



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي برج بوعريريج

Université Mohammed El Bachir El Ibrahimi B.B.A

كلية علوم الطبيعة والحياة وعلوم الأرض والكون

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers

قسم العلوم البيولوجية

Département des Sciences Biologiques



Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine des Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biochimie

Intitulé :

Étude bibliographique: Impact des paramètres physicochimiques sur l'activité Antioxydante du piment rouge

Présenté par:

BOUAOUINA Hadil & HAMMA Amina

Soutenu le 11 / 06/ 2025, Devant le Jury :

Présidente :	Mme. BOUMERFEG Sabah	Pr	Université de Bordj Bou Arreridj
Encadrant :	M. BECHAMI Sofiane	MAA	Université de Bordj Bou Arreridj
Examinatrice :	Mme. FATMI Widad	MCA	Université de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire: 2024/2025

Remerciement

Nous tenons d'abord à remercier Dieu, le Tout-Puissant, pour la volonté, la santé, le courage et la patience qu'Il nous a accordés durant toutes ces années.

الحمد لله

Nos vifs remerciements à Mme. Boumerfeg Sabah qui nous a fait l'honneur de présider le jury, ET d'avoir accepté l'évaluation de Ce travail.

Nos sincères remerciements s'adressent au M. Bechami Sofiane d'avoir proposé Ce thème et d'avoir bien assuré l'encadrement de notre mémoire de fin d'études. Merci pour SA patience, SA rigueur ET SA disponibilité Durant notre préparation de Ce mémoire.

Nous tenons également à adresser nos vifs remerciements à Mme. Widad Fatmi, merveilleuse personne, nous fait l'honneur d'accepter d'examiner Ce mémoire, et nous lui sommes profondément reconnaissants.

Finalement, nous remercions tous nos enseignants de la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, merci de partager vos connaissances et vos expériences avec nous.

Dédicace

Je dédie ce travail à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont été des sources de force, d'amour et d'inspiration tout au long de mon parcours.

À ma mère, Naïma, mon refuge de paix, ma lumière dans l'ombre, La voix apaisante qui a toujours su me soutenir après chaque épreuve, même sans dire un mot. Ta patience, ton amour inconditionnel et tes prières silencieuses ont été mes plus grandes sources de motivation. Chaque réussite que je connais porte ta marque, car c'est toi qui m'as appris à toujours persévérer.

À mon père, que je n'ai pas eu la chance de connaître, paix à son âme. Ton absence a forgé ma force.

À mes deux sœurs, Missou et Hadjer, merci pour votre présence indéfectible, vos encouragements, vos sourires et votre silence réconfortant. Vous avez toujours su m'apporter force et sérénité. Je suis fière et reconnaissante d'être votre petite sœur.

À Ogha, le fils de Hadjer, lumière et espoir de notre famille.

À Mani, ma chère grand-mère, pour ta tendresse, ta douceur et ton amour qui m'ont toujours entourée.

À Jadou, mon grand-père adoré, pour ta sagesse, ta bienveillance et ton soutien inestimable.

À toute ma famille, pour votre soutien, de près ou de loin.

À mes amies proches, Aya et Ikram, pour leur écoute, leurs encouragements et leur bienveillance.

À ma binôme, Hadil, avec qui j'ai partagé les défis et les réussites de ce parcours universitaire.

À Mon Père

À la mémoire de mon cher père,

Qui nous a tout donné de son vivant.

Ton absence me pèse chaque jour, mais ton amour et tes sacrifices continuent de m'accompagner et de me motiver.

Ce travail est le fruit de tes efforts passés, et je te le dédie avec une profonde reconnaissance et une prière sincère.

À Ma Mère

À ma mère, femme courageuse et admirable,

Qui a assumé à la fois le rôle de père et de mère.

Ton amour inconditionnel, ta force et ton soutien m'ont guidé tout au long de ce parcours.

Merci d'avoir cru en moi, même dans les moments les plus difficiles.

Ce mémoire t'est dédié, en témoignage de tout mon amour et de mon éternelle gratitude.

À Ma Famille

À mes frères et sœurs,

Pour votre amour, vos encouragements et votre présence rassurante.

Vous avez été ma force silencieuse et constante dans cette aventure.

Hadil

Sommaire

Résumé	i
Liste des abréviations	ii
Liste des figures	iii
Liste des tableaux	v
Introduction	1
Chapitre I. Généralités sur le piment rouge	2
I.1. Définition	2
I.2. Description botanique et systématique	3
I.2.1. Classification.....	3
I.2.2. Description morphologique	3
I.2.3. Nomenclature	4
I.2.4. Écologie et Répartition géographique.....	4
I.3. Usage traditionnel	5
I.4. Propriétés nutritionnelles et la composition minérale.....	5
I.5. Propriétés biochimiques du piment rouge.....	6
I.6. Activités Biologiques de <i>Capsicum annuum</i> L.....	10
Chapitre II. Impact de quelques facteurs physiques sur l'activité antioxydante du piment rouge	13
II.1. Effet de la température	13
II.2. L'effet de la lumière	20
II.3. Effet de l'humidité.....	25
Chapitre III. Impact de quelques facteurs chimiques sur l'activité antioxydant de piments rouge	30
III.1. Effet des solvants d'extraction sur activité antioxydant de piment	30
III.2. Effet de la concentration du solvant/eau	33
III.3. Effet de pH sur l'activité antioxydant de piment rouge	36
Conclusion.....	40
Références bibliographiques	41

ملخص

يُعد الفلفل الأحمر من النباتات التي تُزرع على نطاق واسع في مختلف أنحاء العالم، ويُستخدم في العديد من المجالات الغذائية، العلاجية، والصناعية. يتميز بتركيبته الغنية بالمركبات النشطة بيولوجيًا، مثل الكابسييسينويدات، الفلافونويدات، الكاروتينويدات، البوليفينولات، وفيتامين س، وهي مركبات تمنحه خصائص مضادة للأكسدة، مضادة للالتهاب، ومضادة للميكروبات. وتساهم هذه المركبات في الوقاية من الضغط التأكسدي ومن أمراض مزمنة مثل السرطان وأمراض القلب.

من أجل فهم أفضل لهذه الخصائص، تم إجراء مجموعة من الدراسات لتقييم تأثير العوامل الفيزيائية والكيميائية على نشاط الفلفل الأحمر المضاد للأكسدة. وقد أظهرت النتائج أن درجة الحرارة المعتدلة، الرطوبة المنخفضة، والتخزين في الظلام تُساهم في الحفاظ على فعالية المركبات النشطة. كما تبين أن استخدام مذيب قطبي، بتركيز مناسب من الماء، ودرجة حموضة قريبة من الحيادية (حوالي 6.5)، يساعد على استخراج أفضل للمكونات الفعالة.

وتسلط هذه النتائج الضوء على أهمية التحكم الدقيق في الظروف البيئية والكيميائية من أجل تحسين القيمة الغذائية والعلاجية للفلفل الأحمر، وتعزيز استخدامه كمصدر طبيعي مهم لمضادات الأكسدة في المجالات الغذائية والدوائية.

الكلمات المفتاحية: الفلفل الأحمر، الكابسييسينويدات، فيتامين س، النشاط المضاد للأكسدة، الإجهاد التأكسدي.

Abstract

The red pepper is a plant widely cultivated throughout the world for its food, therapeutic and industrial uses. Rich in bioactive compounds such as capsaicinoids, flavonoids, carotenoids, polyphenols and vitamin C, it has strong antioxidant, anti-inflammatory and antimicrobial potential. These components are crucial for preventing oxidative stress and significantly contribute to protection against chronic diseases such as cancer and heart disease.

This rich chemical composition plays an essential role in the prevention of oxidative stress and several degenerative diseases. To better understand the conditions that influence the effectiveness of these properties, a series of studies were carried out to evaluate the effect of various physical and chemical factors. Parameters such as moderate temperature, low humidity and reduced exposition to light have been shown to preserve the antioxidant activity of the fruit. Similarly, the choice of a polar solvent, an appropriate water concentration and a slightly acid pH optimize the extraction of active compounds.

These results highlight the importance of careful control of environmental and chemical conditions to optimize the nutritional and therapeutic value of red pepper, promoting its use as an important natural source of antioxidants in the food and pharmaceutical fields.

Keywords: *Capsicum annuum* L., capsaicinoids, vitamin C, antioxidant activity, bioactive compounds.

Résumé

Le piment rouge est une plante largement cultivée à travers le monde pour ses usages alimentaires, thérapeutiques et industriels. Riche en composés bioactifs tels que les capsaïcinoïdes, flavonoïdes, caroténoïdes, polyphénols et vitamine C, il présente un fort potentiel antioxydant, anti-inflammatoire et antimicrobien. Ces composants sont essentiels pour la prévention du stress oxydatif et contribuent significativement à la protection contre des maladies chroniques telles que le cancer et les maladies cardiaques.

Cette riche composition chimique lui confère un rôle essentiel dans la prévention du stress oxydatif et de nombreuses maladies dégénératives. Afin de mieux comprendre les conditions qui influencent l'efficacité de ces propriétés, un ensemble d'études a été mené pour évaluer l'effet de divers facteurs physiques et chimiques. Il a été démontré que des paramètres tels qu'une température modérée, une faible humidité et une exposition réduite à la lumière permettent de préserver l'activité antioxydante du fruit. De même, le choix d'un solvant polaire, une concentration adéquate en eau et un pH légèrement acide optimisent l'extraction des composés actifs.

Ces résultats montrent l'importance d'un contrôle minutieux des conditions environnementales et chimiques afin d'optimiser la valeur nutritionnelle et thérapeutique du piment rouge et de promouvoir son utilisation en tant que source naturelle importante d'antioxydants dans les domaines alimentaire et pharmaceutique.

Mots clés : *Capsicum annuum* L., capsaïcinoïdes, vitamine C, activité antioxydante, composés bioactifs.

Liste des abréviations

ABTS : Acide 2,2'-azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique).

CAP : Capsaïcine.

COX : Cyclooxygénase.

DHC : Dihydrocapsaïcine.

DPPH : 2,2-Diphényl-1-picrylhydrazyle.

EDTA : Ethylène diamine tétra acétique.

FRAP : Pouvoir antioxydant réducteur de fer.

GC-MS : Chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse.

HHAIB : Blanchiment à jet d'air chaud à haute humidité.

HPLC : Chromatographie liquide à haute performance.

LED : Diode électroluminescente.

LOX : Lipoxygénase.

ROS : Espèces Réactives de l'Oxygène.

SOD : Superoxyde Dismutase.

TFC : Teneur totale en flavonoïdes.

TPC : Teneur totale en phénols.

Liste des figures

Figure I.1. Plante du piment rouge.....	2
Figure I.2. Feuilles, Fleures, fruits, et tige de <i>C. annum</i> L.	4
Figure I.3. Racine et les grains de piment rouge.....	4
Figure II.1. Teneur totale en composés phénoliques et flavonoïdes en fonction de la température pour Red 30 min et Red 60 min	14
Figure II.2. Activité antioxydante FRAP et DPPH en fonction de la température pour Red 30 min et Red 60 min	14
Figure II.3. Contenu total en composés phénoliques et flavonoïdes (mg GAE/g DW) selon différentes durées de séchage à 60°C et 90°C	16
Figure II.4. Contenu total en composés phénoliques et flavonoïdes (mg GAE/g DW) selon différentes durées de séchage à 60°C et 90°C.....	17
Figure II.5. Chromatogramme ionique de (a) l'étalon de capsaïcine, (b) de l'extrait à 60 °C et (c) de l'extrait à 90 °C à 6 h	17
Figure II.6. Effets de la température de séchage (60 °C et 90 °C) et de la durée sur l'activité de piégeage des radicaux (a) FRAP, (b) ABTS et (c) DPPH.....	18
Figure II.7. Effet de la température de stockage sur l'expression des gènes codant pour les enzymes antioxydantes du paprika stocké à 4, 10 et 20°C pendant 14 jours, suivi de 5 jours supplémentaires à 20°C.....	19
Figure II.8. Effet de la lumière et de l'obscurité sur les composés phénoliques.....	21
Figure II.9. Effet de la lumière sur les flavonoïdes.....	21
Figure II.10. Effet de la lumière sur la capacité antioxydants	22
Figure II.11. Effet de la teneur en humidité sur les polyphénols du paprika	26
Figure II.12. Effet de la teneur en humidité sur les flavonoïdes du paprika.....	27
Figure II.13. Effet de la teneur en humidité sur la capacité antioxydant du paprika	27
Figure III.1. Teneur en composés phénoliques totaux.....	32
Figure III.2. Activité β -carotène des extraits méthanol.	32
Figure III.3. Influence d'addition différentes concentrations d'eau dans le solvant sur l'extraction des capsaïcinoïde.....	36

Figure III.5. Effet du pH (3, 5, 7 et 9) sur la teneur en capsaïcinoïdes restants (%) à (a) Température ambiante (25C°) pendant 20 h, et (b) température d'ébullition (100C°) pendant 90 min.....38

Liste des tableaux

Tableau I.1. Position systématique de piment rouge	3
Tableau I.2. Composition chimique de piment rouge.....	6
Tableau I.3. Concentrations en macroéléments dans le piment rouge.....	6
Tableau I.4. Structures chimiques de capsaïcinoïdes du <i>C. annum</i> L.....	7
Tableau I.5. Structures chimiques de caroténoïdes du <i>C. annum</i> L.....	8
Tableau I.6. Structures chimiques des composés phénoliques du <i>C. annum</i> L.	9
Tableau I.7. Structures chimiques d'acide ascorbique du <i>C. annum</i> L.	10
Tableau II.1. Effet des qualités de lumière d'appoint sur la teneur en composés phytochimique	24
Tableau III.1. Effet du solvant d'extraction sur la teneur en composés bioactifs et l'activité antioxydante des extraits de piment rouge	30

Introduction

Introduction

L'interaction entre l'espèce humaine et le monde végétal, en particulier les plantes médicinales, aromatiques et les épices, remonte à plusieurs millénaires. De tout temps, leur consommation a été motivée par leurs propriétés pharmacologiques et leurs apports nutritionnels essentiels (**Bouba, 2009**). Parmi ces végétaux d'intérêt, les piments rouges (*Capsicum annum* L.) se distinguent par leur richesse en composés phytochimiques bioactifs, qui leur confèrent des propriétés fonctionnelles intéressantes, notamment une forte activité antioxydante.

En effet, cette activité est principalement due à la présence de capsaïcinoïdes (tels que la capsaïcine), de polyphénols, de flavonoïdes, de caroténoïdes, ainsi que de vitamines antioxydantes comme la vitamine C et la vitamine E (**Materska, 2009 ; Wahyuni *et al.*, 2013**). Ces précieux composés sont capables de neutraliser les radicaux libres, réduisant ainsi les dommages oxydatifs impliqués dans diverses maladies chroniques telles que le cancer, les maladies cardiovasculaires ou le diabète (**Prior *et al.*, 2005**).

Toutefois, l'efficacité antioxydante mesurée dans les extraits de piment dépend fortement des conditions d'extraction. Ainsi, des paramètres physiques et chimiques, influencent significativement la quantité et la qualité des composés extraits du piment rouge (**Dai et Mumper, 2010**).

Cette synthèse bibliographique porte sur la nécessité de déterminer comment les variations des paramètres physicochimiques influent sur l'efficacité et la stabilité de l'activité antioxydante des composés du piment rouge.

Dans ce cadre, notre travail vise à examiner de manière approfondie l'effet des paramètres physicochimiques sur l'activité antioxydante des composés bioactifs extraits du piment rouge. Tout d'abord, nous avons présenté les caractéristiques générales du piment rouge, sa richesse en composés antioxydants, ainsi que les mécanismes du stress oxydatif. Ensuite, l'étude se penche sur l'influence de certains facteurs physiques tels que la température, la lumière et l'humidité, et une analyse des paramètres chimiques, notamment le type de solvant, la concentration par rapport à l'eau (v/v) et le pH du milieu, afin de déterminer dans quelle mesure ces conditions peuvent amplifier ou diminuer l'efficacité de l'activité antioxydante du piment rouge.

Synthèse bibliographique

Chapitre I :

Généralités sur le piment rouge

Chapitre I. Généralités sur le piment rouge

I.1. Définition

Le piment (*Capsicum annuum* L.) est une herbe annuelle de la famille des Solanacées (Greenleaf, 1986) utilisée depuis des centaines d'années et devenu un ingrédient important de la cuisine (Fig.I.1). Le genre *Capsicum*, originaire d'Amérique centrale et d'Amérique du Sud (Kothari *et al.*, 2010), comprend 25 à 30 espèces présentant une riche diversité de plus de 200 variétés réparties dans une trentaine d'espèces. Parmi celles-ci, cinq ont été domestiquées : *C. pubescens*, *C. baccatum*, *C. annuum*, *C. chinense* et *C. frutescens* (González-Zamora *et al.*, 2015).



Figure I.1. Plante du piment rouge (Bechar *et al.*, 2020 ; Pegon, 2009).

L'incertitude quant au nombre exact d'espèces est largement attribuée à la grande variabilité entre les espèces constitutives, dont les fruits diffèrent par leur saveur, leur couleur, leur forme et leur taille, allant du très piquant au doux ou à l'âcre. *Capsicum annuum* est principalement cultivé dans les États du sud des États-Unis (notamment la Californie), dans le sud de l'Europe (Hongrie, Espagne, Italie, ex-Yougoslavie, Bulgarie et Roumanie), ainsi qu'en Afrique du Nord, en Amérique centrale et au Brésil (Teuscher *et al.*, 2005).

