

Réf :

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

Thème

**Activité antioxydante de muffins enrichis en
graines de chia et en safran.**

Présenté par :

DECHOUNE sara

Soutenu le : **03 Juillet 2025**

Devant le jury composé de :

Mme KAAININ Ghania	MCB	Présidente
Mme TAZRART Karima	MCA	Encadreur
Mme Bouarroudj Khalida	MCB	Examinatrice

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

*Je tiens à remercier les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.
J'exprime également toute ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mes
parents pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.
Je tiens à remercier du fond du cœur ma famille pour son soutien indéfectible, sa
patience et sa présence rassurante tout au long de ce parcours.
J'adresse en particulier mes remerciements à Madame Karima TAZRART, pour sa
disponibilité, son accompagnement, ses conseils et le soutien qu'elle m'a apporté
tout au long de ce travail.*

*Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude à mon frère Nassim et à ma sœur
Maissa pour leur amour, leur patience et leur soutien précieux durant cette étape
importante de ma vie.*

*Je tiens également à remercier mes camarades de classe, avec qui j'ai partagé ces
années d'études. Leur présence et leur sens de l'humour ont rendu ce voyage plus
agréable.*

*Et bien sûr, à mes amies (Aya, Houda, Lyna, Warda, Shakira, Lissia.....) pour leur
écoute, leur présence chaleureuse et les moments de joie partagés qui ont rendu ce
chemin plus léger.*

À vous tous, merci du fond du cœur.

Sara 

Dédicaces

Je vous dédie ce travail, à vous tous qui avez joué un rôle essentiel dans ce chapitre de ma vie.

À mon père et ma mère qui ont toujours été à mes côtés, même dans les périodes de doute.

À Maïssa et Nassim, votre écoute et votre présence dans les bons comme dans les mauvais moments comptent énormément pour moi

À mes grands-pères (Hmiche et Ahmed), À mes grands-mères (Wardia et Melkhir) et ma famille élargie – mes oncles, mes tantes – pour leurs petits gestes, leurs encouragements et leur soutien constant.

À mes amis,

Merci pour tous ces fous rires, ces longues discussions où on refait le monde, et surtout pour avoir été là quand ça n'allait pas. Votre présence a fait toute la différence dans les moments compliqués

Sommaire

Sommaire

Liste d'abréviation

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction.....2

Partie 1 : Synthèse bibliographique

I. Les graines de chia3

I.1 Description des graines de chia.....3

I.2 Classification taxonomique.....4

I.3 Composition nutritionnelle des graines de chia4

I.4 Utilisations alimentaires des graines de chia6

II. Les produits céréaliers.....8

II.1 Définition des produits céréaliers8

II.2 Les muffins.....9

II.3 Composition des muffins.....10

II.4 Intérêt de l'enrichissement par les graines de chia.....10

III. Le safran.....11

III.1 Présentation et origine du safran11

III.2 Classification taxonomique du safran11

III.3 Composition chimique du safran12

III.4 Utilisations alimentaires du safran13

IV. Les antioxydants.....14

IV.1 Définition des antioxydants.....14

IV.2 Classification des antioxydants.....14

IV.3 Mécanismes d'action des antioxydants.....14

IV.4 Impact des antioxydants sur la santé15

IV.5 Méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante.....16

Partie 2 Matériels et méthodes

1. Objectif du travail.....17

2. Échantillonnage.....17

3. Préparation des muffins.....17

4. Caractérisation physique des muffins.....19

5. Analyses physicochimiques des muffins.....	20
5.1. Préparation des poudres de muffins	20
5.2. Mesure du tau d'humidité.....	20
5.3. Mesure du taux de cendres des muffins.....	21
5.4. Analyse colorimétrique des muffins.....	21
6. Extraction et dosage des composés phénoliques	22
6.1. Délipidation des poudres.....	22
6.2. Extraction des composés phénoliques libres.....	22
6.3. Extraction des composés phénolique liés.....	22
6.4. Dosage des composés phénoliques.....	23
7. Mesure de l'activité antioxydante.....	23
7.1. Activité scavenger sur le radical DPPH	23
7.2. Activité antiradicalaire sur le radical ABTS	24
8. Extraction et quantification des composés du safran.....	24
9. Analyse statistique.....	25

Partie 3 : Résultats et discussion

1. Caractéristiques physiques des muffins.....	26
2. Paramètres physicochimiques des muffins.....	28
2.1. Taux d'humidité des muffins.....	28
2.2. Taux de cendres des muffins.....	31
2.3. Couleur des muffins.....	32
3. Teneurs en composés phénolique des muffins.....	34
4. Activité antioxydante des muffins.....	37
4.1. Activité scavenger sur le radical DPPH	37
4.2. Activité antiradicalaire sur le radical ABTS	38
5. Teneurs en composés bioactifs du safran	40
Conclusion.....	41

