai, S., & Zhang, X. (2022).** Entrapment of curcumin in soy protein isolate using the pH-driven method: Nanoencapsulation and formation mechanism. *LWT*, 153, 112480.
- Liu, W., & Guo, R. (2005).** Interaction between morin and sodium dodecyl sulfate (SDS) micelles. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(8), 2890-2896.
- López Córdoba, A. F. (2012).** *Desarrollo de sistemas de encapsulación compuestos para la protección de extractos antioxidantes de yerba mate* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

## Références bibliographiques

---

- Loyeau, P. A., Spotti, M. J., Braber, N. V., Rossi, Y. E., Montenegro, M. A., Vinderola, G., & Carrara, C. R. (2018).** Microencapsulation of *Bifidobacterium animalis* subsp. *lactis* INL1 using whey proteins and dextrans conjugates as wall materials. *Food Hydrocolloids*, 85, 129-135.
- MADRP. (2017).** Répartition de la culture de la fraise en Algérie.
- Makris, D. P., & Boskou, D. (2014).** Plant-derived antioxidants as food additives. *Plants as a source of natural antioxidants*, 398, 169-190.
- Matiacevich, S., & Sáez, C. (2018).** Encapsulación de aceite esencial de lemongrass en el desarrollo de ingredientes naturales en polvo para preservación de alimentos: Una revisión.
- Mazza, G. J. (2007).** Anthocyanins and heart health. *Annali dell'Istituto superiore di sanita*, 43(4), 369–374.
- Mohsin, G. F., Schmitt, F. J., Kanzler, C., Hoehl, A., & Hornemann, A. (2019).** PCA-based identification and differentiation of FTIR data from model melanoidins with specific molecular compositions. *Food chemistry*, 281, 106-113.
- Naczki, M., & Shahidi, F. (2006).** Phenolics in cereals, fruits and vegetables: Occurrence, extraction and analysis. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, 41(5), 1523-1542.
- Nakhaee Moghadam, M., Khameneh, B., & Fazly Bazzaz, B. S. (2019).** *Saccharomyces cerevisiae* as an Efficient Carrier for Delivery of Bioactives: a Review. *Food Biophysics*, 14, 346-353.
- Neri, F., Cappellin, L., Spadoni, A., Alarcon, A.A., Aprea, E., Romano, A., Gasperi, F., & Biasioli, F. (2014).** Role of strawberry volatile organic compounds in the Development of *Botrytis cinerea* infection. *Plant Pathol*, 64 : 709–717.
- Nguyen, T. D. (2016).** *Protection de la levure Saccharomyces cerevisiae par un système biopolymérique multicouche: effet sur son activité métabolique en réponse aux conditions de l'environnement* (Doctoral dissertation, Dijon).
- 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.

## Références bibliographiques

---

- Nguyen, T. T., Voilley, A., Tran, T. T. T., & Waché, Y. (2022).** Microencapsulation of Hibiscus sabdariffa L. Calyx Anthocyanins with Yeast Hulls. *Plant Foods for Human Nutrition*, 77(1), 83-89.
- Nijveldt, R. J., Van Nood, E. L. S., Van Hoorn, D. E., Boelens, P. G., Van Norren, K., & Van Leeuwen, P. A. (2001).** Flavonoids: a review of probable mechanisms of action and potential applications. *The American journal of clinical nutrition*, 74(4), 418-425.
- Nowicka, A., Kucharska, A. Z., Sokół-Łętowska, A., & Fecka, I. (2019).** Comparison of polyphenol content and antioxidant capacity of strawberry fruit from 90 cultivars of *Fragaria × ananassa* Duch. *Food chemistry*, 270, 32-46.
- Oliveira, A. S., Ferreira, C., Pereira, J. O., Pintado, M. E., & Carvalho, A. P. (2022).** Valorisation of protein-rich extracts from spent brewer's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*): An overview. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-23.
- Oracz, J., & Zyzelewicz, D. (2019).** In vitro antioxidant activity and FTIR characterization of high-molecular weight melanoidin fractions from different types of cocoa beans. *Antioxidants*, 8(11), 560.
- Ouaret, F., Drahmami, H., & Ourari, M. E. (2018).** Etude de la diversité morphologique des angiospermes Tiges, Feuilles, Racines
- Paramera, E. I., Konteles, S. J., & Karathanos, V. T. (2011).** Microencapsulation of curcumin in cells of *Saccharomyces cerevisiae*. *Food Chemistry*, 125(3), 892-902.
- Paramera, E. I., Konteles, S. J., & Karathanos, V. T. (2011).** Stability and release properties of curcumin encapsulated in *Saccharomyces cerevisiae*,  $\beta$ -cyclodextrin and modified starch. *Food chemistry*, 125(3), 913-922.
- Paramera, E.I., Konteles, S.J., & Karathanos, V.T. (2010).** Microencapsulation of curcumin in cells of *Saccharomyces cerevisiae*. *Food Chem.*125(3), 892–902.
- Pasukamonset, P., Kwon, O., & Adisakwattana, S. (2016).** Alginate-based encapsulation of polyphenols from *Clitoria ternatea* petal flower extract enhances stability and biological activity under simulated gastrointestinal conditions. *Food Hydrocolloids*, 61, 772-779.
- Penninckx, M. J. (2002).** An overview on glutathione in *Saccharomyces* versus non-conventional yeasts. *FEMS yeast research*, 2(3), 295-305.