Cette plante est utilisée depuis l'Antiquité pour ses bienfaits potentiels sur la santé, et le piment est aujourd'hui valorisé pour ses nombreux composés (acide ascorbique, caroténoïdes, tocophérols, flavonoïdes et capsïcinoïdes) (Marti *et al.*, 2011), qui lui confèrent des applications thérapeutiques, aromatiques et colorantes, que le fruit soit consommé frais ou transformé pour une conservation prolongée.

I.2. Description botanique et systématique

I.2.1. Classification

La classification botanique du piment, selon le système de **De, (2003)** est la suivante (**Tab. I.1**) :

Tableau I.1. Position systématique de piment rouge (**De, 2003**).

Règne	<i>Plantae</i>
Division	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Famille	<i>Solanaceae</i>
Genre	<i>Capsicum</i>
Espèce	<i>Capsicum annuum L.</i>

I.2.2. Description morphologique

Le piment (*Capsicum annuum L.*) est une plante annuelle herbacée dressée ou prostrée qui peut évoluer vers une forme ligneuse en l'absence d'intervention humaine (**Quresh et al., 2015**). Il se distingue par un système racinaire superficiel et étendu (**Fig. I.3**), ainsi qu'une tige colorée et pubescente de manière variable. Cette tige peut présenter de l'anthocyanine sur toute sa longueur, bien que sa présence au niveau des nœuds soit variable, et sa surface peut être lisse (glabre) ou présenter un degré variable de pubescence, allant de complètement lisse à entièrement pubescente (**Bosland et al., 2012**). Les feuilles sont simples, alternes, de formes variées (ovales à lancéolées), avec des bords lisses et généralement ridées. Les fleurs sont petites, ayant un diamètre de 2,5 à 3 cm, et de couleur blanche ou violette, disposées en grappes de deux ou plus. Les fruits, contenant la capsïcine responsable de leur goût piquant, présentent une forme variable et une surface lisse et brillante (**Fig. I.2**). À maturité, leur couleur tend vers le rouge, mais ils peuvent également être orange, verts, noirs, jaunes, violets, blancs ou bruns (**Chaim et al., 2003**). Ces fruits contiennent de nombreuses graines de couleur jaune, qui peuvent présenter des formes multiples : ovoïde, allongée, cylindrique, obtuse, oblongue, ou encore ronde et aplatie (**Fig. I.3**) (**Bosland et al., 2012**).



Figure I.2. Feuilles, Fleures, fruits, et tige de *C. annum* L. (Bechar *et al.*, 2020 ; Boumadda *et al.*, 2020).



Figure I.3. Racine et les grains de piment rouge (Abdourahamane *et al.*, 2024).

I.2.3. Nomenclature

Le piment, en raison de sa large distribution et de son utilisation globale, possède une variété de noms vernaculaires à travers le monde, en Arabe est appelés généralement filfil el ahmer, filfil hilow ou filfil har, en Amazigh ifelfel, en Français poivre de Guinée, piment de Cayenne, ou paprika, en Anglais, Bell Pepper, Chili Pepper, en Hindi, il est appelé lalmirca, et en Ourdou, il est appelé surkhmirch (Goetz et Le Jeune, 2012).

I.2.4. Écologie et Répartition géographique

Capsicum annum L., originaire d'Amérique du Sud et centrale, tire son nom latin de la forme "en boîte" de son fruit. Introduit en Europe en 1493 par Christophe Colomb, il s'est rapidement répandu en Asie et s'est diversifié en de nombreuses variétés à travers le monde (Yamamoto et Nawata, 2004).

Il se présente comme une plante annuelle dans les régions tempérées, tandis qu'il adopte un cycle de vie vivace sous les climats tropicaux (Bussmann *et al.*, 2020).

I.3. Usage traditionnel

Capsicum annuum L., communément appelé piment chili, est bien plus qu'une simple épice culinaire traditionnelle ; il recèle de diverses propriétés médicinales exploitées depuis longtemps. Au sein de nombreux systèmes de médecine traditionnelle, il trouve son application dans le traitement de troubles gastro-intestinaux tels que la dyspepsie, les flatulences et la perte d'appétit (**Mandal et al., 2022**). Cette richesse thérapeutique s'explique par sa composition complexe, qui compte plus de 200 constituants, dont les principaux actifs sont la capsaïcine et les autres capsaïcinoïdes (**Maji et Banerji, 2016**).

Au-delà des troubles digestifs, la médecine traditionnelle reconnaît également au piment des propriétés antimicrobiennes, sédatives et anticonvulsivantes (**Cremer et Eichner, 2000**). La capsaïcine, en particulier, est employée pour soulager une variété de douleurs, allant des migraines à la toux, en passant par les douleurs arthritiques et la congestion nasale. De plus, des études ont mis en évidence son activité anticoagulante, et l'application topique des fruits est préconisée pour atténuer la douleur et favoriser la circulation sanguine (**Qasem, 2020**).

L'efficacité de la capsaïcine dans le soulagement de la douleur est d'ailleurs bien documentée. En tant que capsaïcinoïde le plus étudié à cet égard, elle a démontré sa capacité à réduire la sensation de chaleur associée aux inflammations ainsi que les douleurs liées à des affections telles que la polyarthrite rhumatoïde ou la fibromyalgie, que son administration se fasse par voie orale ou locale (**Luo et al., 2011**).

I.4. Propriétés nutritionnelles et la composition minérale

Capsicum annuum L., se caractérise par une composition nutritionnelle riche et variée, qui lui confère une grande valeur nutritive. Il contient plusieurs macronutriments importants, notamment des protéines, des matières grasses, des fibres et des glucides. Comparé au piment vert, il présente souvent des teneurs plus élevées en matières grasses, en protéines et en fibres.

Sa teneur en eau est élevée, atteignant environ 89,9 %. Lors de la maturation, la quantité de solides solubles dans le piment rouge augmente progressivement. Sur le plan vitaminique, le piment rouge est une excellente source de vitamine C. Il en contient nettement plus que le piment vert. Par exemple, sa teneur en acide ascorbique peut être jusqu'à 27 % plus élevée (**Martínez et al., 2007**) (**Tab. I.2**).

Le piment rouge apporte aussi plusieurs minéraux essentiels. Parmi les principaux, on retrouve le potassium (le plus abondant), le magnésium, le calcium, le sodium et le phosphore. Il

contient également des oligoéléments comme le fer, le zinc, le manganèse et le cuivre. La composition minérale peut varier selon les variétés de piments (**Khan et al., 2019**) (**Tab I.3**).

Tableau I.2. Composition chimique de piment rouge (pour 100 g) (**Martínez et al., 2007**).

Stade de maturation	Piment rouge
Protéines (g/100 g de poids frais)	1.13 ± 0.21
Glucides (g/100 g de poids frais)	6.23 ± 1.36
Fibres totales (g/100 g de poids frais)	1.62 ± 0.15
Pectine (g/100 g de poids frais)	0.15 ± 0.04
Lipides (g/100 g de poids frais)	0.54 ± 0.15
Cendres (g/100 g de poids frais)	0.62 ± 0.09
Vitamine C (mg/100 g de poids frais)	150 ± 16

Tableau I.3. Concentrations en macroéléments dans le piment rouge (g/100 g de poids sec) (**Martínez et al., 2007**).

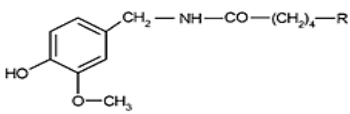

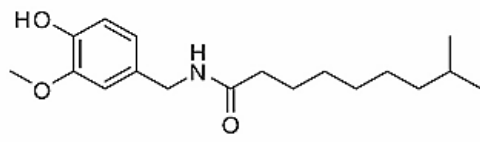
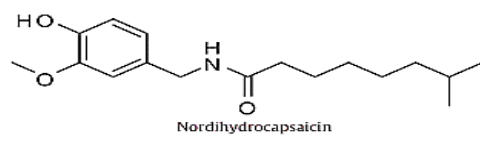
Stade de maturation	Potassium	Magnesium	Calcium	Sodium
Piment rouge	2.519±0.17	0.109±0.01	0.079±0.01	0.0189±0.004

I.5. Propriétés biochimiques du piment rouge

Capsicum annuum L., est une source importante de composés bioactifs aux propriétés bénéfiques pour la santé, notamment des antioxydants. Premièrement, les capsaïcinoïdes, responsables de la saveur piquante des piments, se distinguent par leurs remarquables propriétés antioxydantes. Ils agissent en neutralisant les radicaux libres et en prévenant le stress oxydatif, protégeant ainsi les érythrocytes humains contre la peroxydation des lipides et la formation de

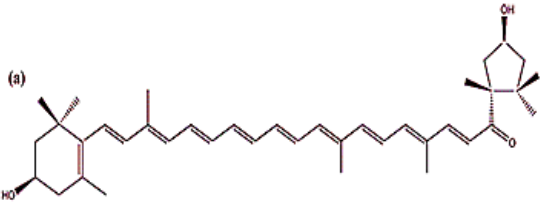
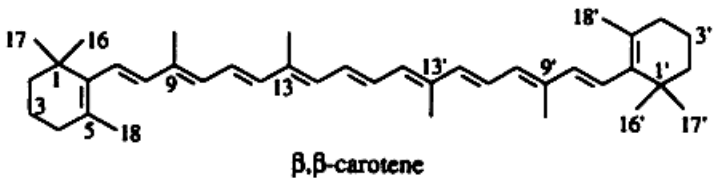
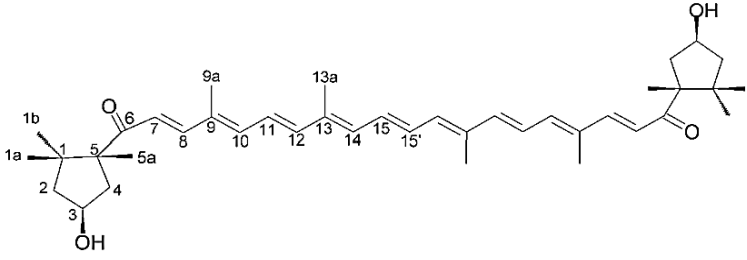
carbonyle (Luqman et Rizvi, 2006). Ces composés, incluant la capsaïcine, la dihydrocapsaïcine, la nordihydrocapsaïcine et leurs analogues, présentent une activité antioxydante significative dans divers systèmes *in vitro* (Rosa et al., 2002) (Tab.I.4). De plus, les capsaïcinoïdes ont démontré de multiples effets pharmacologiques, tels que des propriétés analgésiques, anticancéreuses, anti-inflammatoires et anti-obésité (Luo et al., 2011).

Tableau I.4. Structures chimiques de capsaïcinoïdes du *C. annum* L.

	Capsaïcinoïdes	(Materska et Perucka, 2005)
 <p style="text-align: center;">Capsaicin</p>	Capsaicine	(Knotkova et al., 2008)
	Dihydrocapsaïcine	(Choi et al., 2010)
 <p style="text-align: center;">Nordihydrocapsaicin</p>	Nordihydrocapsaïcine	(Luo et al., 2011)

En parallèle, les piments rouges sont particulièrement riches en caroténoïdes, notamment la capsanthine, la capsorubine, le β -carotène et la lutéine (Tab. I.5). Ces pigments contribuent à leur couleur intense et confèrent au fruit de puissants bienfaits antioxydants (Mohd Hassan et al., 2019). La capsanthine et la capsorubine, spécifiques aux piments rouges, ont montré une action protectrice contre les dommages à l'ADN en piégeant efficacement les radicaux libres (Villa-Rivera et Ochoa-Alejo, 2020).

Tableau I.5. Structures chimiques de caroténoïdes du *C. annum* L.

	Capsanthine	(Schweiggert <i>et al.</i> ,2005)
 <p style="text-align: center;">β,β-carotene</p>	β -carotène	(Britton, 1995)
	capsorubine	(Requena <i>et al.</i> ,2008)

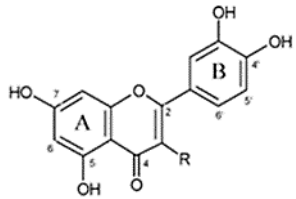
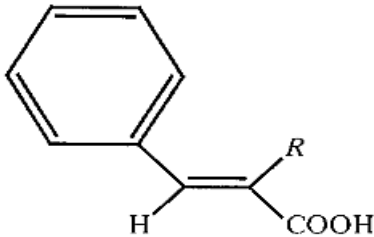
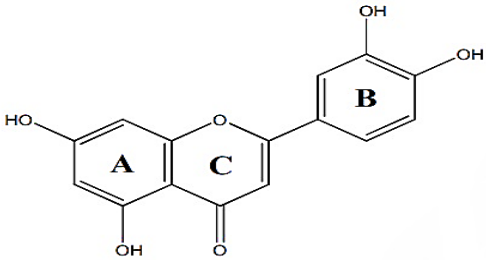
Ces propriétés suggèrent le potentiel des caroténoïdes du piment dans la prévention des maladies dégénératives, L'étude de **Fernández-García *et al.*, (2016)** a démontré que les caroténoïdes présents dans le piment rouge protègent efficacement les cellules cutanées humaines (fibroblastes dermiques) des dommages induits par les rayons UVB, en diminuant à la fois la toxicité cellulaire et les cassures de l'ADN. Ces résultats suggèrent que la capsanthine et la capsorubine, des caroténoïdes spécifiques au piment rouge, pourraient être bénéfiques en tant que compléments alimentaires pour renforcer la protection naturelle de la peau face au soleil.

Outre ses caroténoïdes, le *Capsicum annum* L. renferme une variété d'autres composés bioactifs, notamment des composés phénoliques, polyphénols et des flavonoïdes, qui contribuent significativement à ses propriétés antioxydantes et anti-inflammatoires. Des analyses ont mis en évidence de nombreux composés phénoliques dans le piment, parmi lesquels des dérivés de la

quercétine, des dérivés de l'acide cinnamique (**Jeong *et al.*, 2011**). L'efficacité antioxydante de ces composés a été confirmée par des tests de piégeage du radical DPPH (**Kebu *et al.*, 2024**).

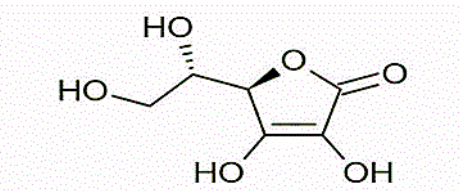
De plus, des recherches ont révélé que les feuilles de piment possèdent des effets antioxydants et anti-inflammatoires plus importants que les fruits (**Tab. I. 6**). Cette observation est probablement due à une concentration plus élevée en flavonoïdes, en particulier en glycosides de lutéoline (**Cho *et al.*, 2020**). Ces résultats suggèrent que *C. annuum*, et plus particulièrement ses feuilles, pourrait constituer une source précieuse d'antioxydants naturels pour les industries alimentaires et pharmaceutiques (**Kebu *et al.*, 2024**).

Tableau I.6. Structures chimiques des composés phénoliques du *C. annuum* L.

	Quercétine	(Materska et Perucka, 2005)
	Acide cinnamique	(Pálinkó, 1999)
	lutéoline	(Liu <i>et al.</i>, 2013)

Enfin et surtout, le piment rouge est une riche source de vitamine C (acide ascorbique), un puissant antioxydant (Villa-Rivera et Ochoa-Alejo, 2023) (Tab. I.7). L'acide ascorbique joue un rôle crucial dans le métabolisme des cellules végétales et la santé humaine, en agissant comme un tampon redox et un piègeur de radicaux libres (Villa-Rivera et Ochoa-Alejo, 2023). Les niveaux d'ascorbate dans les fruits du piment restent relativement stables pendant la maturation et face à divers stress environnementaux, soulignant son importance dans la physiologie et la stabilité du fruit (Palma *et al.*, 2011). La teneur en acide ascorbique des piments peut varier de 86 à 96 mg pour 100 g de poids frais, ce qui en fait une excellente source alimentaire de cette vitamine essentielle (Kouassi et Cote D'ivoire, 2010).

Tableau I.7. Structures chimiques d'acide ascorbique du *C. annum* L.

	Acide ascorbique	(Villa-Rivera et Ochoa-Alejo, 2023)
---	------------------	-------------------------------------

I.6. Activités Biologiques de *Capsicum annum* L

I.6.1.1. Activité Antioxydante

Le stress oxydatif, résultant d'une production excessive de radicaux libres, a été impliqué dans diverses maladies chroniques, notamment les troubles cardiovasculaires, le cancer et les conditions inflammatoires (Srinivasan, 2014). Les antioxydants sont des composés qui entravent les processus oxydatifs et retardent ou suppriment ainsi le stress oxydatif. Les antioxydants naturels présents dans les plantes suscitent un intérêt croissant (Srinivasan, 2014).

Les piments rouges se distinguent par leur importante capacité antioxydante, une propriété que l'on retrouve à la fois dans leurs graines et leur péricarpe (Sim et Han Young Sil, 2008). Cette activité puissante est largement due à la présence d'une forte concentration de composés bioactifs, notamment des polyphénols, des flavonoïdes et des acides phénoliques (Mňahončáková *et al.*, 2021). Ces antioxydants jouent un rôle crucial dans la protection du corps et des aliments contre les dommages oxydatifs causés par les radicaux libres et les espèces réactives de l'oxygène (Nadeem *et al.*, 2011).

Plus précisément, les composés phénoliques, tels que la capsaïcine, contribuent à la capacité des piments rouges à potentiellement prévenir ou atténuer les maladies liées au stress oxydatif. Des études ont montré que les extraits du péricarpe et des graines de piments rouges présentent de forts effets antioxydants lorsqu'ils sont évalués par diverses méthodes, notamment les tests de piégeage des radicaux DPPH, anion superoxyde, hydroxyle et ABTS, ainsi que les tests d'activité de chélation des ions ferreux, d'activité de la superoxyde dismutase (SOD) et de pouvoir réducteur. Bien que les deux parties du piment contribuent au profil antioxydant, le péricarpe est particulièrement efficace dans la chélation des ions ferreux et le piégeage des radicaux hydroxyle et DPPH, tandis que les graines démontrent une activité SOD et un piégeage des radicaux anion superoxyde plus élevés. Cette activité antioxydante aux multiples facettes souligne la valeur des piments rouges dans les applications nutritionnelles et nutraceutiques, offrant des avantages potentiels pour la santé cardiovasculaire et la protection contre les dommages oxydatifs (**Sim et Han Young Sil, 2008**).