Références bibliographiques

Annexes

Liste d'abréviation

- ABTS : 2,2'-Azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique) acide.
- AOAC : Association des Chimistes Analystes Officiels.
- ANOVA : Analyse de la variance.
- CAT: la catalase.
- CM: Mucilage de chia.
- DPPH: 2,2-Diphényl-1-picrylhydrazyle.
- E1cm% : Absorbance spécifique à 1 cm.
- FOSHU: Food for Specified Health Uses.
- FRAP : Ferric Reducing Antioxidant Power (Pouvoir antioxydant de réduction du fer).
- GAES: Équivalents d'acide gallique.
- GPx: la glutathion peroxydase.
- GSH: le glutathion.
- HAT: Hydrogène Atom Transfer (Transfert d'atome d'hydrogène).
- ISO : Organisation internationale de normalisation.
- ISO/TS 3632 : Norme technique spécifique de l'Organisation internationale de normalisation relative à la qualité du safran (*Crocus sativus* L.).
- LSD: Différence significative minimale.
- M: mole.
- NaOH: hydroxyde de sodium.
- pH: potentiel hydrogène.
- SET: Single Electron Transfer (Transfert d'électron singulet).
- SOD: la superoxyde dismutase.
- TC : Le taux de cendres.
- TPC : la teneur phénolique totale.
- UV: Ultraviolet.

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I	Composition nutritionnelle des graines de chia	4
Tableau II	Applications alimentaires des graines de chia	7
Tableau III	Composition nutritionnelle des muffins (pour 100 g)	10
Tableau IV	Composition chimique de safran	12
Tableau V	Mécanismes d'action des antioxydants	15
Tableau VI	Quelque testé pour l'évaluation de l'activité antioxydante	16
Tableau VII	Taux d'humidité des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia	28
Tableau VIII	Taux d'humidité des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia et 20 mg de safran	29
Tableau IX	Taux d'humidité des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia et 40 mg de safran	29
Tableau X	Analyse colorimétrique des muffins sans safran en fonction du taux d'incorporation de graines de chia	32
Tableau XI	Analyse colorimétrique des muffins avec 20 mg de safran en fonction du taux d'incorporation de graines de chia	32
Tableau XII	Analyse colorimétrique des muffins avec 40 mg de safran en fonction du taux d'incorporation de graines de chia	33
Tableau XIII	Contenu en composés bioactifs du safran	40

Listes des figures

Figure 1	Photographie de la plante de chia (<i>Salvia hispanica</i>)	3
Figure 2	Photographie des graines de chia	3
Figure 3	Photographie D'un muffin	9
Figure 4	Stigmates et fleur du safran	11
Figure 5	Ingrédients utilisés pour la préparation des muffins	17
Figure 6	Muffins enrichis avec 0, 10, 20, 30 et 40 % de farine de chia.	18
Figure 7	Muffins enrichis avec 0, 10, 20, 30 et 40 % de farine de chia et 20 mg de safran	19
Figure 8	Muffins enrichis avec 0, 10, 20, 30 et 40 % de farine de chia et 40 mg de safran	19
Figure 9	Caractéristiques physiques des muffins enrichis en farine de chia	26
Figure 10	Caractéristiques physiques des muffins enrichis en farine de chia et 20 mg de safran.	27
Figure 11	Caractéristiques physiques des muffins enrichis en farine de chia et 40 mg de safran.	27
Figure 12	Teneurs en cendres des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia	29
Figure 13	Teneurs en cendres des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia et 20mg d safran.	31
Figure 14	Taux de cendres des muffins enrichis en chia avec 40 mg de safran.	31
Figure 15	Teneurs en composés phénoliques des muffins substitués avec différents % de farine de chia	34
Figure 16	Teneurs en composés phénoliques des muffins substitués avec différents % de farine de chia et 20 mg de safran.	35
Figure 17	Teneurs en composés phénoliques des muffins substitués avec différents % de farine de chia et 40 mg de safran	35
Figure 18	Activité scavenger sur le radical DPPH des muffins substitués avec différents % de farine de chia	36
Figure 19	Activité scavenger sur le radical DPPH des muffins substitués avec différents % de farine de chia et en 20 mg de safran	37
Figure 20	Activité scavenger sur le radical DPPH des muffins substitués avec différents % de farine de chia et en 40 mg de safran.	37
Figure 21	Activité antiradicalaire contre le radical ABTS des muffins enrichis en graines de chia.	38
Figure 22	Activité antiradicalaire contre le radical ABTS des muffins enrichis en graines de chia et avec 20 mg de safran	38
Figure 23	Activité antiradicalaire contre le radical ABTS des muffins enrichis en graines de chia et 40 mg de safran	39

Introduction

Face à la montée des maladies liées au mode de vie (diabète, obésité, maladies cardiovasculaires...) et de l'intérêt pour des aliments adaptés aux besoins nutritionnels spécifiques, les chercheurs et industriels ne cessent d'innover dans la perspective de développer des produits alliant valeur nutritionnelle améliorée et attrait sensoriel préservé (**Rendón-Villalobos *et al.*, 2018 ; Sharma *et al.*, 2020**).