## Références bibliographiques

---

- Pham-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.
- Pham-Hoang, B. N., Romero-Guido, C., Phan-Thi, H., & Waché, Y. (2018).** Strategies to improve carotene entry into cells of *Yarrowia lipolytica* in a goal of encapsulation. *Journal of Food Engineering*, 224, 88-94.
- Polshettiwar, V., & Varma, R. S. (2008).** Greener and expeditious synthesis of bioactive heterocycles using microwave irradiation. *Pure and Applied Chemistry*, 80(4), 777-790.
- Prakash, B., Kujur, A., Yadav, A., Kumar, A., Singh, P. P., & Dubey, N. K. (2018).** Nanoencapsulation: An efficient technology to boost the antimicrobial potential of plant essential oils in food system. *Food control*, 89, 1-11.
- 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.
- Quideau, S., Deffieux, D., Douat-Casassus, C., & Pouységu, L. (2011).** Plant polyphenols: chemical properties, biological activities, and synthesis. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(3), 586-621.
- Rahmani, Z. (2020).** *Contribution à l'étude phytochimique, Electrochimique et biologique des extraits de Cupressus sempervirens (L)* (Doctoral dissertation, Université Kasdi Merbah Ouargla).
- Rakotoarisoa, D. (2006).** Amélioration des techniques de production de la fraise sur les hautes terres malgaches. *Mémoire Ingéniorat (Madagascar: Département Agriculture, Essa, Université d'Antananarivo)*, 68.
- Rapuru, R., Bathula, S., & Kaliappan, I. (2022).** Phytochemical Constituents and Pharmacological Activities of Strawberry. In *Strawberries*. IntechOpen.
- 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 radical biology and medicine*, 26(9-10), 1231-1237.
- 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), 933-956.

## Références bibliographiques

---

- 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. *International journal of food science & technology*, 45(7), 1386-1394.
- Round, A., & Nelson, G. (2006).** Encapsulation using microbial cells. *UK patent application*, 2(424), 408.
- Sabbadini, S., Capocasa, F., Battino, M., Mazzoni, L., & Mezzetti, B. (2021).** Improved nutritional quality in fruit tree species through traditional and biotechnological approaches. *Trends in Food Science & Technology*, 117, 125-138.
- Saini, A., Panesar, P. S., & Bera, M. B. (2019).** Comparative study on the extraction and quantification of polyphenols from citrus peels using maceration and ultrasonic technique. *Current Research in Nutrition and Food Science*, 7(3), 678
- Sala, A., Spalding, K. E., Ashton, K. M., Board, R., Butler, H. J., Dawson, T. P., ... & Baker, M. J. (2020).** Rapid analysis of disease state in liquid human serum combining infrared spectroscopy and “digital drying”. *Journal of Biophotonics*, 13(9), e202000118.
- Salas-Arias, K., Irías-Mata, A., Sánchez-Kopper, A., Hernández-Moncada, R., Salas-Morgan, B., Villalta-Romero, F., & Calvo-Castro, L. A. (2023).** Strawberry *Fragaria x ananassa* cv. Festival: A Polyphenol-Based Phytochemical Characterization in Fruit and Leaf Extracts. *Molecules*, 28(4), 1865.
- Salmon, J. M. (2006).** Interactions between yeast, oxygen and polyphenols during alcoholic fermentations: Practical implications. *LWT-Food Science and Technology*, 39(9), 959-965.
- Santos, N. C., Almeida, R. L. J., Monteiro, S. S., de Vilela Silva, E. T., de Alcântara Silva, V. M., André, A. M. M., Ribeiro, V. H. A., & de Brito, A. C. O. (2022).** Influence of ethanol and ultrasound on drying, bioactive compounds, and antioxidant activity of strawberries (*Fragaria x ananassa*). *Journal of the Indian Chemical Society*, 99(7), 100542.
- Serrano Moral, A. (2015).** Tratamiento de residuos y subproductos agroindustriales mediante co-digestión anaerobia.
- 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. *Journal of Food Engineering*, 80(4), 1060-1067.
- Société ACI, 2017-ACI et le développement de la culture de la fraise en Algérie.** ACI NEWS.n°13-pp1-2-4.