I.6.1.2. Activité Anti-inflammatoire

La recherche a examiné de manière approfondie les propriétés anti-inflammatoires d'extraits obtenus de diverses variétés de piment rouge (*Capsicum annuum*) en utilisant des modèles animaux, afin de mieux comprendre leur potentiel thérapeutique. L'efficacité anti-inflammatoire de ces extraits est rigoureusement quantifiée par la mesure de la réduction de l'œdème pour donner suite à leur administration. Les résultats de ces études ont clairement indiqué que ces extraits possèdent une activité anti-inflammatoire notable et significative, se manifestant de façon constante par une diminution significative de l'œdème chez les animaux testés (**Mazhar et al., 2021**). Cette observation souligne le potentiel des piments rouges à atténuer les réponses inflammatoires aiguës.

De plus, les données scientifiques accumulées suggèrent que le mécanisme d'action précis derrière cette activité anti-inflammatoire pourrait impliquer l'inhibition ciblée de certaines enzymes pro-inflammatoires clés (**Mazhar et al., 2021**). Les enzymes pro-inflammatoires, telles que la cyclooxygénase (COX) et la lipoxigénase (LOX), jouent un rôle crucial dans la cascade inflammatoire en catalysant la production de médiateurs inflammatoires comme les prostaglandines et les leucotriènes. L'inhibition de ces enzymes peut donc conduire à une réduction de la synthèse de ces médiateurs, ce qui contribue à diminuer l'inflammation. Cette action ciblée suggère que *Capsicum annuum* ne se contente pas de masquer ou de réduire les symptômes apparents de l'inflammation, mais qu'il pourrait également agir au niveau moléculaire pour moduler activement les processus biologiques sous-jacents qui initient et perpétuent la réponse inflammatoire.

I.6.1.3. Activité Antimicrobienne

Une autre voie de recherche a mis en évidence une activité antimicrobienne significative du piment rouge (*Capsicum annuum* L.) contre diverses bactéries et champignons multirésistants. Les extraits de *C. annuum* se sont révélés efficaces contre les bactéries Gram-positives et Gram-négatives, y compris *Vibrio cholerae*, *Staphylococcus aureus* et *Salmonella typhimurium* (**Koffi-Nevry et al., 2012**). L'activité antimicrobienne s'étend aux souches multirésistantes de *Listeria monocytogenes* et d'*Escherichia coli*, ainsi qu'aux champignons comme *Candida albicans* et *Cryptococcus neoformans* (**Anikwe et al., 2017**).

L'analyse phytochimique de ces extraits a révélé la présence d'alcaloïdes, de flavonoïdes, de polyphénols et de stérols (**Koffi-Nevry et al., 2012**), ce qui suggère leur rôle potentiel en tant qu'agents antimicrobiens naturels pour la conservation des aliments et les applications médicinales.

Chapitre II :

**Impact de quelques facteurs
physiques sur l'activité
antioxydante du piment rouge**

Chapitre II. Impact de quelques facteurs physiques sur l'activité antioxydante du piment rouge

II.1. Effet de la température

Les recherches démontrent régulièrement que la température influence de manière significative l'activité antioxydante de diverses substances. En effet, les acides phénoliques présentent une diminution de leur activité antioxydante avec l'augmentation de la température (**Réblová, 2018**). De plus, l'efficacité des antioxydants peut varier considérablement en fonction de la température, mais également de la composition et de la structure des aliments.

Par ailleurs, l'étude de **Shotorbani et al., (2013)**, est concentrée sur l'évaluation de l'impact de la température sur l'activité antioxydante de piment rouge (*Capsicum annuum* L.), cultivé dans la région de Shahreza, Esfahan. La méthodologie employée pour l'extraction des composés antioxydants de ce piment rouge comprenait plusieurs étapes essentielles.

Diverses mesures ont été effectuées pour caractériser l'activité antioxydante de l'extrait de piment rouge. Cela comprenait la quantification de deux classes d'antioxydants : les phénols (avec le réactif de Folin-Ciocalteu) et les flavonoïdes. On a également mesuré l'activité de piégeage du radical DPPH (qui reflète la capacité à neutraliser les radicaux libres) et le pouvoir réducteur (FRAP), qui indique la capacité à donner des électrons.

Les résultats obtenus à la suite de ces analyses ont révélé que l'extrait de piment rouge a présenté une variation des propriétés antioxydantes en fonction de la température. Plus précisément, la teneur totale en phénols et en flavonoïdes augmentait à mesure que la température s'élevait jusqu'à 65°C (**Fig. II.1**), ce qui indique que la chaleur facilite la libération de ces composés antioxydants, mais qu'une exposition prolongée à la chaleur peut entraîner leur dégradation. La capacité de l'extrait à neutraliser les radicaux libres (piégeage du DPPH) était également sensible à la température, avec une activité maximale après 30 minutes à 50°C. De plus, le pouvoir Antioxydant Réducteur Ferrique (FRAP) augmentait avec la température, atteignant un pic à 65°C (**Fig. II.2**).

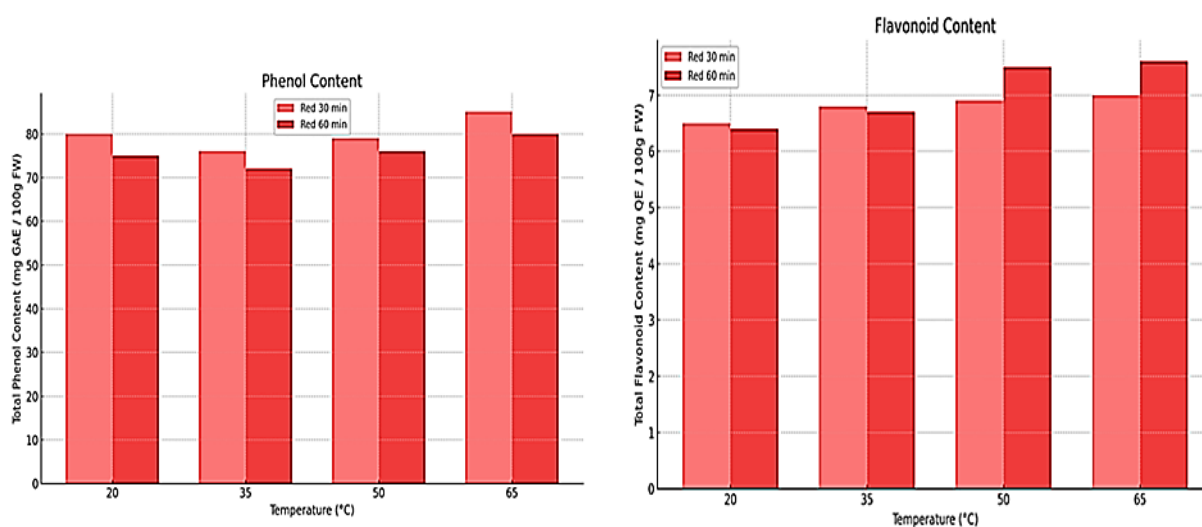


Figure II.1. Teneur totale en composés phénoliques et flavonoïdes en fonction de la température pour 30 min et 60 min (Shotorbani *et al.*,2013).

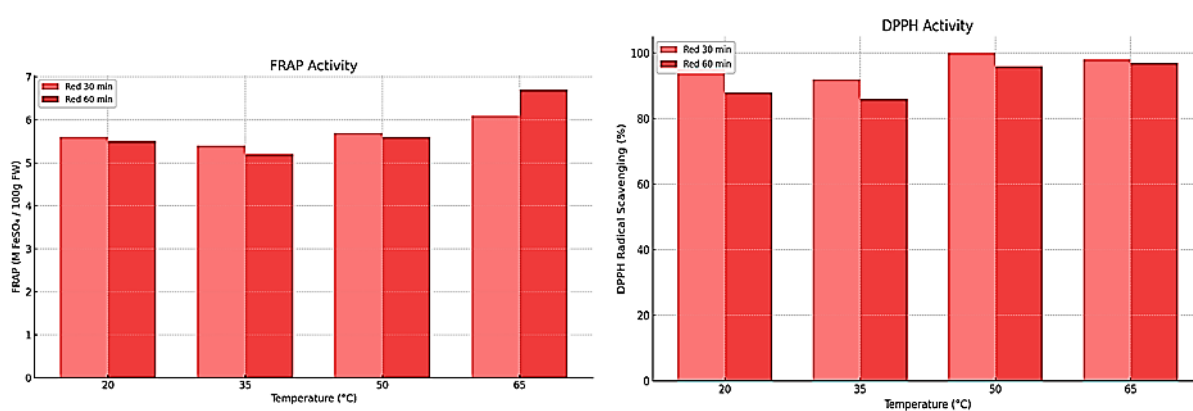


Figure II.2. Activité antioxydante FRAP et DPPH en fonction de la température pour 30 min et 60 min (Shotorbani *et al.*,2013).

Ces résultats mettent en lumière une interaction nuancée entre la température et diverses mesures de l'activité antioxydante. La recherche a démontré que l'extraction des composés phénoliques et flavonoïdes, qui sont des antioxydants connus, dépend de la température. En effet, leurs niveaux augmentent généralement avec l'élévation de la température, atteignant un pic à 65 °C. Cela suggère que la chaleur facilite la libération de ces composés à partir de la matrice végétale. Cependant, une exposition prolongée à la chaleur, en particulier sur des durées plus longues, peut

entraîner une diminution de ces composés, indiquant une potentielle dégradation thermique. De plus, l'étude a évalué l'effet de la température sur la capacité de l'extrait à neutraliser les radicaux libres en utilisant le test DPPH. Les résultats ont montré que l'activité maximale était atteinte après 30 minutes à 50 °C, soulignant que cette température et cette durée spécifiques optimisent la capacité de piégeage des radicaux. Le pouvoir antioxydant réducteur ferrique (FRAP), une autre mesure de la capacité antioxydante, a également montré une augmentation dépendante de la température, atteignant sa valeur la plus élevée à 65 °C. Cela implique que des températures plus élevées améliorent la capacité de l'extrait à réduire les ions ferriques et donc son potentiel antioxydant. Dans l'ensemble, les résultats montrent que, bien que des températures élevées puissent améliorer l'extraction et l'activité de certains composants antioxydants, il est crucial de prendre en compte la durée d'exposition à la chaleur pour prévenir la dégradation et préserver la qualité antioxydante globale des extraits de piment rouge (**Shotorbani et al., 2013**).

Parallèlement à cette étude, **L'étude de Ping et al., (2019)**, examine les effets de la température de séchage sur la préservation des composés bioactifs et l'activité antioxydante du fruit de piment rouge (*Capsicum annuum* L.). Le processus de séchage a été réalisé dans un four à air chaud, à 60°C ou 90°C, pendant 3, 6, 21 et 23 heures.

L'extraction des métabolites a permis d'analyser :

- La teneur totale en composés phénoliques (TPC) par la méthode de Folin-Ciocalteu.
- La teneur totale en flavonoïdes (TFC) par la méthode colorimétrique au chlorure d'aluminium.
- Ainsi que la capsaïcine (CAP) et la dihydrocapsaïcine (DHC) par HPLC.

Les capsaïcinoïdes ont également été identifiés et confirmés par GC-MS (chromatographie en phase gazeuse couplée à la spectrométrie de masse).

Enfin, l'activité antioxydante a été déterminée à l'aide de trois tests :

- Le FRAP.
- Le DPPH.
- Le ABTS, tous trois permettant d'évaluer la capacité de piégeage des radicaux libres.

Le processus de séchage a considérablement modifié la composition en composés bioactifs et l'activité antioxydante des piments. Plus précisément, la teneur totale en composés phénoliques (TPC) et la teneur totale en flavonoïdes (TFC), deux composantes antioxydantes importantes, ont augmenté au cours du séchage. Cependant, des niveaux plus élevés de ces composés ont

généralement été observés lorsque le séchage était effectué à 60°C par rapport à 90°C (**Fig. II.3**), ce qui suggère que les températures plus basses les préservent mieux. De même, les niveaux de capsaïcine (CAP) et de dihydrocapsaïcine, responsables du piquant du piment, ont également augmenté avec le séchage, avec des quantités plus importantes retenues à 60°C (**Fig. II.4**). La présence de divers dérivés de capsaïcinoïdes a été confirmée par l'analyse GC-MS (**Fig. II.5**).

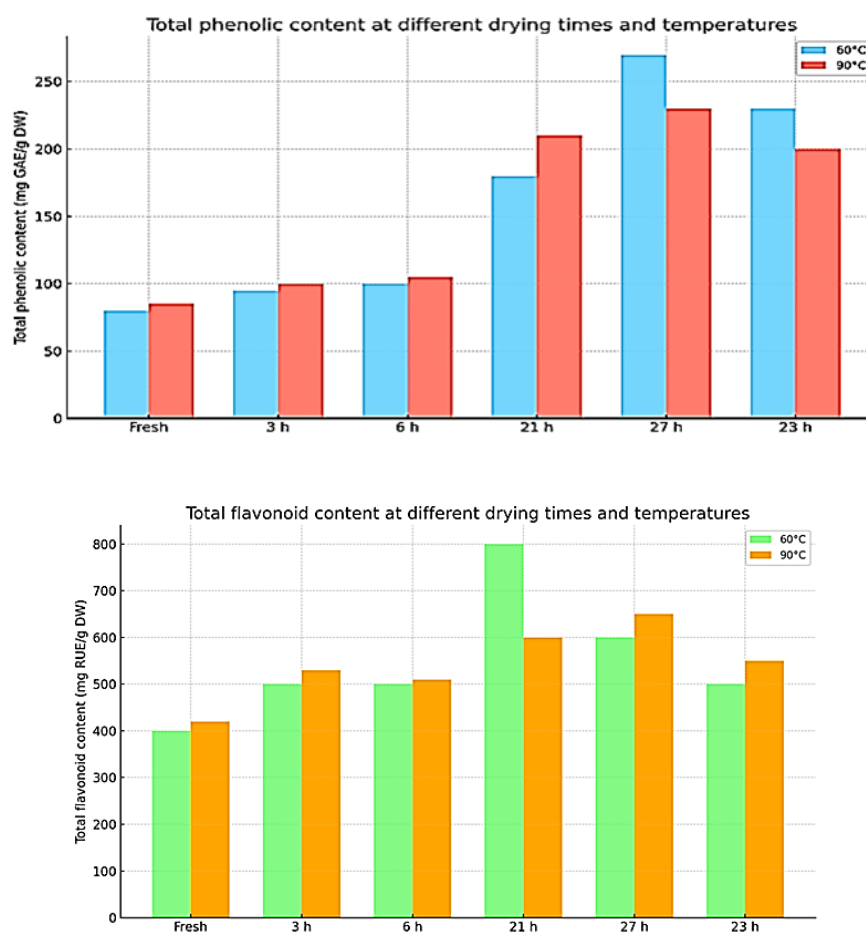


Figure II.3. Contenu total en composés phénoliques et flavonoïdes (mg GAE/g DW) selon différentes durées de séchage à 60°C et 90°C (Ping *et al.*, 2019).

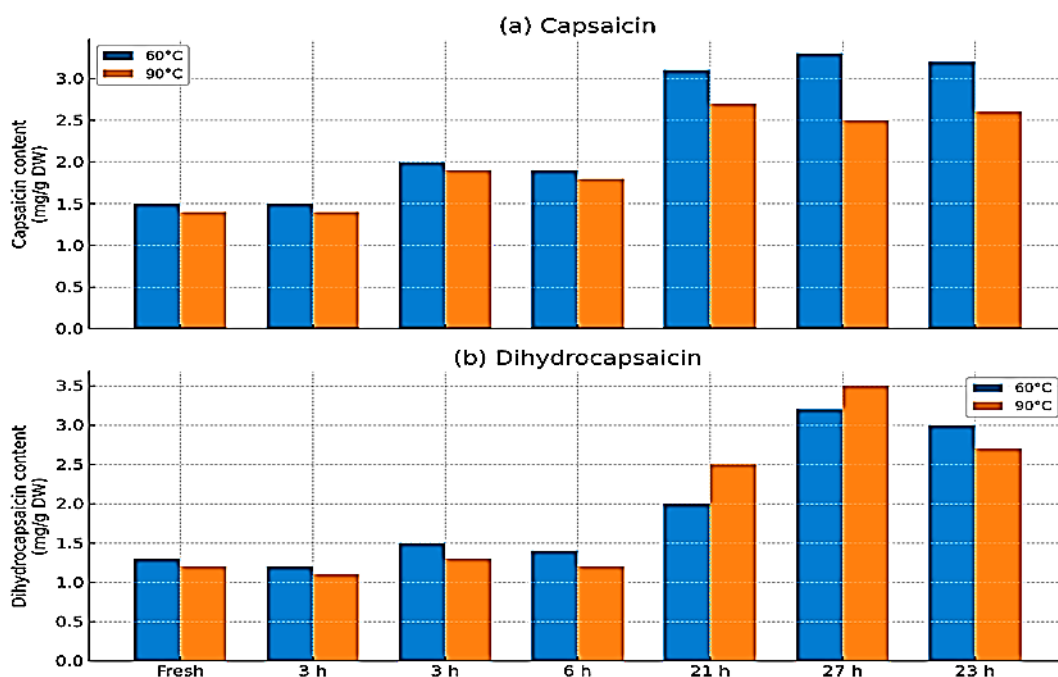


Figure II.4. Contenu total en composés phénoliques et flavonoïdes (mg GAE/g DW) selon différentes durées de séchage à 60°C et 90°C (Ping *et al.*, 2019).