Parmi les ingrédients naturels d'intérêt croissant en agroalimentaire, les graines de chia (*Salvia hispanica L.*) sont reconnues pour leur teneur élevée en oméga-3, fibres, antioxydants et micronutriments, ce qui leur vaut le statut de « super-aliment » (**Masood, 2022 ; Rauf *et al.*, 2024**). Riches en substances bioactives, notamment en vitamine B, elles présentent une activité antioxydante notable, contribuant potentiellement à la prévention des maladies liées au stress oxydatif (**Rendón-Villalobos *et al.*, 2018**). Leur composition comprend des flavonoïdes, tocophérols, phytostérols, caroténoïdes et divers composés phénoliques aux effets bénéfiques sur la santé, tels que l'acide chlorogénique, l'acide caféique, la myricétine, la quercétine et le kaempférol (**Rendón-Villalobos *et al.*, 2018**). La farine de chia possède par ailleurs une capacité antioxydante comparable à celle du vin, du café, du thé ou du jus d'orange (**Orona-Tamayo *et al.*, 2017**).

Le safran (*Crocus sativus*), connu depuis des siècles pour ses usages culinaires et médicaux, attire également l'attention pour sa richesse en composés bioactifs, comme la crocine et le safranal, reconnus pour leurs propriétés antioxydantes (**Ali *et al.*, 2022**). Utilisé dans des formulations alimentaires, il peut améliorer à la fois leur profil sensoriel et leurs qualités nutritionnelles. Par ailleurs, les antioxydants naturels sont aujourd'hui privilégiés pour leur capacité à prolonger la durée de conservation des aliments sans compromettre leur goût ou leur qualité nutritionnelle (**Shahidi et Ambigaipalan, 2015**).

Parmi les produits alimentaires les plus consommés figurent les produits de boulangerie, dont les muffins à pâte molle qui séduisent par leur texture moelleuse et leur goût savoureux (**Shukla *et al.*, 2024**). L'évolution des technologies de transformation a permis l'enrichissement des produits alimentaires avec des ingrédients fonctionnels tels que les graines de chia, apportant une valeur ajoutée sur les plans nutritionnel et fonctionnel. Par ailleurs, les antioxydants naturels qu'elles contiennent contribuent à prolonger la durée de conservation des aliments tout en préservant leurs qualités organoleptiques (**Shahidi et Ambigaipalan, 2015**).

L'ajout de safran dans les produits boulangerie en général présente un réel intérêt nutritionnel. En effet, il a été montré que l'enrichissement en safran entraîne une augmentation significative de l'activité antioxydante, notamment grâce à des concentrations élevées en crocines, des composés aux propriétés bioactives reconnues (**Armellini *et al.*, 2018**). Cette incorporation permet ainsi de développer des produits de boulangerie fonctionnels, susceptibles d'apporter des effets bénéfiques pour la santé (**Cerda-Bernad et Frutos, 2023**).

C'est dans cette perspective que s'inscrit la présente étude, dont l'objectif est de développer une formulation innovante de muffins enrichis en chia et en safran (séparément ou simultanément), et d'évaluer leur potentiel antioxydant.

Ce mémoire est structuré en trois principales parties:

- ✚ La première partie est consacrée à une synthèse bibliographique portant sur les deux matrices végétales étudiées: les graines de chia et le safran. Elle met en lumière leurs caractéristiques nutritionnelles, fonctionnelles et antioxydantes, ainsi que l'intérêt qu'elles peuvent apporter aux produits de boulangerie tels que les muffins. Cette étude bibliographique est achevée par une brève description des antioxydants, leur mode d'action, ainsi que les méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante ;
- ✚ La deuxième partie décrit le matériel et les méthodes utilisés pour la préparation des muffins enrichis en graines de chia et en safran, ainsi que les différentes analyses réalisées pour évaluer leurs propriétés physico-chimiques et antioxydantes ;
- ✚ La troisième partie présente les résultats obtenus, accompagnés d'une discussion qui les confronte aux données issues de la littérature scientifique.

Partie 1
Synthèse bibliographique

I. Les graines de chia

1. Description des graines de chia

Le chia (*Salvia hispanica*) est une plante à fleurs qui fait partie de la famille des *Lamiacées*, également connue sous le nom de *Labiatae* (Amato *et al.*, 2015). Elles proviennent principalement du centre et du sud du Mexique, ainsi que du Guatemala ; il est cultivé depuis longtemps par les populations indigènes de ces régions (Mutlu *et al.*, 2024). La plante est annuelle, herbacée et fleurit en été (Ullah *et al.*, 2015), d'une hauteur d'environ un mètre avec des feuilles pétiolées inversées et dentelées (4-8 cm de long, 3-5 cm de large) et des fleurs hermaphrodites de couleur blanche ou violette (Figure 1), mesurant environ 3 à 4 mm (Sharma et Kaur, 2025).