## Références bibliographiques

---

- Spagnuolo, C., Moccia, F., Tedesco, I., Adabbo, E., Panzella, L., Russo, G. L., & Napolitano, A. (2023).** Stillage Waste from Strawberry Spirit Production as a Source of Bioactive Compounds with Antioxidant and Antiproliferative Potential. *Antioxidants*, 12(2), 421.
- Tan, T. T. W., District, T. P., & City, V. N. (2020).** Evaluation of anthocyanin encapsulation efficiency into yeast cell by plasmolysis, ethanol, and ultrasound treatments using alone or in combination. *Food Research*, 4(2), 557-562.
- Tanguler, H., & Erten, H. (2008).** Utilisation of spent brewer's yeast for yeast extract production by autolysis: the effect of temperature. *Food Bioprod Process*, 86(4), 317-321.
- Tanner, G. J., Francki, K. T., Abrahams, S., Watson, J. M., Larkin, P. J., & Ashton, A. R. (2003).** Proanthocyanidin biosynthesis in plants: purification of legume leucoanthocyanidin reductase and molecular cloning of its cDNA. *Journal of Biological Chemistry*, 278(34), 31647-31656.
- Takaloo, Z., Nikkhah, M., Nemati, R., Jalilian, N., & Sajedi, R. H. (2020).** Autolysis, plasmolysis and enzymatic hydrolysis of baker's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*): a comparative study. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36, 1-14.
- Timilsena, Y. P., Akanbi, T. O., Khalid, N., Adhikari, B., & Barrow, C. J. (2019).** Complex coacervation: Principles, mechanisms and applications in microencapsulation. *International journal of biological macromolecules*, 121, 1276-1286.
- Uludag, H., De Vos, P., & Tresco, P. A. (2000).** Technology of mammalian cell encapsulation. *Advanced drug delivery reviews*, 42(1-2), 29-64.
- Vázquez-Maldonado, D., Espinosa-Solis, V., Leyva-Porras, C., Aguirre-Bañuelos, P., Martínez-Gutiérrez, F., Román-Aguirre, M., & Saavedra-Leos, M. Z. (2020).** Preparation of spray-dried functional food: effect of adding *Bacillus clausii* bacteria as a co-microencapsulating agent on the conservation of resveratrol. *Processes*, 8(7), 849.
- Wang, L. L., & Xiong, Y. L. (2005).** Inhibition of lipid oxidation in cooked beef patties by hydrolyzed potato protein is related to its reducing and radical scavenging ability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 53(23), 9186-9192.
- Waterhouse, A. (1999).** Folin-ciocalteau micro method for total phenol in wine. *American Journal of Enology and Viticultur*, 28(1), 49-55.

## Références bibliographiques

---

- Watson, E. (2012).** Who has self-affirmed GRAS. *FOOD navigator-usa. com*.
- Williamson, G., & Manach, C. (2005).** Bioavailability and bioefficacy of polyphenols in humans. II. Review of 93 intervention studies. *The American journal of clinical nutrition*, 81(1), 243S-255S.
- Woclawek-Potocka, I., Mannelli, C., Boruszewska, D., Kowalczyk-Zieba, I., Waśniewski, T., & Skarżyński, D. J. (2013).** Diverse effects of phytoestrogens on the reproductive performance: cow as a model. *International journal of endocrinology*, 2013, 1-15.
- Youdim, K. A., Martin, A., & Joseph, J. A. (2000).** Incorporation of the elderberry anthocyanins by endothelial cells increases protection against oxidative stress. *Free radical biology & medicine*, 29(1), 51–60.
- Young, S., Rai, R., & Nitin, N. (2020).** Bioaccessibility of curcumin encapsulated in yeast cells and yeast cell wall particles. *Food chemistry*, 309, 125700.
- Zasypkin, D., & Porzio, M. (2004).** Glass encapsulation of flavours with chemically modified starch blends. *Journal of microencapsulation*, 21(4), 385-397.
- Zuidam, N. J., & Nedovic, V. (Eds.). (2010).** Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing (Vol. 410). New York, NY, USA:: Springer.