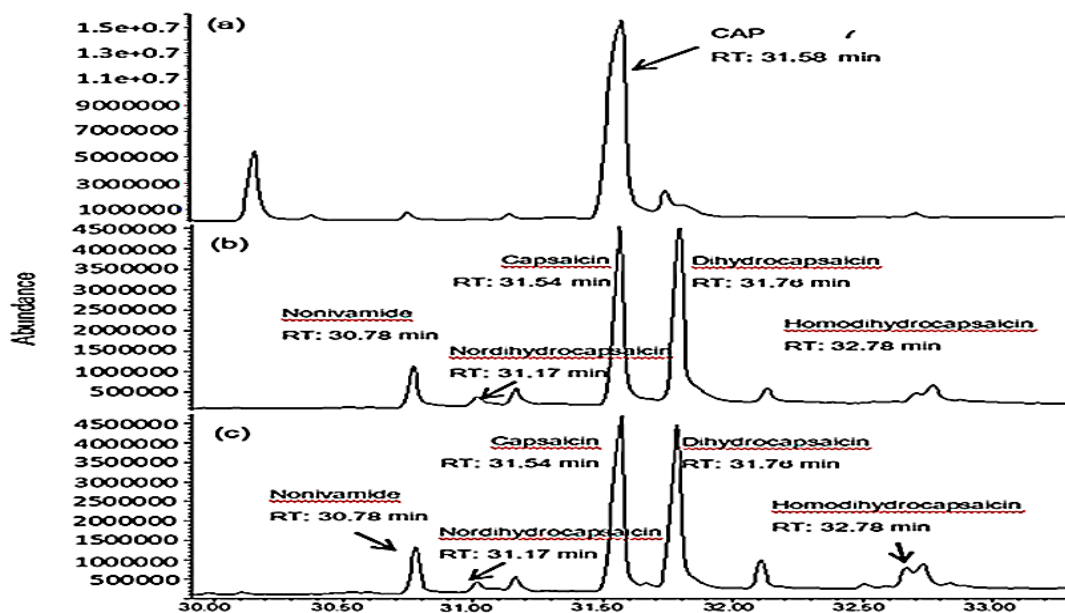


Figure II.5. Chromatogramme ionique de (a) l'étalon de capsaïcine, (b) de l'extrait à 60 °C et (c) de l'extrait à 90 °C à 6 h (Ping *et al.*, 2019).

En termes d'activité antioxydante, les mesures utilisant les tests FRAP et ABTS ont indiqué une augmentation avec le séchage, avec une activité généralement plus élevée trouvée à 90°C, ce qui indique potentiellement la formation de différents composés antioxydants à la température plus élevée. À l'inverse, le test DPPH a révélé une tendance contrastée, montrant une activité antioxydante plus élevée à 60°C vers les derniers stades du séchage, ce qui implique que différents composés antioxydants sont plus efficacement préservés ou actifs dans ces conditions de température plus basse (Fig. II.6)

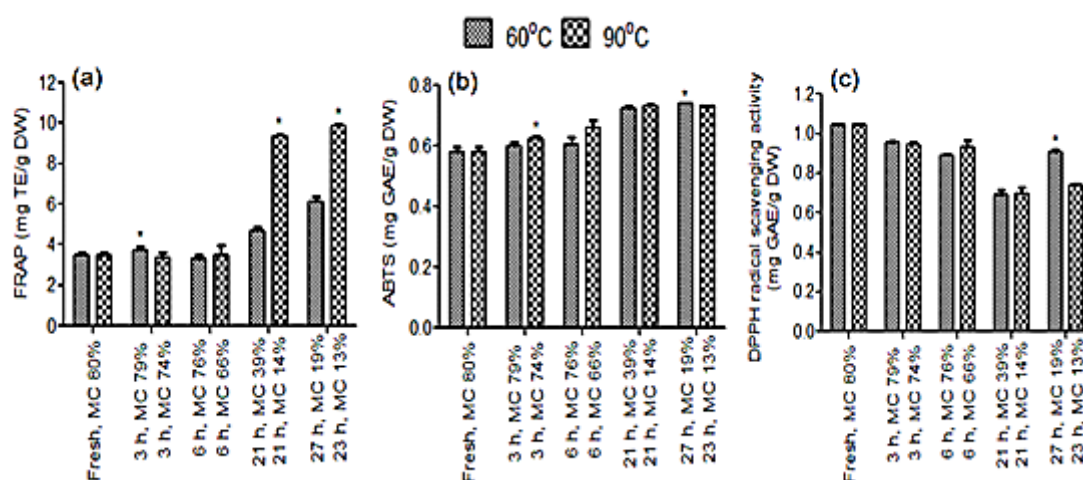


Figure II.6. Effets de la température de séchage (60 °C et 90 °C) et de la durée sur l'activité de piégeage des radicaux (a) FRAP, (b) ABTS et (c) DPPH (Ping *et al.*, 2019).

En outre, Park *et al.*, (2024), ont mené une étude pour examiner l'influence de la température de stockage sur l'activité antioxydante du paprika et sa capacité à être conservé. L'objectif principal était d'identifier les conditions de stockage idéales qui permettraient de maintenir, voire d'améliorer, les propriétés antioxydantes du paprika, tout en préservant sa qualité et sa commercialisation. Pour préparer les échantillons de paprika, les auteurs ont suivi un protocole d'extraction spécifique. Les échantillons lyophilisés ont été broyés, puis extraits à l'aide de solutions de méthanol et d'eau, ainsi que d'acétone et d'eau.

Les résultats de l'étude indiquent que le paprika stocké à 10°C présentait une activité antioxydante plus élevée que celui stocké à 4°C et 20°C. Ceci a été mis en évidence par l'activité plus importante de l'acide 2,2'-azino-bis (3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique) (ABTS) observée dans les échantillons à 10°C. De plus, le paprika stocké à 10°C avait également une teneur totale

en composés phénoliques plus élevée par rapport aux autres températures de stockage. L'amélioration de l'activité antioxydante dans le paprika stocké à 10°C a été associée à une augmentation de l'expression des gènes codant pour les enzymes antioxydantes. Plus précisément, les niveaux d'expression des gènes de la catalase et de la peroxydase étaient plus élevés dans le paprika stocké à 10°C (**Fig. II.7**).

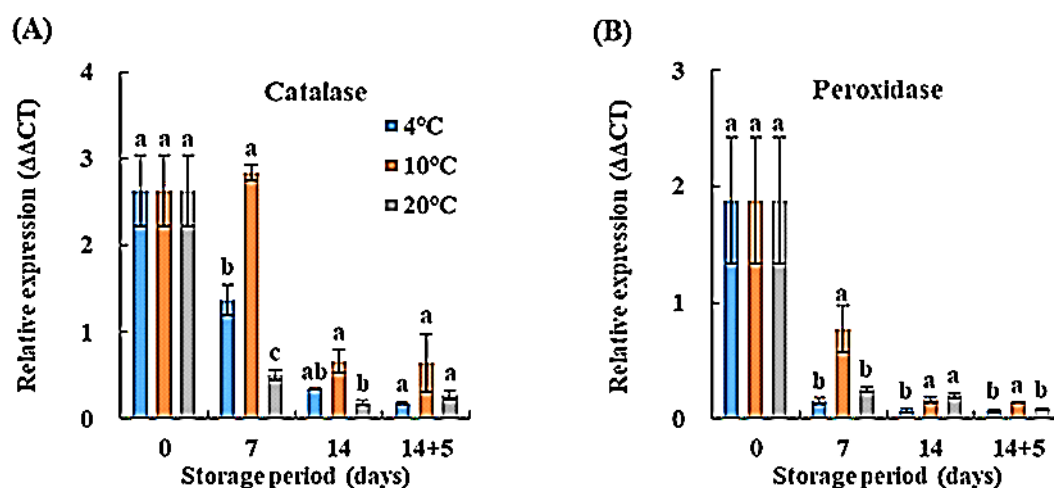


Figure II.7. Effet de la température de stockage sur l'expression des gènes codant pour les enzymes antioxydantes du paprika stocké à 4, 10 et 20°C pendant 14 jours, suivi de 5 jours supplémentaires à 20°C (**Park et al., 2024**).

Les études examinées mettent en lumière la complexité de l'influence de la température sur l'activité antioxydante des piments et du paprika. Plus précisément, l'étude de **Shotorbani et al. (2013)** a révélé que l'activité antioxydante du piment rouge est affectée par la température, avec une augmentation de la teneur en phénols et flavonoïdes jusqu'à 65°C, mais une exposition prolongée à la chaleur peut entraîner leur dégradation, et que l'activité de piégeage du DPPH et le pouvoir antioxydant réducteur (FRAP) varient également en fonction de la température.

Parallèlement, **Ping et al. (2019)** ont constaté que la température de séchage influence la composition en composés bioactifs et l'activité antioxydante du piment rouge, avec des différences observées dans la teneur en phénols, flavonoïdes, capsaïcine et dihydrocapsaïcine, ainsi que dans les activités FRAP, ABTS et DPPH, selon les températures de séchage. De plus, **Park et al. (2024)** ont démontré que la température de stockage affecte l'activité antioxydante du paprika, avec une activité antioxydante plus élevée observée à 10°C par rapport à 4°C et 20°C, et ont associé cela à une influence sur l'expression des gènes des enzymes antioxydantes.

II.2. L'effet de la lumière

La lumière est un facteur environnemental essentiel qui influence directement la Production et la stabilité des composés bioactifs dans les fruits et légumes. Chez le *Capsicum annuum L.*, plusieurs études ont démontré que l'exposition à la lumière qu'elle soit naturelle ou artificielle peut avoir des effets contrastés sur l'activité antioxydante, en fonction de la longueur d'onde, de l'intensité et du moment d'application (culture ou stockage).

Dans ce contexte, une recherche menée par **Hakmaoui *et al.*, (2013)**, s'est intéressée à l'effet de la lumière lors du stockage sur les composants bioactifs et l'activité antioxydante du paprika marocain séché (*Capsicum annuum L.*).

Pour étudier spécifiquement cet impact les auteurs ont comparé des échantillons stockés à l'obscurité avec d'autres exposés à la lumière ("photo-périodicité"). Les tests essentiels utilisés pour quantifier l'impact de cette différence d'exposition lumineuse étaient :

- Dosage des polyphénols totaux (Méthode Folin-Ciocalteu).
- Dosage des flavonoïdes totaux (Méthode au chlorure d'aluminium).
- Mesure de l'activité antioxydante (Test DPPH).

Les résultats indiquent que les piments exposés à la lumière perdaient leurs composés protecteurs naturels (polyphénols et flavonoïdes) beaucoup plus rapidement que ceux conservés à l'abri de la lumière (Cette dégradation chimique, causée par la lumière, a directement affaibli la capacité du paprika à neutraliser les radicaux libres, ce qui signifie une baisse de son activité antioxydante globale par rapport au paprika gardé dans l'obscurité (**Hakmaoui *et al.*, 2013**). Par conséquent l'exposition à la lumière (photopériodicité) entraîne une diminution significative des Concentrations en flavonoïdes et polyphénols, ainsi qu'une baisse de l'activité antioxydante globale. En revanche, les échantillons conservés à l'obscurité conservent mieux leurs propriétés antioxydantes, ces résultats sont visibles à travers ces (**Fig.I. 8, 9, 10**).

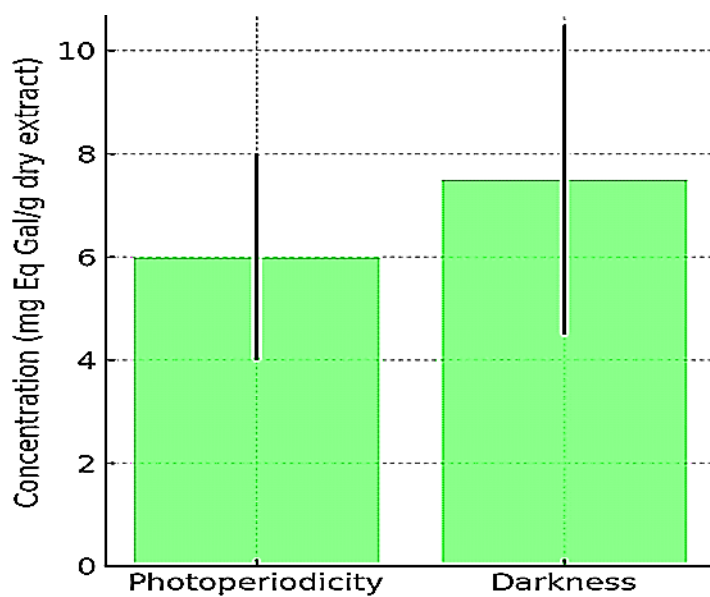


Figure II.8. Effet de la lumière et de l'obscurité sur les composés phénolique (Hakmaoui *et al.*, 2013).

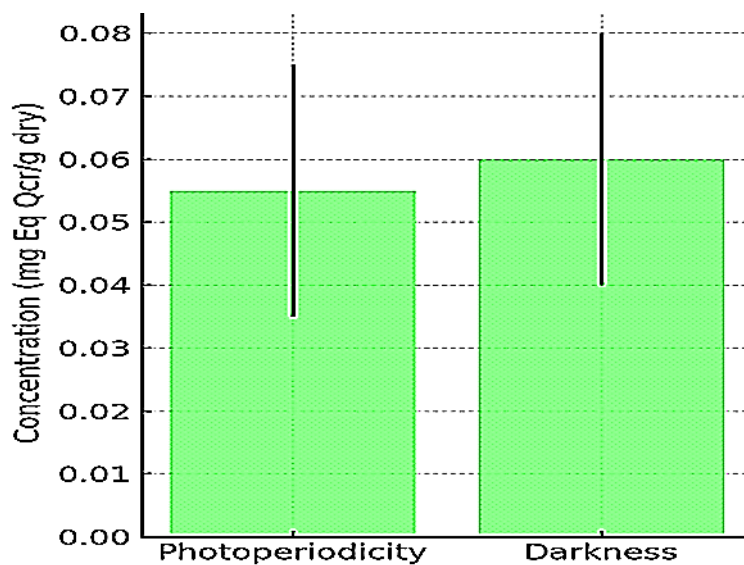


Figure II.9. Effet de la lumière sur les flavonoïdes (Hakmaoui *et al.*, 2013).

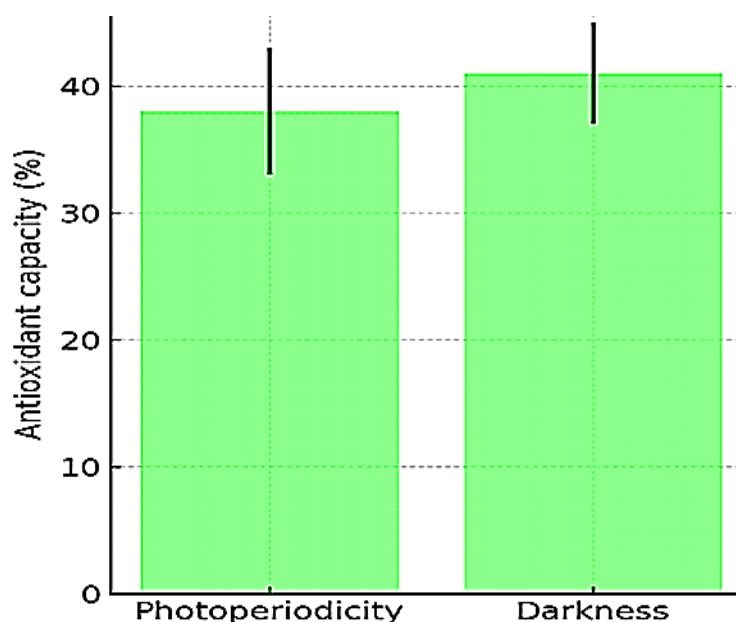


Figure II.10. Effet de la lumière sur la capacité antioxydants (Hakmaoui *et al.*, 2013).

Les figures montrent :

- Une concentration plus élevée de composés phénoliques et de flavonoïdes dans les échantillons conservés à l'obscurité.
- Une réduction significative de l'activité antioxydante dans les échantillons exposés à la lumière, mesurée par les tests DPPH et FRAP.
- Ces résultats soulignent l'importance de contrôler l'exposition lumineuse pendant le Stockage pour préserver la valeur nutritionnelle et l'activité antioxydante des *Capsicum annuum* L.

Cette dégradation photochimique des molécules antioxydantes du *Capsicum annuum* L. altère leur structure chimique, diminuant ainsi leur capacité à neutraliser les radicaux libres et réduisant leur activité antioxydante globale. Il est donc crucial de protéger le paprika de la lumière afin de maintenir son intégrité biochimique et ses propriétés protectrices.

La lumière agit comme un stress chimique sur le paprika séché. L'exposition à la lumière accélère la dégradation des composés phénoliques et réduit l'activité antioxydante, car l'énergie lumineuse endommage directement la structure de ces molécules protectrices. Cela diminue leur

efficacité contre les radicaux libres. Par conséquent, il est crucial de conserver le *Capsicum annuum* L. à l'obscurité pour maintenir sa qualité et ses propriétés bénéfiques.

Dans une autre étude complémentaire, **Morais et al., (2002)**, ont analysé plus spécifiquement comment l'exposition à la lumière influence la stabilité des pigments antioxydants, bêta-carotène et capsanthine, dans *Capsicum annuum* L., pendant sa conservation. En comparant des échantillons stockés à l'obscurité à d'autres exposés à une lumière fluorescente, les chercheurs ont utilisé des analyses statistiques pour isoler l'effet de la lumière.