Figure 1 : Photographie de la plante de chia (*Salvia hispanica*) (Gerber et Jornod, 2008).

Les graines de chia sont de petite taille, mesurant quelques millimètres de long. Elles ont une forme semi-ovale, avec une longueur comprise entre 1 et 2 mm, un diamètre de 0,8 à 1,3 mm, et une largeur de 0,8 à 1,4 mm (Ikumi *et al.*, 2019). Les graines propres et sèches peuvent être conservées pendant des années car elles contiennent des antioxydants qui empêchent la détérioration des huiles essentielles (Muñoz *et al.*, 2013).



Figure 2 : Photographie des graines de chia (Gerber et Jornod, 2008).

2. Classification taxonomique

La classification taxonomique des graines de chia est mentionnée ci-dessous (Rendón-Villalobos *et al.*, 2018):

- Règne : Plantae
- Sous-règne : Trachéobionta
- Division : Magnoliophyta
- Classe : Magnoliopsida
- Sous-classe : Asterales
- Ordre : Lamiales
- Famille : Lamiaceae (*Labiatae*)
- Genre : *Salvia*
- Espèce : *Salvia hispanica*

3. Composition nutritionnelle des graines de chia

Les graines de chia constituent une excellente source de vitamines, de minéraux, d'antioxydants, ainsi que de fibres solubles et insolubles, tel qu'illustré dans le **Tableau I**.

Tableau I : Composition nutritionnelle des graines de chia.

Composés	Teneurs	Références
Valeur énergétique	486,0 kcal/100 g	(Kulczyński <i>et al.</i> , 2019)
Protéines	Le chia contient 20% de protéines et présente un potentiel considérable pour corriger et prévenir la malnutrition protéino-énergétique. Leur profil en acides aminés comprend 10 acides aminés essentiels, notamment la leucine, la lysine, la valine, la phénylalanine et l'arginine, qui sont présents en quantités élevées.	(Ullah <i>et al.</i> , 2015 ; Biswas <i>et al.</i> , 2023)

Lipides	Les graines de chia contiennent 25 à 40 % de matières grasses, dont la plupart sous forme d'acides gras polyinsaturés, tels que l'acide ω -3 alpha-linolénique et l'acide ω -6 alpha-linoléique	(Chaudhary <i>et al.</i> , 2021).
Fibres alimentaires	Les graines de chia contiennent entre 34 et 40 g de fibres alimentaires par 100 g, ce qui équivaut à 100 % des recommandations journalières pour la population adulte. La fraction insoluble (IDF) représente environ 85-93 %, tandis que les fibres alimentaires solubles (SDF) représentent environ 20 %	(Ullah <i>et al.</i> , 2015 ;Kulczyński <i>et al.</i> , 2019)
Glucides	Le chia contient 26 à 41 % de glucides. Le mucilage de chia (CM) est une poudre blanche séparée à partir de la couche de la semence, constituant 4-6% de la masse sèche et structurellement composé d'unités répétées de tétra-saccharides et quelques des sucres supplémentaires comme l'arabinose, le mannose et l'acide galacturonique. Il s'agit d'un complexe de glucides à haut poids moléculaire, et un composant majeur de la graine en raison de leur rôle physiologique.	(Tavares <i>et al.</i> , 2017 ; Masood, 2022 ; Rauf <i>et al.</i> , 2024)
Vitamines	Les graines de chia constituent une bonne source de vitamines du complexe B, avec notamment : • Vitamine B6: 0,1 mg/100 g • Thiamine (B1): 0,7 mg/100 g • Riboflavine (B2): 0,2 mg/100 g • Niacine (B3): 7,2 mg/100 g	(Chaudhary <i>et al.</i> , 2021).
	Les graines de chia sont particulièrement riches en minéraux tel que : • Potassium (K⁺) : 0,407 - 0,726 g/100 g • Magnésium (Mg²⁺) : 0,335 - 0,449 g/100 g	(Biswas <i>et al.</i> , 2023)

	• Phosphore (P) : 0,860 - 0,919 g/100 g • Calcium (Ca²⁺) : 0,456 - 0,631 g/100 g	
Antioxydants	Les antioxydants présents dans le chia sont de nature phénolique et peuvent être sous forme libre ou liés à des sucres par des liaisons glycosidiques, ce qui augmente leur solubilité dans l'eau. Les composés phénoliques les plus importants sont les acides chlorogénique et caféique, ainsi que les flavanols, la myricétine, la quercétine et le kaempférol.	(Valdivia López et Tecante, 2015)

4. Utilisations alimentaires des graines de chia

Le terme « aliment fonctionnel » a été proposé au Japon dans les années 1980, et définit par « un aliment pour la santé ». Il fait référence aux aliments transformés qui contiennent des ingrédients jouant un rôle spécifique dans les fonctions physiologiques de l'organisme humain, au-delà de leur contenu nutritionnel (Rendón-Villalobos *et al.*, 2018).

Les graines de chia gagnent actuellement en popularité dans l'industrie alimentaire en tant que "**Nouvel aliment**", ingrédient d'aliments fonctionnels (FOSHU) et compléments alimentaires. Les propriétés bénéfiques pour la santé des graines de chia peuvent être attribuées à leur riche composition chimique (Motyka *et al.*, 2023). Cette graine est une source naturelle d'oméga-3 (acide α -linolénique), de fibres, de protéines de haute valeur biologique et d'antioxydants naturels qui protègent la graine contre certaines conditions défavorables, en plus d'autres composants nutritionnels importants tels que les vitamines et les minéraux (Muñoz *et al.*, 2013).

L'approbation de la graine de chia en tant que nouvel aliment par le Parlement européen a conduit à un degré élevé d'utilisation de la graine de chia dans une large gamme d'aliments. Tel que les biscuits, les pâtes, les barres de céréales, les snacks, les yaourts et les gâteaux. (Ullah *et al.*, 2015).

En raison des propriétés hydrophiles des graines de chia, elles sont utilisées pour remplacer les œufs et les graisses (Kulczyński *et al.*, 2019).

Les graines de chia sont utilisées entières, sous forme de gel ou d'huile. Le gel de graines de chia peut être utilisé comme substitut de l'huile ou des œufs dans les produits de boulangerie (Kulczyński *et al.*, 2019). Le mucilage de chia est aussi facilement utilisé comme stabilisateur de mousse, émulsifiant ou liant dans l'industrie alimentaire (Chaudhary *et al.*, 2021).

Le tableau suivant résume les principales utilisations alimentaires des graines de chia.

Tableau II : Applications alimentaires des graines de chia

Produit		Forme de chia utilisée	% d'incorporation	Résultats obtenus	Références
Les produits de boulangerie	Pain	Graines entières, la farine de chia, le mucilage de chia	Jusqu'à 10% (farine), 75% de gras remplacé (mucilage)	Amélioration de la texture ; Ralentissement du rassissement ; Augmentation de fibres ;	Fernandes <i>et al.</i> , 2021
	Cakes	Farine de chia, gel de chia	Jusqu'à 15 g/100 g (farine), 25% de l'huile ou œufs (gel)	Meilleure rétention d'eau ; Substitut d'œufs ou de matières Grasses.	
	Tortillas de maïs	Farine de chia.	15 à 20 %		
	Pâtes alimentaires	Farine de chia, mucilage	Jusqu'à 10%		
Les produits laitiers	Crème glacée	Le mucilage de chia	/	Augmentation des oméga-3 sans effets négatifs jusqu'à 30 jours de stockage	Ullah <i>et al.</i> , 2017 ; Fernandes <i>et al.</i> , 2021
	Yaourt nature brassé	Graines entières de chia	1 %, 2 %, 3 %	Amélioration de la rétention d'eau, augmentation de l'activité antioxydante et amélioration de la qualité nutritionnelle	Tazart <i>et al.</i> , 2023

Autres produits	Mayonnaise	Mucilage	45% de l'huile ou 35% du jaune d'œuf		Fernandes et al., 2021
	Mousses alimentaires	Mucilage	1–5%	Meilleure stabilité de la mousse	(Marinova et al., 2009)
	Saucisses	la farine de chia	Jusqu'à 8 % de farine de chia	Un produit enrichi en fibres alimentaires, minéraux (potassium, magnésium, calcium et manganèse) ainsi que d'acides gras mono- et polyinsaturés	(Kulczyński et al., 2019)

II. Les produits céréaliers

1. Définition des produits céréaliers

Les produits céréaliers englobent tous les aliments fabriqués à partir de céréales, que ce soit par des procédés simples comme le nettoyage ou le broyage, ou par des procédés industriels plus complexes tels que la cuisson ou l'extrusion (**Food and Agriculture Organization, 2018**).

Les céréales sont une source importante de glucides et fournissent aux consommateurs non seulement de l'énergie, mais aussi une charge glycémique (**Soong et al., 2014**).

Les céréales constituent un élément essentiel de l'alimentation. Elles sont également une source de fibres alimentaires et de micronutriments (vitamines, minéraux, etc.), constituants intéressants pour la santé (**Saulnier, 2012**). Environ 50 % de l'apport en fibres alimentaires provient des céréales telles que l'avoine, le blé, le maïs, l'orge et le seigle, qui sont considérées comme des aliments de base pour la plupart des gens (**Kaur et al., 2021**).