L'exposition à la lumière a été identifiée comme un facteur accélérant la photo-oxydation des pigments, un processus où l'énergie lumineuse favorise la formation d'espèces réactives de l'oxygène (ROS) ou excite directement les molécules de caroténoïdes. Ces événements mènent à l'attaque et à la rupture du système de doubles liaisons conjuguées du β -carotène et de la capsanthine, entraînant leur dégradation et la perte de couleur observée. L'analyse a montré que cet effet était particulièrement significatif pour le β -carotène.

De plus, l'interaction significative entre la lumière et l'acide ascorbique (AcA) suggère un mécanisme où l'AsA agit efficacement comme agent piègeur des ROS photogénérés, offrant ainsi une protection biochimique accrue contre la dégradation oxydative spécifiquement induite par la lumière. Ces résultats soulignent donc que la lumière agit comme un catalyseur de réactions oxydatives délétères pour les antioxydants caroténoïdes dans la poudre de piment stockée.

Il apparaît également que la lumière interagit avec la durée de stockage, accélérant la dégradation au fil du temps, et elle interagit aussi avec l'acide ascorbique, rendant la protection par cet antioxydant particulièrement importante sous illumination. Bien que ces interactions soient secondaires par rapport à l'effet du temps ou de la concentration d'acide ascorbique seule, la conclusion pratique est qu'il faut protéger le *Capsicum annuum* L. de la lumière pour préserver sa qualité.

Par ailleurs, **Azad et al., (2011)**, ont démontré que différentes couleurs de lumière LED influencent fortement la teneur en composés photochimiques. La lumière bleue stimule la synthèse des anthocyanes et de la chlorophylle, deux antioxydants majeurs, tandis que la lumière rouge augmente les phénols totaux. En revanche, la lumière rouge lointain diminue l'acide ascorbique et la capacité antioxydante globale. Cela confirme que la qualité spectrale de la lumière peut être exploitée pour optimiser la production de composés bénéfiques (**Tab. II.1**).

Tableau II.1. Effet des qualités de lumière d'appoint sur la teneur en composés phytochimique des plantules de piments (Azad *et al.*, 2011).

Traitement	Acide ascorbique (mg/g FW)	Anthocyanine (mg/g DW)	Activité antioxydante (mmol TE Y /g DW)	Teneur en chlorophylle (mg/g FW)	Composé phénolique Mg GAE X/G DW)
bleu	0,50 cZ	0,073 a	0,011 bc	1,68 a	0,117 b
rouge	0,51 c	0,055 b	0,013 b	1,37 b	0,138 a
Bleu +Rouge	0,55 b	0,013 d	0,013 b	1,23 c	0,054 e
Rouge lointain	0,41 d	0,057 b	0,008 c	1,18 d	0,083 d
UVB	0,56 b	0,033 c	0,012	1,21 cd	0,091 c
Témoin	0,59 a	0,011 d	0,018	0,66 e	0,054 e

Une étude complémentaire, menée par **Kokalj *et al.*, (2016)**, s'est intéressée à l'effet de la lumière LED jaune (590 nm) sur la conservation post-récolte du *Capsicum annum* L. Contrairement à la lumière naturelle ou blanche, la lumière jaune LED a permis une augmentation significative de l'activité antioxydante, ainsi qu'une hausse des niveaux de β -carotène, α -tocophérol et γ -tocophérol, trois antioxydants majeurs. Ces résultats suggèrent que certaines longueurs d'onde, appliquées de manière ciblée, peuvent préserver, voire améliorer, les propriétés nutritionnelles des poivrons durant le stockage.

L'ensemble de ces recherches permet de conclure que la lumière joue un rôle ambivalent :

- Pendant la culture, certaines lumières (bleue, rouge) peuvent stimuler la production d'antioxydants.
- Pendant le stockage, une exposition mal maîtrisée à la lumière peut dégrader ces composés, sauf dans le cas d'un éclairage adapté (comme la LED jaune).

Ainsi, il est essentiel d'adapter les conditions lumineuses au moment spécifique du cycle de vie du fruit. Stimuler pendant la croissance, protéger pendant le stockage.

Ces connaissances ouvrent des perspectives importantes pour les pratiques agronomiques et les techniques de conditionnement post-récolte.

II.3. Effet de l'humidité

L'humidité joue un rôle déterminant dans l'activité antioxydant du *Capsicum annuum* L., comme le soulignent plusieurs études. La teneur en eau influence significativement la concentration des composés bioactifs et la capacité antioxydant du poivre rouge durant les processus de stockage et de séchage (**Hakmaoui et al., 2013**).

En particulier, les polyphénols, des antioxydants importants, sont fortement affectés par les niveaux d'humidité lors du stockage du *Capsicum annuum* L. (**Hakmaoui et al., 2013**).

Dans ce contexte, la recherche de **Hakmaoui et al. (2013)**, a examiné l'influence de l'humidité sur l'activité antioxydante du piment rouge. Pour ce faire, une variété marocaine de piment rouge (*Capsicum annuum* L.) a été utilisée. Les piments, récoltés à pleine maturité, ont été séchés puis broyés. L'activité antioxydante a été analysée à partir d'extraits méthanoliques, en évaluant leur capacité à piéger les radicaux libres grâce au test DPPH. Parallèlement, la teneur totale en polyphénols a été quantifiée par la méthode de Folin-Ciocalteu, et la teneur en flavonoïdes a été estimée via une méthode colorimétrique utilisant le chlorure d'aluminium.

Les données obtenues ont mis en évidence une variation des composés antioxydants en fonction des conditions de température et d'humidité. Concernant les polyphénols, les concentrations les plus élevées ont été observées à un taux d'humidité de 4%. Cependant, une augmentation de l'humidité à 7% a entraîné une diminution notable de ces composés. Bien qu'une légère hausse ait été parfois mesurée à 12% d'humidité, les niveaux n'ont pas égalé ceux obtenus à 4%. Ainsi, une humidité plus faible, autour de 4%, semble optimale pour préserver les polyphénols dans le paprika, indépendamment de la température (**Fig. II.11**).

De même, la concentration en flavonoïdes, une autre classe d'antioxydants, est influencée par l'humidité. La concentration maximale en flavonoïdes a été systématiquement constatée lorsque le *Capsicum annuum* L., est conservé à 4% d'humidité. En revanche, une augmentation de l'humidité à 7% a provoqué une diminution significative de cette concentration. Une humidité de 12% a pu induire une légère augmentation par rapport à 7%, mais les valeurs sont restées inférieures à celles observées à 4%. En somme, une humidité élevée durant le stockage impacte

négativement la teneur en flavonoïdes, et une humidité plus faible, proche de 4%, est préférable pour maintenir leur concentration et les propriétés antioxydantes associées (**Fig. II. 12**).

Dans la continuité de ses résultats, l'effet de l'humidité sur l'activité antioxydante globale a également été évalué par le test DPPH à 28°C et 45°C. Les résultats ont clairement indiqué que l'activité antioxydante la plus importante est systématiquement mesurée lorsque le *Capsicum annuum* L., est stocké à 4% d'humidité. En parallèle, une augmentation des niveaux d'humidité à 7% et 12% s'est traduite par une diminution progressive de cette activité antioxydante (**Fig. II.13**).

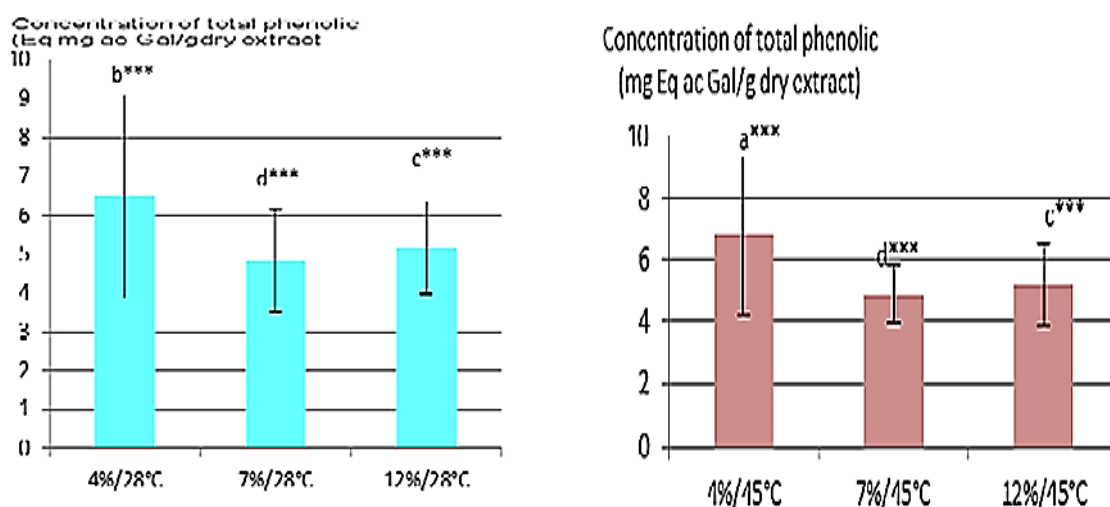


Figure II.11. Effet de la teneur en humidité sur les polyphénols du paprika à 28°C et à 45 °C (**Hakmaoui et al., 2013**).

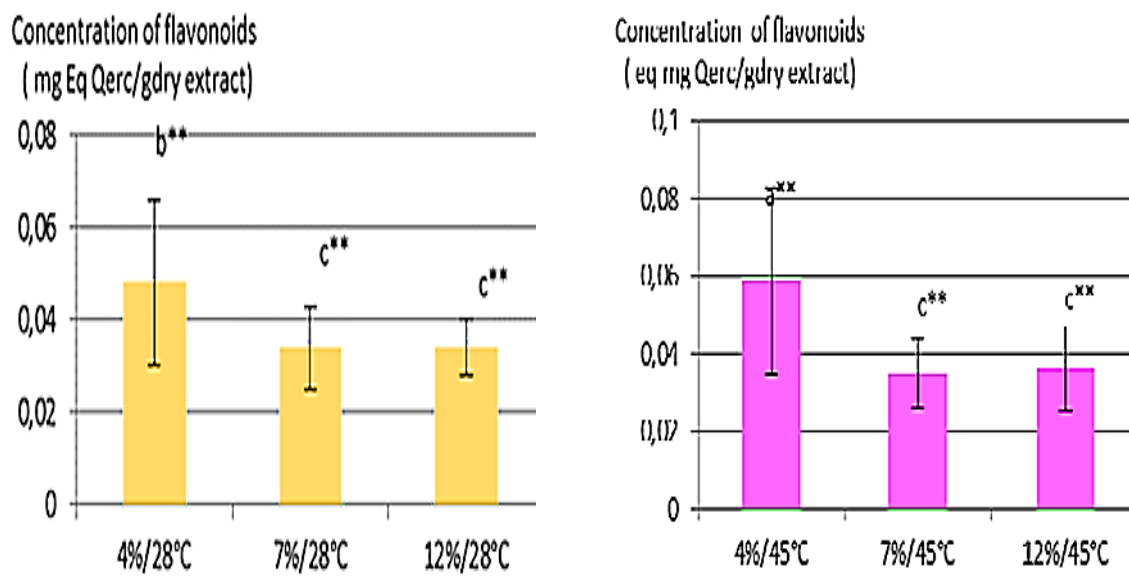


Figure II.12. Effet de la teneur en humidité sur les flavonoïdes du paprika à 28°C et à 45 °C

(Hakmaoui *et al.*, 2013).

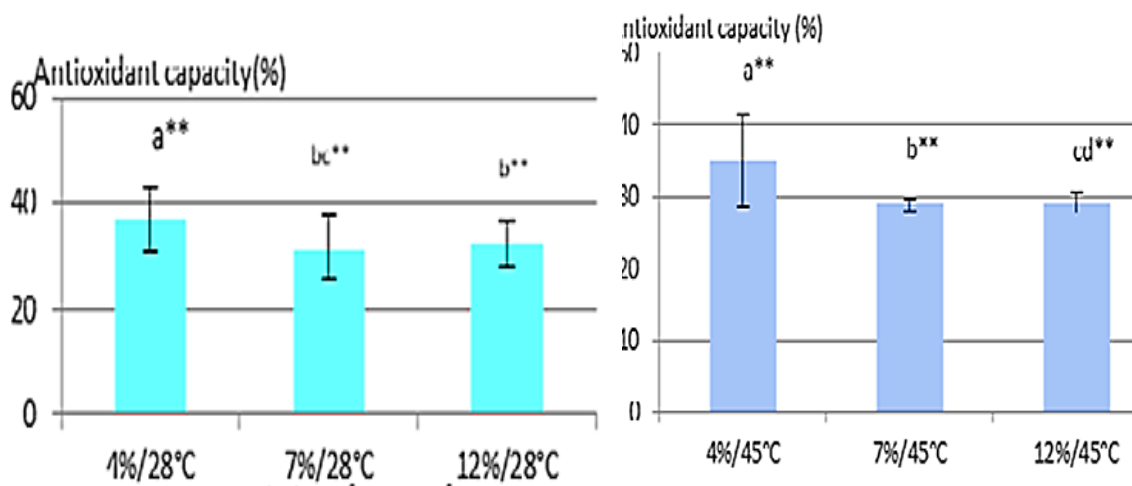


Figure II.13. Effet de la teneur en humidité sur la capacité antioxydant du paprika à 28°C et 45°C (Hakmaoui *et al.*, 2013).

En parallèle, L'étude de **Wang et al., (2018)**, a examiné l'effet du blanchiment à jet d'air chaud à haute humidité (HHAIB) sur l'activité antioxydante du piment rouge, en contraste avec le stockage sec. Les chercheurs ont constaté que ce prétraitement thermique en milieu humide entraînait une réduction significative de l'activité antioxydante, directement liée à la dégradation thermique de l'acide ascorbique, dont les niveaux diminuaient de 11,30 % à 40,52 % par rapport aux échantillons non traités. Le séchage ultérieur a continué à réduire la teneur en pigment rouge et en acide ascorbique, probablement en raison de l'instabilité thermique de leurs liaisons. Paradoxalement, le séchage a augmenté l'activité antioxydante globale, potentiellement grâce à la formation de produits antioxydants de la réaction de Maillard (issus des réactions entre les acides aminés et les sucres réducteurs sous l'effet de la chaleur) et à l'accroissement de la disponibilité des sucres réducteurs provenant de la décomposition des glucides complexes.

En fin, Selon l'étude de **Cao et al., (2015)**, le processus de séchage a un impact significatif sur la richesse du piment rouge en composés bénéfiques. Leurs analyses ont révélé une relation inverse significative entre la teneur en eau et la préservation de ces qualités. Selon leurs observations, la diminution progressive de l'humidité du piment entraînait une baisse continue de la concentration en composés phénoliques, une réduction rapide de la quantité de capsaïcinoïdes et une diminution parallèle de la capacité antioxydante mesurée par des tests spécifiques. Selon ces résultats, la teneur en humidité est un facteur crucial pour la rétention des composés valorisables et de l'activité antioxydante du piment rouge durant le séchage. En d'autres termes, selon cette étude, un piment plus sec tend à être moins riche en antioxydants et en composés responsables de son piquant.

Toutes ces observations soulignent l'influence de l'humidité sur l'activité antioxydante du piment rouge à chaque étape de sa conservation et de sa transformation. Un faible taux d'humidité, particulièrement autour de 4 %, comme le souligne l'étude de **Salima et al., (2014)**, est crucial durant le stockage pour préserver une forte concentration d'antioxydants essentiels tels que les polyphénols et les flavonoïdes. Ce faible niveau d'eau limite les réactions de dégradation qui pourraient altérer ces composés protecteurs, garantissant ainsi une meilleure capacité du piment à neutraliser les radicaux libres.

Cependant, le processus de séchage, bien qu'indispensable pour prolonger la durée de conservation et prévenir la détérioration par les microbes, introduit une dimension complexe.

L'étude de **Cao et al., (2015)**, révèle que la diminution de l'humidité est liée à une réduction des composés phénoliques et de l'activité antioxydante, suggérant que la perte d'eau peut rendre certains composés plus fragiles ou moins actifs.

Néanmoins, **Wang et al., (2018)**, ont mis en évidence un effet surprenant : malgré une possible baisse initiale de l'activité antioxydante due à un prétraitement humide, le séchage qui suit pourrait paradoxalement l'augmenter. Cette augmentation est attribuée à la formation de nouveaux antioxydants grâce aux réactions de Maillard, des processus chimiques complexes provoqués par la chaleur entre les sucres et les acides aminés.

Ces recherches soulignent l'importance d'une gestion précise et adaptée de l'humidité à chaque phase de la vie et de la transformation du piment rouge. Cela est essentiel pour maximiser ses propriétés antioxydantes bénéfiques pour la santé, en tenant compte des effets contrastés de l'humidité à différentes étapes du processus.

**Chapitre III : Impact de
quelques facteurs chimiques
sur l'activité antioxydant de
piments rouge**

Chapitre III. Impact de quelques facteurs chimiques sur l'activité antioxydant de piments rouge

III.1. Effet des solvants d'extraction sur activité antioxydant de piment

L'activité antioxydante des extraits de *Capsicum annuum* L., varie considérablement selon le solvant utilisé pour l'extraction. À ce propos, l'étude de **Prabakaran *et al.*, (2017)** a montré que les solvants polaires tels que l'éthanol et l'acétate d'éthyle présentent une efficacité significativement plus élevée que les solvants moins polaires, comme le chloroforme et le n-hexane.