Les glucides peuvent être classés en fonction de leur taille moléculaire et de leur degré de polymérisation. Cette classification comprend les sucres (monosaccharides et disaccharides), les oligosaccharides, l'amidon (amylose et amylopectine) et les polysaccharides non amylacés (**Saulnier, 2012**). L'amylose et l'amylopectine, deux types distincts de polymères glucaniques, composent l'amidon. Les deux polymères sont composés d' α -D-glucose, cependant leur degré de ramification varie, l'amylose étant principalement linéaire tandis que l'amylopectine est fortement ramifiée (**Lafiandra et al., 2014**).

Les produits céréaliers tels que le pain et les pâtes peuvent être élaborés à partir de divers ingrédients tels que la farine, la semoule, les flocons ou des composants spécifiques du grain comme le son de blé ou l'orge perlé. En outre, le groupe des produits céréaliers englobe des graines telles que le sarrasin, le quinoa et le riz sauvage, bien qu'ils ne soient pas considérés comme des céréales du point de vue botanique (Naître et grandir, 2025).

Les produits alimentaires à base de céréales représentent plus de 20 % du régime alimentaire quotidien. On peut donc supposer que la production et la transformation des céréales constituent l'un des secteurs les plus importants des industries agroalimentaires (Li *et al.*, 2024).

2. Les muffins

2.1. Définition des muffins

Les muffins sont des aliments cuits au four, fabriqués à partir d'ingrédients céréaliers : farine, sucre, graisse et arômes. Le terme « muffin » est apparu pour la première fois dans un magazine britannique intitulé « London Labourer » en 1851 (Shukla *et al.*, 2024).

Un muffin est une sorte de produit de boulangerie sucré et dense en calories, qui est largement consommé en raison de son goût attrayant et de sa texture moelleuse. Les pâtes à muffins sont des émulsion complexes graisse-eau composées d'une phase continuée d'œufs, de sucre et d'une phase discontinue d'air dans laquelle les farines sont dispersées. (Soong *et al.*, 2014).

Un muffin (**Figure 3**) contient environ 50 % de matières grasses, ce qui lui confère une texture lisse et spongieuse (Ahsan *et al.*, 2025). Pendant la cuisson, les processus de transfert de chaleur et de masse conduit à l'évaporation de l'eau, le changement de volume, la transition pâte/mie attribuée à la dénaturation des protéines, gélatinisation de l'amidon et formation d'une croûte et le brunissement non enzymatique (Soong *et al.*, 2014).



Figure 3 : Photographie D'un muffin (Otis Spunkmeyer, 2023)

2.2. Composition des muffins

Les principaux ingrédients entrant dans la préparation muffins sont la farine, les œufs, le yaourt, l'huile et d'autres ingrédients qui peuvent dépendre de la recette de différentes régions. (Gashi *et al.*, 2024). L'analyse détaillée des muffins (**Tableau III**) indique la présence d'humidité, de protéines, de graisses, d'hydrates de carbone, de cendres, de fibres brutes, etc (Shukla *et al.*, 2024).

Tableau III : Composition nutritionnelle des muffins (pour 100 g)

Paramètre	Contenu moyen observé (%)	Références
Humidité (%)	23,14 – 37,48	(Aranibar <i>et al.</i> , 2019; Rabail <i>et al.</i> , 2022; Rauf <i>et al.</i> , 2024)
Cendres (%)	1,65 – 3,09	
Lipides (%)	18,11 – 23,79	
Protéines (%)	4,87 – 13,80	
Glucides	31,58 – 73,48	

3. Intérêt de l'enrichissement par les graines de chia

Il existe un intérêt croissant pour l'ajout de valeur aux produits alimentaires en utilisant de nouveaux ingrédients alimentaires fonctionnels. Le développement de nouveaux produits est donc un domaine stratégique de l'industrie alimentaire. Les consommateurs demandent des aliments qui présentent deux propriétés principales : la première concerne les aspects nutritionnels de l'aliment, tandis que, dans un second temps, des avantages supplémentaires pour la santé sont attendus de leur ingestion régulière (Sharma *et al.*, 2020).

Les muffins, en tant que produits de boulangerie sucrés, sont très appréciés par les consommateurs pour leurs caractéristiques physicochimiques et leur goût. Toutefois, la demande pour des produits de boulangerie plus riches en fibres alimentaires et en protéines ne cesse de croître pour des raisons de santé, car les produits traditionnels, principalement fabriqués à partir de farine de blé raffinée, sont pauvres en ces nutriments (Gashi *et al.*, 2024).

III. Le safran

1. Présentation et origine du safran

Le safran (*Crocus sativus* L.) est plante vivace appartenant à la famille des iridacées, a une valeur économique et culturelle importante dans le monde entier (Feizi *et al.*, 2025).

Le safran est célèbre pour ses stigmates séchés qui en font l'épice la plus chère au monde. Ils se caractérisent par la présence d'apocaroténoïdes majeurs tels que la crocine, la crocétine, la picrocrocine et le safranal, responsables de sa qualité et de sa valeur commerciale (Jalal *et al.*, 2025). La production de safran demande un travail manuel important en particulier pour la récolte des fleurs et l'émondage. En moyenne, il faut environ 150 000 fleurs et 400 heures de travail pour obtenir un kilogramme de safran sec, ce qui correspond à près de 450 000 stigmates (Aboudrare *et al.*, 2014). L'Iran est réputé pour être le plus grand producteur et exportateur de safran au monde (Feizi *et al.*, 2025).

La plante fleurit en automne et est en dormance pendant les mois d'été. La couleur des pétales (lilas à mauve) est la caractéristique principale de la fleur ainsi que ses trois stigmates rouge vif (Figure 4) qui peuvent atteindre une longueur de 25-30 mm. Les fleurs du safran sont stériles ; la plante ne peut donc pas produire de graines viables et doit être multipliée par voie végétative (Winterhalter et Straubinger, 2000).



Figure 4 : Stigmates et fleur du safran (Puttachar *et al.*, 2023)

2. Classification taxonomique du safran

La classification taxonomique du safran est détaillée ci-dessous (Maggi *et al.*, 2020) :

- **Division** : Spermatophyta
- **Subdivision** : Angiospermes
- **Classe** : Monocotylédones
- **Sous-classe** : Liliidae
- **Ordre** : Liliales

- Famille : *Iridaceae*
- Genre : *Crocus*
- Espèce : *Crocus sativus*

3. Composition chimique du safran

La composition chimique du safran est bien documentée. De nombreuses études antérieures menées dans différents pays ont rapporté la composition approximative de *C. sativus* comme suit : humidité (10 %), divers sucres (63 %), protéines (12-14 %), acides aminés (12 %), minéraux (5 %), graisses (5-8 %), amidon (6-7 %), pectines (6 %), gommes et dextrines (9-10 %). (Marrone *et al.*, 2024).

La composition chimique globale de safran exprimée en pourcentage de la masse sèche est illustrée dans le tableau suivant (Bolhassani, 2018 ; Lingadahalli Puttachar *et al.*, 2023) :

Tableau IV : Composition chimique de safran

Constituants	Pourcentages (% MS)
Composés hydrosolubles	53 %
Gommes	10 %
Pentosanes	8 %
Pectines	6 %
Amidon	6 %
Fibres brutes	5%
Lipides totaux	12 %
Huiles non volatiles	6%
Huiles volatiles	1%
Protéines	12 %
Crocine	30%
Picrocrocine	5 à 15 %
Safranal	2.5%
Vitamines B1 (riboflavine), B2 (thiamine)	(0,3-1,38 %)
Glucose	(7-8 %),

La crocine, la picrocrocine et le safranal sont les principaux composés de safran. La crocétine est un caroténoïde lipophile inhabituel composé de conjugués d'acides oléfiniques multi-insaturés. La formule moléculaire de la crocétine est $C_{20}H_{24}O_4$ (Kothari *et al.*, 2021).

La crocine est un pigment caroténoïde responsable de la couleur jaune-orange de l'épice, elle représente environ 80 % du total des constituants chimiques (Mzabri *et al.*, 2019). Sa formule moléculaire est $C_{44}H_{64}O_{24}$ (Kothari *et al.*, 2021).

La saveur spécifique du safran provient principalement de la picrocrocine, qui est présente en quantité légèrement inférieure à celle de la crocine en termes de poids. Lors de la déglycosylation naturelle, la picrocrocine produit du safranal, un autre composant chimique essentiel, qui est principalement responsable de l'odeur du safran. La picrocrocine est responsable de l'astringence du safran. (Kothari *et al.*, 2021).

4. Utilisations alimentaires du safran

Le safran est largement utilisé dans l'industrie alimentaire, principalement à des fins culinaires. Dans des pays comme l'Inde, l'Italie, l'Iran, la France, l'Espagne et le Maroc comme additif alimentaire, arôme ou condiment pour le riz (Ahmed *et al.*, 2020).

Le stigmate de la plante a été largement utilisé à des fins culinaires, comme agent aromatique et colorant dans divers aliments tels que les pâtisseries et les boissons. En outre, le safran a été ajouté à diverses formulations alimentaires pour le développement de nouveaux produits (Bakshi *et al.*, 2022).

L'utilisation du safran comme colorant alternatif est avantageuse dans le domaine alimentaire raison à la grande solubilité de la crocine dans l'eau, ainsi que le puissant pouvoir colorant du safran (Mzabri *et al.*, 2019).