Dans cette étude, deux tests *in vitro* ont été utilisés pour évaluer l'activité antioxydante : le test DPPH et le test de réduction du pouvoir antioxydant (FRAP). Ainsi, les extraits obtenus avec l'éthanol et l'acétate d'éthyle affichaient respectivement des taux d'inhibition des radicaux libres de 53,66 % et 49,55 %, à une concentration de 254 µg/mL. En revanche, l'extrait au chloroforme n'atteignait que 25,03 %. Cette différence est principalement attribuée à la richesse en composés phénoliques et flavonoïdes des extraits polaires, (**Tab. III.1**), et l'analyse chromatographique (GC-MS et HPTLC) a révélé que les extraits issus de solvants polaires sont particulièrement riches en composés bioactifs hydrosolubles.

À l'inverse, les extraits obtenus avec le n-hexane, bien qu'enrichis en lycopène (0,016 %), ont montré une activité antioxydante nulle. Ces observations confirment donc l'inefficacité des solvants non polaires dans l'extraction des composés phénoliques.

Tableau III.1. Effet du solvant d'extraction sur la teneur en composés bioactifs et l'activité antioxydante des extraits de piment rouge (**Prabakaran *et al.*, 2017**).

Solvant	Phénol %	Flavonoïde %	Lycopène %	Inhibition DPPH %
éthanol	7,14	3,26	0,005	53,66
Acétate déthyle	3,93	4,05	0,011	49,55
Chloroforme	0,13	0,89	0,014	25,03
n- Hexane	0,01	0,00	0,016	0,00

Dans le prolongement de ces résultats, une autre étude menée par **El-Ghorab *et al.*, (2013)** a analysé comment différents liquides d'extraction influencent l'activité antioxydante des *Capsicum annuum* L. pakistanais. Cette fois-ci, les piments ont été examinés à deux états : frais et séchés. Plusieurs solvants ont été utilisés : le méthanol et le n-hexane pour les composés non volatils, et le dichlorométhane pour les composés volatils (après distillation). L'activité antioxydante a été mesurée avec deux tests principaux : le test DPPH et le test β -carotène/acide linoléique

Les résultats obtenus indiquent que le solvant utilisé et l'état du *Capsicum annuum* L., (frais ou séché) ont un impact significatif sur l'efficacité de l'extraction. Les extraits faits avec le méthanol, surtout à partir des piments séchés, ont généralement donné un rendement plus élevé en composés et une meilleure activité antioxydante globale. Par exemple, le rendement avec le méthanol était de 27,37 mg/g, bien supérieur au 1,01 mg/100g obtenu avec le n-hexane. (**Fig. III.1**). La concentration en caroténoïdes était aussi plus élevée dans les extraits méthanoliques. Dans le test DPPH, l'extrait méthanolique de piment séché a montré la meilleure capacité à neutraliser les radicaux (60,92 % d'inhibition). À noter que l'extrait au n-hexane n'a montré aucune activité antioxydante détectable. Cependant, les résultats du test β -carotène étaient différents, montrant une bonne activité pour les extraits au dichlorométhane et au n-hexane également, ce qui suggère que l'efficacité dépend du test utilisé et du type de solvant. (**Fig. III.2**).

Ces différences de résultats soulignent que le choix du solvant et l'état physique du piment sont essentiels pour optimiser l'extraction des antioxydants naturels. La supériorité générale des extraits méthanoliques, en particulier ceux issus des échantillons séchés, suggère que le méthanol est plus efficace pour extraire les composés actifs pertinents dans le test DPPH.

Par ailleurs, le fait que différents solvants soient efficaces selon le test (DPPH vs β -carotène) indique que chaque solvant extrait des groupes de composés distincts, dont l'action antioxydante varie selon le mécanisme évalué.

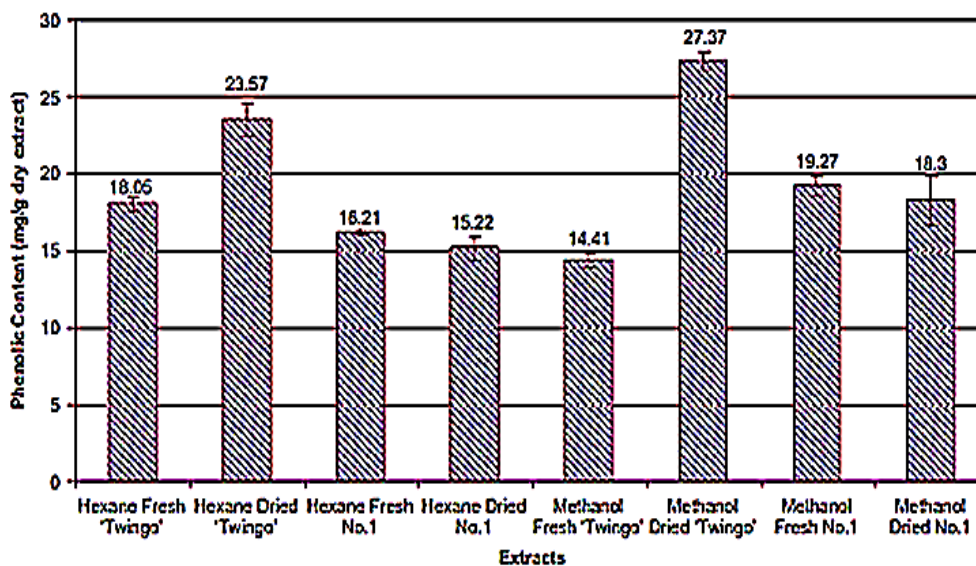


Figure III.1. Teneur en composés phénoliques totaux (El-Ghorab *et al.*, 2013).

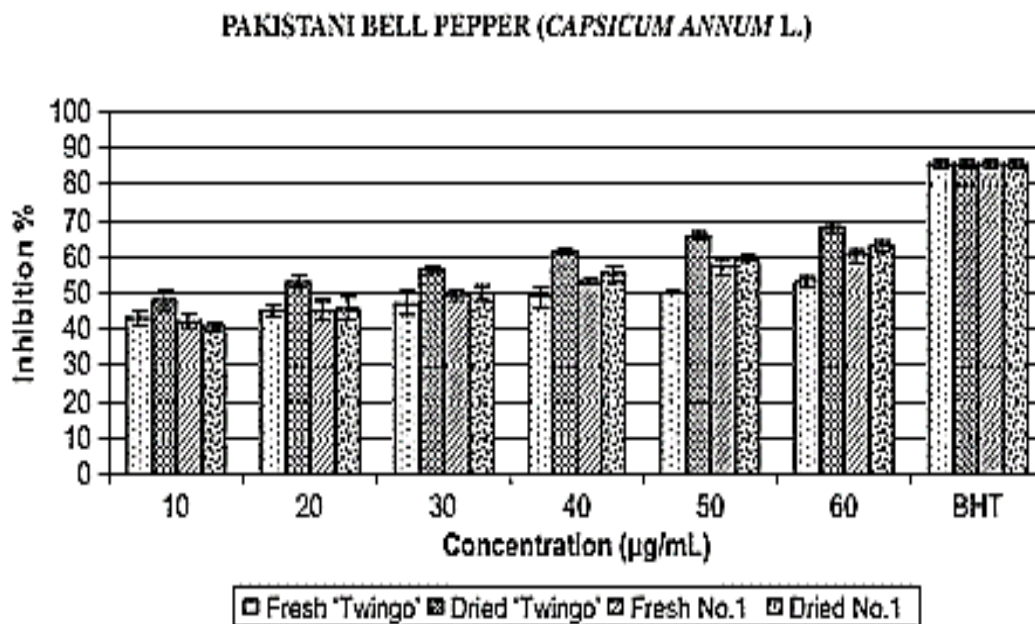


Figure III.2. Activité β -carotène des extraits méthanol (El-Ghorab *et al.*, 2013).

En conclusion, le type de solvant utilisé joue un rôle déterminant dans la capacité antioxydante des extraits de piment rouge. Les solvants polaires, tels que le méthanol et l'éthanol, se distinguent par leur efficacité à extraire les composés bioactifs à fort pouvoir antioxydant, notamment les phénols, flavonoïdes et caroténoïdes.

Les études de **Prabakaran *et al.* (2017)** et **El-Ghorab *et al.* (2013)** confirment cette tendance, en montrant que les solvants polaires permettent une meilleure récupération des composés antioxydants, comparés aux solvants non polaires comme le chloroforme ou le n hexane, dont l'efficacité d'extraction reste très limitée

Ces résultats mettent en évidence l'importance du choix du solvant comme facteur clé dans l'optimisation des procédés d'extraction des antioxydants naturels issus du *Capsicum annum* L.

III.2. Effet de la concentration du solvant/eau

L'efficacité de l'extraction des composés antioxydants du *Capsicum annum* L., dépend en grande partie du choix du solvant utilisé, ainsi que de sa concentration relative à l'eau. Plusieurs études ont montré que ces paramètres influencent non seulement la quantité, mais surtout la nature des composés bioactifs extraits, impactant ainsi directement l'activité antioxydante des extraits obtenus.

Dans Ce contexte, une étude menée par **Shim et Chin. (2013)**, l'impact du liquide utilisé pour extraire les composés du paprika (eau ou méthanol) sur son activité antioxydante a été examiné. Cette évaluation a été réalisée via plusieurs tests standards pour mesurer différentes facettes de cette activité. Le test DPPH (pour mesurer la capacité à capturer les radicaux libres), la mesure.

Les résultats obtenus avec le test DPPH ont montré que les extraits préparés avec le méthanol étaient significativement plus efficaces comme antioxydants que ceux préparés avec de l'eau. Cette meilleure performance des extraits méthanoliques a été constatée pour toutes les concentrations testées (allant de 0,1 % à 1,0 %). De plus, à partir d'une concentration de 0,5 % et au-delà, l'activité antioxydante des extraits méthanoliques est devenue comparable à celle de l'acide ascorbique, un antioxydant de référence souvent utilisé pour la comparaison.

En ce qui concerne le pouvoir réducteur, les analyses n'ont pas révélé de différence importante entre les extraits selon le solvant utilisé (eau ou méthanol). Cependant, une augmentation constante du pouvoir réducteur a été observée à mesure que la concentration de

l'extrait augmentait. Ce résultat souligne que pour cette activité spécifique, la quantité d'extrait utilisée (le dosage) est le facteur clé, plus que le type de solvant.

Parallèlement, La capacité des extraits à chélater le fer a également été évaluée. Ce test a montré une augmentation quasi linéaire de cette capacité avec l'augmentation de la concentration de l'extrait. À la concentration de 1,0 %, cette activité a dépassé 90 %. Il est intéressant de noter qu'à cette concentration là plus élevée, certains extraits (comme les extraits méthanoliques de paprika orange ou les extraits aqueux de paprika rouge) se sont montrés aussi efficaces que l'EDTA, une molécule connue pour très bien chélater le fer et utilisée ici comme référence.

De plus, l'étude a constaté que les quantités totales de composés phénoliques extraits n'étaient pas significativement différentes selon le solvant. Ce constat suggère que l'activité antioxydante observée ne dépend pas simplement de la quantité totale de phénoliques, mais plutôt de la nature spécifique des composés que chaque solvant est capable d'extraire. Le type de molécule semble donc plus important que leur simple nombre total pour expliquer l'activité antioxydante dans ce cas.

En conclusion de ces analyses, les résultats de l'étude **Shim et Chin. (2013)** mettent en évidence que le choix du solvant d'extraction, en particulier l'utilisation de solvants moins polaires comme le méthanol qui semblent extraire des composés plus actifs pour certains tests et la concentration de l'extrait sont des facteurs déterminants pour optimiser l'activité antioxydante du *Capsicum annuum* L. L'activité est étroitement liée au type et à la concentration des composés spécifiquement extraits, plutôt qu'à la quantité globale de certaines familles de composés.

Dans une autre approche complémentaire l'impact de l'ajout d'eau dans les solvants organiques, comme le méthanol, sur l'efficacité de l'extraction des capsaïcinoïdes (les composés responsables du piquant dans les piments) a un impact considérable. Une étude par **Rostagno et al. (2003)** a spécifiquement examiné cet effet.

Cette étude a testé l'incorporation progressive d'eau dans le méthanol pour voir son influence sur l'extraction de la capsaïcine et de la dihydrocapsaïcine. Quatre concentrations d'eau ont été évaluées : 5%, 10%, 25%, et 50% mélangées au méthanol.

Les résultats ont montré que l'ajout de seulement 5 % d'eau a déjà montré une légère amélioration de l'extraction (augmentations de 2,14 % pour la capsaïcine et 6,95 % pour la dihydrocapsaïcine). Cette amélioration a continué de progresser significativement à mesure qu'on augmentait la quantité d'eau, un maximum d'extraction a été atteint avec 25 % d'eau dans le méthanol, donnant les meilleurs rendements (186,04 µg/g pour la capsaïcine et 66,84 µg/g pour la

dihydrocapsaïcine, représentant des améliorations de 54,24 % et 62,25 %). L'étude de **Rostagno et al. (2003)**, a cependant montré qu'au-delà de 25 % d'eau (avec 50 % d'eau), l'efficacité de l'extraction a diminué.

Une autre étude similaire a été rapporté par **Mueller-Seitz et Petz, (2008)** a également confirmé l'importance de la formulation du solvant et du temps d'extraction. Ils ont montré que l'utilisation de 30 ml de méthanol à 75 % pendant 30 minutes était optimale pour l'extraction des capsaïcinoïdes, ajoutant le temps comme facteur clé en plus de la concentration.

La baisse de rendement observée dans l'étude **Rostagno et al. (2003)** à 50% d'eau, est expliquée par le fait que l'eau est plus polaire que les capsaïcinoïdes, ce qui réduit la solubilité de ces derniers dans des mélanges très aqueux. L'ensemble de ces études démontre l'importance cruciale du choix du solvant et de sa concentration (notamment la proportion d'eau ajoutée à un solvant organique comme le méthanol) pour maximiser l'extraction des capsaïcinoïdes. Les résultats peuvent varier en fonction du solvant organique de base, des conditions d'extraction (température, temps) et potentiellement du matériel végétal, d'où la nécessité de tester et d'optimiser les conditions spécifiques à chaque application.

Enfin, **Mokhtar, (2015)** a mené une étude visant à déterminer l'influence majeure du choix du solvant d'extraction et de sa concentration sur l'efficacité de l'extraction des composés bioactifs présents dans le *Capsicum annuum* L. Les composés particulièrement ciblés étaient les capsaïcinoïdes, responsables du piquant, ainsi que les composés phénoliques, connus pour leur contribution à l'activité antioxydante du piment.

Les observations faites au cours de ce travail ont montré que les solvants organiques, notamment le méthanol, présentaient une affinité supérieure pour les molécules lipophiles présentes dans le piment, comparativement à l'eau. Cette affinité plus élevée a conduit à une meilleure solubilisation et donc à une extraction plus efficace des antioxydants. IL a également été constaté qu'augmenter progressivement la concentration du solvant utilisé entraînait une amélioration du rendement d'extraction des composés bioactifs. Cependant, cette amélioration atteignait un plateau : au-delà d'un certain seuil de concentration du solvant, l'activité antioxydante de l'extrait cessait d'augmenter de manière significative, suggérant une saturation du pouvoir extractif du solvant.

Ainsi, l'ensemble de ces résultats confirment que la polarité d'un solvant et sa proportion exacte dans un mélange (par exemple, sa concentration en milieu aqueux) jouent un rôle fondamental dans la quantité et le type de principes actifs que l'on peut récupérer du piment. La

meilleure extraction des composés lipophiles par les solvants organiques par rapport à l'eau est cohérente avec la nature chimique de nombreux antioxydants du piment, comme les capsaïcinoïdes et certains phénoliques. Le phénomène de plateau observé avec l'augmentation de la concentration du solvant s'explique par le fait qu'une fois que la majorité des composés extractibles sont dissous, augmenter davantage la concentration du solvant ne permet plus d'améliorer significativement le rendement ou l'activité. Cela souligne que l'efficacité de l'extrait en tant qu'agent antioxydant naturel dépend directement de l'efficacité avec laquelle ses principes actifs sont extraits. Par conséquent, l'optimisation de la concentration du solvant représente un levier important pour améliorer la qualité et l'efficacité des extraits de piment rouge

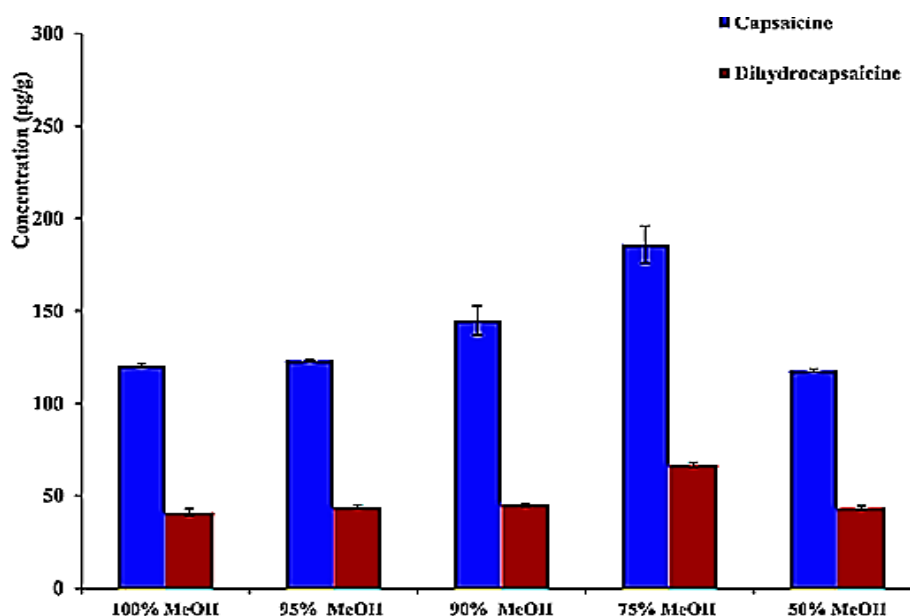


Figure III.3. Influence d'addition différentes concentrations d'eau dans le solvant sur l'extraction des capsaïcinoïde (Mokhtar, 2015).

III.3. Effet de pH sur l'activité antioxydant de piment rouge

Le pH, un facteur chimique essentiel, influence une large variété de processus biologiques. De plus, il est un déterminant clé de l'activité antioxydante. En particulier, le pH figure parmi les divers facteurs qui modulent la capacité antioxydante du piment rouge

L'étude menée par **Lučić *et al.* (2023)**, s'est penchée sur le rôle crucial du pH des solutions de prétraitement dans la préservation de l'activité antioxydante du piment rouge au cours du

processus de séchage. L'objectif principal était d'identifier les conditions de pH optimales permettant de maintenir au mieux cette propriété bénéfique des piments séchés.

Pour évaluer l'activité antioxydante, un protocole d'extraction des composés bioactifs a été mis en œuvre. Des échantillons de piments séchés broyés ont été soumis à une extraction séquentielle à l'aide de méthanol à 80%. La procédure comprenait une étape de sonication, visant à améliorer l'efficacité de l'extraction en favorisant la rupture des cellules végétales et la libération des composés d'intérêt. Cet extrait combiné, riche en potentiels composés antioxydants, a ensuite été utilisé pour la détermination de l'activité antioxydante à travers les tests DPPH et FRAP.

Les analyses effectuées par les tests DPPH et FRAP ont mis en évidence une influence significative du pH des solutions de prétraitement sur l'activité antioxydante des échantillons de piment rouge séché. L'étude a permis de déterminer qu'un pH de 6,5 appliqués durant les prétraitements représente la condition la plus efficace pour maintenir cette propriété bénéfique.

En ce qui concerne les composés antioxydants, et plus spécifiquement la teneur totale en composés phénoliques la rétention la plus élevée de TPC dans les échantillons de piment séchés à l'air chaud a été observée lorsque le prétraitement était effectué à un pH de 6,5.

Inversement, des conditions de pH extrêmes se sont révélées défavorables à la préservation des propriétés antioxydantes du piment rouge séché. Un pH trop acide, potentiellement résultant de l'utilisation isolée d'acide citrique, ou excessivement alcalin, tel qu'observé à pH 10, a eu tendance à diminuer la conservation de ces propriétés.

L'identification d'un pH optimal de 6,5 suggère que cette légère acidité favorise la stabilité ou la disponibilité des composés responsables de l'activité antioxydante. La sensibilité de ces composés aux conditions environnementales est soulignée par la diminution de l'activité antioxydante observée aux pH extrêmes. Un pH trop bas pourrait potentiellement induire une dégradation ou une transformation des molécules antioxydantes, réduisant ainsi leur efficacité. Similairement, un pH trop élevé pourrait favoriser des réactions chimiques indésirables altérant leur structure et leur fonction.

Les observations de l'étude de **Lučić *et al.* (2023)**, soulignent de manière significative la nécessité d'un contrôle précis du pH lors des étapes de prétraitement du piment rouge destiné au séchage. Un pH de 6,5 s'est avéré être la condition optimale pour préserver au mieux l'activité antioxydante du produit final. Des déviations vers des pH trop acides ou trop alcalins peuvent compromettre cette qualité essentielle. Par conséquent, la maîtrise du pH pendant les prétraitements apparaît comme un facteur clé pour optimiser la qualité finale du piment séché en

termes de capacité antioxydante et potentiellement de teneur en composés phénoliques. Ces résultats fournissent des informations précieuses pour l'industrie agroalimentaire cherchant à produire des piments séchés de haute qualité avec des propriétés fonctionnelles préservées.

Parallèlement, **Si *et al.*, (2014)**, examine comment le pH influence la stabilité des capsaïcinoïdes. Les capsaïcinoïdes, qui comprennent la nordihydrocapsaïcine, la capsaïcine et la dihydrocapsaïcine, sont non seulement responsables de la sensation de piquant des piments, mais possèdent également d'importantes propriétés pharmacologiques, notamment des activités antioxydantes. L'étude révèle que le pH affecte significativement la stabilité des capsaïcinoïdes dans un système modèle. Pour analyser cela, des solutions de capsaïcinoïdes ont été préparées, et des solutions tampons à pH 3, 5, 7 et 9 ont été utilisées pour tester l'effet du pH sur la stabilité des capsaïcinoïdes. La concentration des capsaïcinoïdes a été mesurée au fil du temps à l'aide de l'analyse HPLC.

Les résultats indiquent que la concentration des capsaïcinoïdes diminue avec le temps à tous les niveaux de pH. Cependant, la vitesse de cette réduction est fortement dépendante du pH. Un pH neutre (pH 7) entraîne la diminution la plus lente de la concentration des capsaïcinoïdes, indiquant la plus grande stabilité. Inversement, les conditions acides (pH 3 et 5) favorisent une dégradation plus rapide des capsaïcinoïdes. Les conditions alcalines (pH 9) présentent une stabilité intermédiaire, avec une vitesse de dégradation plus lente que les conditions acides.

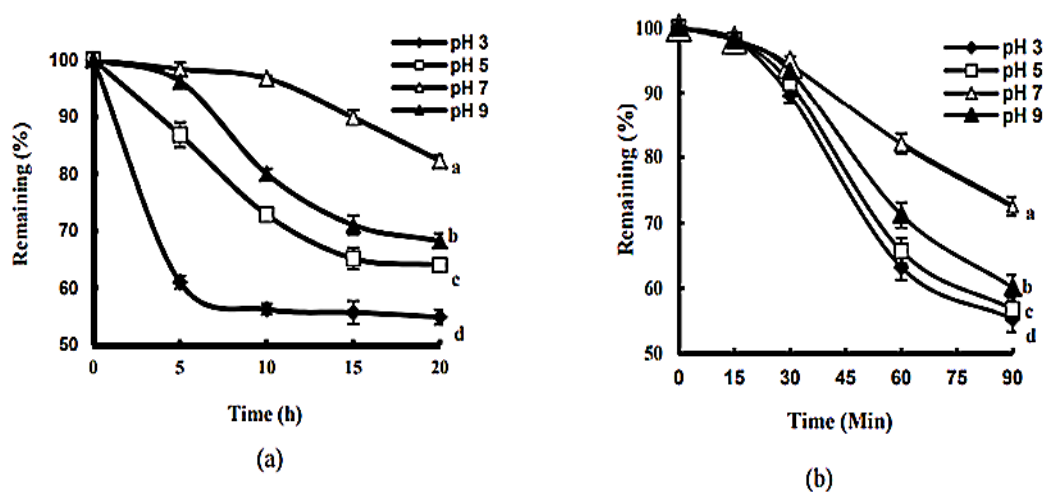


Figure III.4. Effet du pH (3, 5, 7 et 9) sur la teneur en capsaïcinoïdes restants (%) à (a) Température ambiante (25°C) pendant 20 h, et (b) température d'ébullition (100°C) pendant 90 min (**Si *et al.*, 2014**).

La dégradation des capsaïcinoïdes dépendante du pH observé entraîne des conséquences directes sur leur potentiel antioxydant. Lorsque les capsaïcinoïdes se décomposent, leur structure moléculaire est altérée, ce qui peut diminuer ou éliminer leur capacité à piéger efficacement les radicaux libres. La plus grande stabilité des capsaïcinoïdes à pH 7 suggère que dans des conditions de pH physiologique, ces composés sont plus susceptibles de conserver leur capacité antioxydante. Ceci est important pour leurs effets thérapeutiques potentiels dans les systèmes biologiques. Inversement, l'augmentation de la dégradation des capsaïcinoïdes dans les environnements acides implique une réduction de leur efficacité antioxydante. Cela pourrait être pertinent dans les conditions de transformation ou de stockage des aliments où l'acidité est élevée, réduisant potentiellement les bienfaits pour la santé des aliments contenant des capsaïcinoïdes. Bien que les capsaïcinoïdes présentent une plus grande stabilité dans des conditions alcalines par rapport aux conditions acides, la dégradation progressive à pH 9 suggère toujours une perte potentielle d'activité antioxydante au fil du temps.

Ainsi, l'interaction entre le pH et les propriétés antioxydantes des piments est complexe, comme le démontrent les résultats complémentaires de **Lučić *et al.* (2023)** et **Si *et al.* (2014)**, malgré leurs approches différentes. **Lučić *et al.* (2023)** ont démontré le rôle crucial du pH des solutions de prétraitement dans la préservation de l'activité antioxydante des piments rouges séchés, identifiant un pH de 6,5 comme optimal pour maximiser la rétention des composés phénoliques et la capacité antioxydante globale. Cette légère acidité favorise probablement la stabilité ou l'extraction de divers antioxydants pendant le processus de séchage. Simultanément, **Si *et al.* (2014)** ont examiné la stabilité des capsaïcinoïdes, révélant que ces composés, contribuant à la fois au piquant et à l'activité antioxydante, sont les plus stables à un pH neutre de 7. Il est plausible que le pH légèrement acide de 6,5 favorise l'extraction ou la disponibilité d'une plus large gamme de composés phénoliques contribuant à l'activité antioxydante globale dans le piment séché, même si la stabilité maximale des capsaïcinoïdes individuels est atteinte à un pH plus neutre de 7.

Conclusion

Conclusion

Le piment rouge est souvent perçu comme un simple ingrédient servant à épicer les plats. Pourtant, ses propriétés ne se limitent pas à son rôle de condiment.

Notre étude a montré que le piment rouge est riche en composés naturels bénéfiques, tels que les polyphénols, les flavonoïdes et les capsaïcinoïdes. Ces éléments lui confèrent une forte capacité à neutraliser les radicaux libres, qui sont responsables du stress oxydatif. Cela fait du piment rouge un aliment aux propriétés antioxydantes intéressantes pour la santé.

Par ailleurs, cette activité antioxydante est influencée par plusieurs facteurs physiques et chimiques. Les recherches portant sur les paramètres physiques tels que la température, la lumière et l'humidité ont révélé qu'ils modifient la composition biochimique, la structure et la stabilité des composés antioxydants du piment rouge. Ces changements affectent son efficacité à piéger les radicaux libres, notamment en modifiant la libération et la dégradation des composés actifs. Ainsi, l'activité antioxydante varie en fonction des conditions d'application.

De même, l'étude des paramètres chimiques, comme le type de solvant, sa concentration ou le pH, a montré que ces éléments jouent un rôle clé dans l'extraction des antioxydants, notamment les composés phénoliques et capsaïcinoïdes. Cela souligne l'importance de maîtriser précisément ces facteurs pour optimiser l'efficacité du piment rouge.

En perspective, les résultats obtenus pourraient ouvrir la voie à de nouvelles recherches visant à optimiser les conditions de transformation et de conservation du piment rouge, afin de préserver au mieux son activité antioxydante pour des applications potentielles dans les domaines de la nutrition, de la pharmacologie et de l'industrie agroalimentaire. Ces travaux pourraient notamment permettre :

D'identifier les conditions optimales (température, solvant, pH, temps d'extraction) pour maximiser l'extraction de composés antioxydants spécifiques du piment rouge ;

- D'identifier des antioxydants naturels présentant une meilleure stabilité.
- D'incorporer des extraits de piment rouge riches en antioxydants dans des aliments fonctionnels afin d'enrichir leur valeur nutritionnelle et leurs bienfaits pour la santé.
- De développer des compléments alimentaires à base de piment rouge riches en antioxydants pour prévenir les maladies liées au stress oxydatif.
- D'intégrer des antioxydants du piment rouge dans des produits de soin de la peau pour protéger contre les dommages causés par les radicaux libres et le vieillissement cutané.

Références

Bibliographiques

Références bibliographiques

1. Abdourahmane, R. A. THEME : Exploration des paramètres biochimiques de quelques variétés locales de piment (*Capsicum annuum* L.) en Algérie.
2. Anikwe, L. U., Onoja, U. S., Onyeke, C. C., & Nweze, E. I. (2017). Antimicrobial activities of four varieties of *Capsicum annuum* L. fruits cultivated in Southeast Nigeria against multidrug-resistant and susceptible organisms. *Journal of basic Pharmacology and Toxicology*, 1(2), 21-26.
3. Azad, M. O. K., Chun, I. J., Jeong, J. H., Kwon, S. T., & Hwang, J. M. (2011). Response of the growth characteristics and phytochemical contents of pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings with supplemental LED light in glass house. *Journal of Bio-Environment Control*, 20(3), 182-188.
4. Barbero, G. F., Liazid, A., Palma, M., & Barroso, C. G. (2008). Ultrasound-assisted extraction of capsaicinoids from peppers. *Talanta*, 75(5), 1332-1337.
5. BECHAR, K., SADOU, S., & SADOK, S. (2020). Effet de la pouzzolane et les fibres de palmier dattier (*Phoenix dactylifera*) sur le substrat horticole du poivron (*Capsicum annuum* L.) cultivée hors sol
6. Boonkird, S., Phisalaphong, C., & Phisalaphong, M. (2008). Ultrasound-assisted extraction of capsaicinoids from *Capsicum frutescens* on a lab-and pilot-plant scale. *Ultrasonics Sonochemistry*, 15(6), 1075-1079.
7. Bosland, P. W., & Votava, E. J. (Eds.). (2012). Peppers: vegetable and spice capsicums. Cabi.
8. Bouba, A. A. (2009). Contribution à l'étude du développement d'un aliment fonctionnel à base d'épices du Cameroun : caractérisation physico-chimique et fonctionnelle (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).
9. Bouba, A. A. (2009). Contribution à l'étude du développement d'un aliment fonctionnel à base d'épices du Cameroun: caractérisation physico-chimique et fonctionnelle (Doctoral dissertation, Institut National Polytechnique de Lorraine).
10. Britton, G. (1995). Structure and properties of carotenoids in relation to function. *The FASEB Journal*, 9(15), 1551-1558.
11. Bussmann, R. W., Zambrana, N. Y. P., Sikharulidze, S., Kikvidze, Z., Darchidze, M., Manvelidze, Z., & Hart, R. E. (2020). From the sea to the mountains-plant use in Adjara, Samegrelo and Kvemo Svaneti, Sakartvelo (Republic of Georgia), Caucasus. *Ethnobotany Research and Applications*, 20, 1-34.
12. Chaim, A. B., Borovsky, Y., Rao, G. U., Tanyolac, B., & Paran, I. (2003). A major fruit shape QTL conserved in *Capsicum*. *Genome*, 46(1), 1-9.
13. Cho, S. Y., Kim, H. W., Lee, M. K., Kim, H. J., Kim, J. B., Choe, J. S., & Jang, H. H. (2020). Antioxidant and anti-inflammatory activities in relation to the flavonoid's composition of pepper (*Capsicum annuum* L.). *Antioxidants*, 9(10), 986
14. Choi, C. H., Jung, Y. K., & Oh, S. H. (2010). Selective induction of catalase-mediated autophagy by dihydrocapsaicin in lung cell lines. *Free Radical Biology and Medicine*, 49(2), 245-257.
15. Dai, J., & Mumper, R. J. (2010). Plant phenolics: extraction, analysis and their antioxidant and anticancer properties. *Molecules*, 15(10), 7313-7352.
16. De, A. K. (Ed.). (2003). *Capsicum: the genus Capsicum*. CRC Press.
17. El-Ghorab, A. H., Javed, Q., Anjum, F. M., Hamed, S. F., & Shaaban, H. A. (2013). Pakistani bell pepper (*Capsicum annuum* L.): chemical compositions and its antioxidant activity. *International Journal of Food Properties*, 16(1), 18-32.

18. Fathima, S. N. (2015). A systemic review on phytochemistry and pharmacological activities of *Capsicum annum*. *Int. J. Pharm. Pharm. Sci*, 4(3), 51-68.
19. Fernández-García, E., Carvajal-Lérída, I., & Pérez-Gálvez, A. (2016). Carotenoids exclusively synthesized in red pepper (capsanthin and capsorubin) protect human dermal fibroblasts against UVB induced DNA damage. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 15, 1204-1211
20. Goetz, P., & Le Jeune, R. (2012). *Capsicum annum* et *Capsicum frutescens* Piment. *Phytothérapie*, 10, 126-130
21. González-Zamora, A., Sierra-Campos, E., Pérez-Morales, R., Vázquez-Vázquez, C., Gallegos-Robles, M. A., López-Martínez, J. D., & García-Hernández, J. L. (2015).
22. Greenleaf, W. H. (1986). Pepper breeding. *Breeding Vegetable Crop*, 67-134.
23. Imran, M., Butt, M. S., & Suleria, H. A. R. (2018). *Capsicum annum* bioactive compounds: health promotion perspectives. *Bioactive molecules in food*, 1-22
24. Iqbal, Z., Ahmad, A., Haque, Z., Khan, M. S., Khan, M. S., & Iqbal, M. S. (2020). RP-HPLC estimation of flavonol derivatives and phenolic acids in *Capsicum Annum* L. and their correlation with in vitro anti-inflammatory activity. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 21(2), 149-157.
25. Jeong, W. Y., Jin, J. S., Cho, Y. A., Lee, J. H., Park, S., Jeong, S. W., & Shin, S. C. (2011). Determination of polyphenols in three *Capsicum annum* L. (bell pepper) varieties using high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry: Their contribution to overall antioxidant and anticancer activity. *Journal of separation Science*, 34(21), 2967-297
26. Kebu, Z., Gure, A., & Molole, G. J. (2024). Total Phenolic and Flavonoid Content, Lipophilic Components, and Antioxidant Activities of *Capsicum annum* Varieties Grown in Omo Nada, Jimma, Ethiopia. *Natural Product Communications*, 19(12), 1934578X241306244
27. Khan, N., Ahmed, M. J., & Shah, S. Z. A. (2019). Comparative analysis of mineral content and proximate composition from chilli pepper (*Capsicum annum* L.) germplasm. *Pure and Applied Biology (PAB)*, 8(2), 1338-1347.
28. Knotkova, H., Pappagallo, M., & Szallasi, A. (2008). Capsaicin (TRPV1 Agonist) therapy for pain relief: farewell or revival? *The Clinical journal of pain*, 24(2), 142-154.
29. Koffi-Nevry, R., Kouassi, K. C., Nanga, Z. Y., Koussémon, M., & Loukou, G. Y. (2012). Antibacterial activity of two bell pepper extracts: *Capsicum annum* L. and *Capsicum frutescens*. *International journal of food properties*, 15(5), 961-971.
30. Kokalj, D., Hribar, J., Cigić, B., Zlatić, E., Demšar, L., Sinkovič, L., & Vidrih, R. (2016). Influence of yellow light-emitting diodes at 590 nm on storage of apple, tomato and bell pepper fruit. *Food technology and biotechnology*, 54(2), 228
31. Kothari, S. L., Joshi, A., Kachhwaha, S., & Ochoa-Alejo, N. (2010). Chilli peppers, a review on tissue culture and transgenesis. *Biotechnology advances*, 28(1), 35-48
32. Kouassi, C. K., Koffi-Nevry, R., Nanga, Z. Y., Teixeira Da Silva, J. A., Yao, K., Lathro, J. S., & Loukou, G. Y. (2010). Assessing the antibacterial activity and phytochemical screening of *Capsicum* varieties from Côte d'Ivoire. *Food*, 4(1), 27-32
33. Liu, B., Li, W., Zhao, J., Liu, Y., Zhu, X., & Liang, G. (2013). Physicochemical characterisation of the supramolecular structure of luteolin/cyclodextrin inclusion complex. *Food chemistry*, 141(2), 900-906.

34. Lučić, M., Potkonjak, N., Sredović Ignjatović, I., Lević, S., Dajić-Stevanović, Z., Kolašinac, S., & Onjia, A. (2023). Influence of ultrasonic and chemical pretreatments on quality attributes of dried pepper (*Capsicum annuum* L.). *Foods*, 12(13), 2468.
35. Luo, X. J., Peng, J., & Li, Y. J. (2011). Recent advances in the study on capsaicinoids and capsinoids. *European journal of pharmacology*, 650(1), 1-7.
36. Luo, X. J., Peng, J., & Li, Y. J. (2011). Recent advances in the study on capsaicinoids and capsinoids. *European journal of pharmacology*, 650(1), 1-7.
37. Luqman, S., & Rizvi, S. I. (2006). Protection of lipid peroxidation and carbonyl formation in proteins by capsaicin in human erythrocytes subjected to oxidative stress. *Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives*, 20(4), 303-306.
38. Maji, A. K., & Banerji, P. (2016). Phytochemistry and gastrointestinal benefits of the medicinal spice, *Capsicum annuum* L. (Chilli): a review. *Journal of Complementary and Integrative Medicine*, 13(2), 97-122.
39. Mandal, S. K., Rath, S. K., Logesh, R., Mishra, S. K., Devkota, H. P., & Das, N. (2023). *Capsicum annuum* L. and its bioactive constituents: A critical review of a traditional culinary spice in terms of its modern pharmacological potentials with toxicological issues. *Phytotherapy Research*, 37(3), 965-1002.
40. Martí, M. C., Camejo, D., Vallejo, F., Romojaro, F., Bacarizo, S., Palma, J. M., ... & Jiménez, A. (2011). Influence of fruit ripening stage and harvest period on the antioxidant content of sweet pepper cultivars. *Plant foods for human nutrition*, 66, 416-423.
41. Martínez, S., Curros, A., Bermúdez, J., Carballo, J., & Franco, I. (2007). The composition of Arnoia peppers (*Capsicum annuum* L.) at different stages of maturity. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 58(2), 150-161.
42. Materska, M. (2014). Bioactive phenolics of fresh and freeze-dried sweet and semi-spicy pepper fruits (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Functional Foods*, 7, 269-277.
43. Materska, M., & Perucka, I. (2005). Antioxidant activity of the main phenolic compounds isolated from hot pepper fruit (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Agricultural and food Chemistry*, 53(5), 1750-1756.
44. Mazhar, N., Baig, S. G., Ahmed, S., Palla, A., & Ishrat, G. (2021). Analgesic and anti-inflammatory potential of four varieties of bell pepper (*Capsicum annuum* L.) in rodents. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 34(4).
45. Measurement of capsaicinoids in chiltepin hot pepper: A comparison study between spectrophotometric method and high-performance liquid chromatography analysis. *Journal of Chemistry*, 2015(1), 709150.
46. Mňahončáková, E., Vergun, O., Grygorieva, O., Sedláčková, V. H., Ivanišová, E., Šramková, K. F., ... & Brindza, J. (2021). Evaluation of the antioxidant potential of *Capsicum annuum* L., *C. baccatum* L. and *C. chinense* Jacq. cultivars. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 20(2), 223-236.
47. Mohd Hassan, N., Yusof, N. A., Yahaya, A. F., Mohd Rozali, N. N., & Othman, R. (2019). Carotenoids of capsicum fruits: Pigment profile and health-promoting functional attributes. *Antioxidants*, 8(10), 469.
48. Mokhtar, M. (2015). Identification et propriétés biologiques des principes actifs du piment (*Capsicum annuum* L) (Doctoral dissertation, Thèse de Doctorat en Sciences, Univ. Mostaganem).
49. Morais, H., Rodrigues, P., Ramos, C., Forgács, E., Cserhádi, T., & Oliveira, J. (2002). Effect of ascorbic acid on the stability of β -carotene and capsanthin in paprika (*Capsicum annuum* L) powder. *Food/Nahrung*, 46(5), 308-310.

50. Mueller-Seitz, E., Hiepler, C., & Petz, M. (2008). Chili pepper fruits: content and pattern of capsaicinoids in single fruits of different ages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(24), 12114-12121.
51. N. salma, , A. ouatmaneb, , H. latrachea, , S. ennahli, , Lh zmelabidmed, , & H. haninea, . (2014). Bioactive Components and Antioxidant Activity of Moroccan Paprika (*Capsicum annuum* L) under different storage time and conditions. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1(Özel Sayı-1), 734-742.
52. Nadeem, M., Anjum, F. M., Khan, M. R., Saeed, M., & Riaz, A. (2011). Antioxidant potential of bell pepper (*Capsicum annuum* L). A review. *Pakistan Journal of Food Science*, 21(1-4), 45-51.
53. Pálinkó, I. (1999). Hydrogen-bonding interactions in the crystalline-phase structures of cinnamic acid derivatives. *Structural Science*, 55(2), 216-220.
54. Palma, J. M., Jiménez, A., Corpas, F. J., Mateos, R. M., Martí, M. C., Sevilla, F., & del Río, L. A. (2011). Role of ascorbate on the fruit physiology of pepper (*Capsicum annuum* L). *Functional Plant Science and Biotechnology*, 5, 56-61.
55. Park, M. H., Eum, H. L., Park, P. H., Baek, D. R., & Malka, S. K. (2024). The effect of storage temperature on antioxidant capacity and storability of paprika. *Food Science and Preservation*, 31(1), 15-23.
56. Ping, E. Y. S., Uthairatanakij, A., Laohakunjit, N., Jitareerat, P., Vongsawasd, P., & Aiampa-or S. (2019). Effects of drying temperature and time on color, bioactive compounds, and antioxidant activity in 'Hua Ruea' chili fruit (*Capsicum annuum* L). *Food and Applied Bioscience Journal*, 7(3), 1-15.
57. Prabakaran, S., Ramu, L., Veerappan, S., Pemiah, B., & Kannappan, N. (2017). Effect of different solvents on volatile and non-volatile constituents of red bell pepper (*Capsicum annuum* L) and their in vitro antioxidant activity. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11, 1531-1541.
58. Prior, R. L., Wu, X., & Schaich, K. (2005). Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. *Journal of agricultural and food chemistry*, 53(10), 4290-4302
59. Qasem, J. R. S. (2020). The coloured atlas of medicinal and aromatic plants of Jordan and their uses (volume one). Cambridge Scholars Publishing.
60. Cremer, D. R., & Eichner, K. (2000). Formation of volatile compounds during heating of spice paprika (*Capsicum annuum* L) powder. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(6), 2454-2460
61. Requena, A., Ceron-Carrasco, J. P., Bastida, A., Zuniga, J., & Miguel, B. (2008). A density functional theory study of the structure and vibrational spectra of β -carotene, capsanthin, and capsorubin. *The Journal of Physical Chemistry A*, 112(21), 4815-4825.
62. Rosa, A., Deiana, M., Casu, V., Paccagnini, S., Appendino, G., Ballero, M., & Dessì, M. A. (2002). Antioxidant activity of capsinoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(25), 7396-7401.
63. Rostagno, M. A., Palma, M., & Barroso, C. G. (2003). Ultrasound-assisted extraction of soy isoflavones. *Journal of chromatography A*, 1012(2), 119-128.
64. Sanatombi, K. (2023). Antioxidant potential and factors influencing the content of antioxidant compounds of pepper: A review with current knowledge. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 22(4), 3011-3052.
65. Schweiggert, U., Kammerer, D. R., Carle, R., & Schieber, A. (2005). Characterization of carotenoids and carotenoid esters in red pepper pods (*Capsicum annuum* L) by high-performance liquid chromatography/atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *Rapid Communications in*

- Mass Spectrometry: *An International Journal Devoted to the Rapid Dissemination of Up-to-the-Minute Research in Mass Spectrometry*, 19(18), 2617-2628.
65. Shim, Y. W., & Chin, K. B. (2013). Antioxidant activity of the oven-dried paprika powders with various colors and phycochemical properties and antioxidant activity of pork patty containing various paprika powder. *Food Science of Animal Resources*, 33(5), 626-632.
 66. Shotorbani, N. Y., Jamei, R., & Heidari, R. (2013). Antioxidant activities of two sweet pepper *Capsicum annuum* L. varieties phenolic extracts and the effects of thermal treatment. *Avicenna journal of phytomedicine*, 3(1), 25.
 67. Si, W., Man, S. W., Chen, Z. Y., & Chung, H. Y. (2014). Stability of capsaicinoid content at raised temperatures. *Natural product communications*, 9(7), 1934578X1400900726.
 68. Sim, K. H., & Sil, H. Y. (2008). Antioxidant activities of red pepper (*Capsicum annuum* L) pericarp and seed extracts. *International journal of food Science and Technology*, 43(10), 1813-1823.
 69. Srinivasan, K. (2014). Antioxidant potential of spices and their active constituents. *Critical reviews in food science and nutrition*, 54(3), 352-372.
 70. Sun, T., Xu, Z., Wu, C. T., Janes, M., Prinyawiwatkul, W., & No, H. K. (2007). Antioxidant activities of different colored sweet bell peppers (*Capsicum annuum* L). *Journal of Food Science*, 72(2), S98-S102.
 71. Teuscher, E., Anton, R., & Lobstein, A. (2005). Plantes aromatiques : épices, aromates, condiments et huiles essentielles. *Tec & Doc*. p. 552.
 72. Thiele, R., Mueller-Seitz, E., & Petz, M. (2008). Chili pepper fruits: presumed precursors of fatty acids characteristic for capsaicinoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(11), 4219-4224.
 73. Vijayalakshmi, K., Shyamala, R., Thirumurugan, V., Sethuraman, M., Rajan, S., Badami, S., & Mukherjee, P. K. (2010). Physico-Phytochemical investigation and Anti-inflammatory screening of *Capsicum annuum* L. and *Hemidesmus indicus* (Linn.) R. Br. *Ancient science of life*, 29(4), 35-40.
 74. Villa-Rivera, M. G., & Ochoa-Alejo, N. (2020). Chili pepper carotenoids: Nutraceutical properties and mechanisms of action. *Molecules*, 25(23), 5573
 75. Villa-Rivera, M. G., & Ochoa-Alejo, N. (2023). Ascorbic acid in chili pepper fruits: Biosynthesis, accumulation, and factors affecting its content. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 67(3), 187-199.
 76. Wahyuni, Y., Ballester, A. R., Sudarmonowati, E., Bino, R. J., & Bovy, A. G. (2013). Secondary metabolites of *Capsicum* species and their importance in the human diet. *Journal of natural products*, 76(4), 783-793.
 77. Waleed Quresh, W. Q., Mukhtar Alam, M. A., Hidayat Ullah, H. U., Jatoi, S. A., & Khan, W. U. (2015). Evaluation and characterization of chilli (*Capsicum annuum* L.) germplasm for some morphological and yield characters.
 78. Wang, J., Yang, X. H., Mujumdar, A. S., Fang, X. M., Zhang, Q., Zheng, Z. A., ... & Xiao, H. W. (2018). Effects of high-humidity hot air impingement blanching (HHAIB) pretreatment on the change of antioxidant capacity, the degradation kinetics of red pigment, ascorbic acid in dehydrated red peppers during storage. *Food Chemistry*, 259, 65-72.
 79. Yamamoto, S., & Nawata, E. (2004). Morphological characters and numerical taxonomic study of *Capsicum frutescens* in Southeast and East Asia. *Tropics*, 14(1), 111-121.
 80. Zhou, L., Cao, Z., Bi, J., Yi, J., Chen, Q., Wu, X., & Zhou, M. (2016). Degradation kinetics of total phenolic compounds, capsaicinoids and antioxidant activity in red pepper during hot air and infrared drying process. *International Journal of Food Science and Technology*, 51(4), 842-853.

ملخص

يُعد الفلفل الأحمر من النباتات التي تُزرع على نطاق واسع في مختلف أنحاء العالم، ويستخدم في العديد من المجالات الغذائية، العلاجية، والصناعية. يتميز بتكوينه الغني بالمركبات النشطة بيولوجيًا، مثل الكابيسيسينويدات، الفلافونويدات، الكاروتينويدات، البوليفينولات، وفيتامين س، وهي مركبات تمنحه خصائص مضادة للأكسدة، مضادة للالتهاب، ومضادة للميكروبات. وتساهم هذه المركبات في الوقاية من الضغط التأكسدي ومن أمراض مزمنة مثل السرطان وأمراض القلب.

من أجل فهم أفضل لهذه الخصائص، تم إجراء مجموعة من الدراسات لتقييم تأثير العوامل الفيزيائية والكيميائية على نشاط الفلفل الأحمر المضاد للأكسدة. وقد أظهرت النتائج أن درجة الحرارة المعتدلة، الرطوبة المنخفضة، والتخزين في الظلام تُساهم في الحفاظ على فعالية المركبات النشطة. كما تبين أن استخدام مذيب قطبي، بتركيز مناسب من الماء، ودرجة حموضة قريبة من الحيادية (حوالي 6.5)، يساعد على استخراج أفضل للمكونات الفعالة.

وتسلط هذه النتائج الضوء على أهمية التحكم الدقيق في الظروف البيئية والكيميائية من أجل تحسين القيمة الغذائية والعلاجية للفلفل الأحمر، وتعزيز استخدامه كمصدر طبيعي مهم لمضادات الأكسدة في المجالات الغذائية والدوائية.

الكلمات المفتاحية: الفلفل الأحمر، الكابيسيسينويدات، فيتامين س، النشاط المضاد للأكسدة، الإجهاد التأكسدي.

Abstract

The red pepper is a plant widely cultivated throughout the world for its food, therapeutic and industrial uses. Rich in bioactive compounds such as capsaicinoids, flavonoids, carotenoids, polyphenols and vitamin C, it has strong antioxidant, anti-inflammatory and antimicrobial potential. These components are crucial for preventing oxidative stress and significantly contribute to protection against chronic diseases such as cancer and heart disease.

This rich chemical composition plays an essential role in the prevention of oxidative stress and several degenerative diseases. To better understand the conditions that influence the effectiveness of these properties, a series of studies were carried out to evaluate the effect of various physical and chemical factors. Parameters such as moderate temperature, low humidity and reduced exposition to light have been shown to preserve the antioxidant activity of the fruit. Similarly, the choice of a polar solvent, an appropriate water concentration and a slightly acid pH optimize the extraction of active compounds.

These results highlight the importance of careful control of environmental and chemical conditions to optimize the nutritional and therapeutic value of red pepper, promoting its use as an important natural source of antioxidants in the food and pharmaceutical fields.

Keywords: Red pepper, capsaicinoids, vitamin C, antioxidant activity, bioactive compounds.

Résumé

Le piment rouge est une plante largement cultivée à travers le monde pour ses usages alimentaires, thérapeutiques et industriels. Riche en composés bioactifs tels que les capsaïcinoïdes, flavonoïdes, caroténoïdes, polyphénols et vitamine C, il présente un fort potentiel antioxydant, anti-inflammatoire et antimicrobien. Ces composants sont essentiels pour la prévention du stress oxydatif et contribuent significativement à la protection contre des maladies chroniques telles que le cancer et les maladies cardiaques.

Cette riche composition chimique lui confère un rôle essentiel dans la prévention du stress oxydatif et de nombreuses maladies dégénératives. Afin de mieux comprendre les conditions qui influencent l'efficacité de ces propriétés, un ensemble d'études a été mené pour évaluer l'effet de divers facteurs physiques et chimiques. Il a été démontré que des paramètres tels qu'une température modérée, une faible humidité et une exposition réduite à la lumière permettent de préserver l'activité antioxydante du fruit. De même, le choix d'un solvant polaire, une concentration adéquate en eau et un pH légèrement acide optimisent l'extraction des composés actifs.

Ces résultats montrent l'importance d'un contrôle minutieux des conditions environnementales et chimiques afin d'optimiser la valeur nutritionnelle et thérapeutique du piment rouge et de promouvoir son utilisation en tant que source naturelle importante d'antioxydants dans les domaines alimentaire et pharmaceutique.

Mots clés : piment rouge, capsaïcinoïdes, vitamine C, activité antioxydante, composés bioactifs.