Le safran est considéré comme une alternative ou une source de colorant naturel pour remplacer les colorants alimentaires synthétiques ou nocifs (Ahmed *et al.*, 2020).

Les composés phytochimiques du safran (comme la crocine, la crocétine, le safranal et les flavonoïdes) améliorent la valeur nutritionnelle des produits et protègent les humains contre divers troubles notamment les maladies neurodégénératives (Alzheimer, Parkinson), les troubles psychiatriques (dépression, anxiété), les maladies cardiovasculaires, le diabète, le stress oxydatif, l'inflammation chronique et certains cancers (Maqbool *et al.*, 2022).

IV. Les antioxydants

1. Définition des antioxydants

Les antioxydants sont une classe de substances chimiques naturellement présentes dans notre alimentation et qui peuvent prévenir ou réduire le stress oxydatif du système physiologique (**Mamta *et al.*, 2013**). Les antioxydants agissent en retardant ou en empêchant l'oxydation d'autres substances chimiques. Les sources d'antioxydants naturels sont principalement les plantes, c'est-à-dire les légumes comestibles, les fruits, les épices et les herbes, qui sont riches en vitamines, en composés phénoliques, en caroténoïdes et en microéléments (**Flieger *et al.*, 2021**).

2. Classification des antioxydants

Les antioxydants sont généralement classés en deux catégories : les antioxydants enzymatiques et les antioxydants non enzymatiques. Parmi eux, il existe plusieurs composés ayant des modes et des lieux d'action différents et des effets finaux différents (**Flieger *et al.*, 2021**).

Les défenses antioxydantes enzymatiques comprennent la superoxyde dismutase (SOD), la glutathion peroxydase (GPx) et la catalase (CAT). Les antioxydants non enzymatiques sont représentés par l'acide ascorbique (vitamine C), l' α -tocophérol (vitamine E), le glutathion (GSH), les caroténoïdes, les flavonoïdes et d'autres antioxydants (**Valko *et al.*, 2007**).

Les antioxydants primaires sont principalement des briseurs de chaîne, capables de piéger les espèces radicalaires par don d'hydrogène. Les antioxydants secondaires sont des inhibiteurs de l'oxygène singulet, des décomposeurs de peroxydes, des chélateurs de métaux, des inhibiteurs d'enzymes oxydatives ou des absorbeurs de rayons UV (**Pisoschi et Pop, 2015**).

3. Mécanismes d'action des antioxydants

En général, la défense antioxydante comprend différents mécanismes (**Tableau V**). Parmi ceux-ci, on trouve le retardement ou l'inhibition de la production de radicaux libres, le piégeage des radicaux libres, la transformation de radicaux libres en composés moins toxiques et le retardement de la formation d'espèces actives secondaires toxiques (**Losada-Barreiro *et al.*, 2022**).

Tableau V : Mécanismes d'action des antioxydants (Charlton *et al.*, 2023)

Mécanisme	Équations
Le piégeage direct des radicaux : - Le mécanisme HAT, l'antioxydant réagit avec le radical libre en transférant l'un de ses atomes d'hydrogène au radical par rupture homolytique d'une liaison OH - le mécanisme SET, un électron unique est transféré de l'antioxydant au radical, ionisant ainsi les deux composés	$\text{ArOH} + \text{R} \cdot \rightarrow \text{ArO} \cdot + \text{RH}$ $\text{ArOH} + \text{R} \cdot \rightarrow \text{ArOH}^{\bullet+} + \text{R}^-$
Mécanismes mixtes HAT et SET	
Mécanisme de transfert séquentiel d'électrons par perte de proton (SPLET)	$\text{ArOH} \rightarrow \text{ArO}^- + \text{H}^+ \quad (3) \quad \text{ArO}^- + \text{ROO} \cdot \rightarrow \text{ArO} \cdot + \text{ROO}^-$

HAT : Hydrogen Atom Transfer (Transfert d'atome d'hydrogène)

SET : Single Electron Transfer (Transfert d'électron singulet)

4. Impact des antioxydants sur la santé

Il est prouvé que les radicaux libres peuvent s'accumuler dans l'organisme avec l'âge, déclenchant le processus de vieillissement et provoquant plusieurs affections neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer, la maladie de Parkinson, la dystrophie musculaire et l'athérosclérose (Flieger *et al.*, 2021).

Les antioxydants jouent un rôle crucial dans la santé humaine, car ils sont capables de d'inhiber ou de retarder les réactions d'oxydation indésirables, et donc de prévenir le stress oxydatif lié à des maladies telles que l'hypertension artérielle, les troubles neurodégénératifs ou le cancer (Rumpf *et al.*, 2023).

5. Méthodes d'évaluation de l'activité antioxydante

L'activité antioxydante est évaluée par la capacité de capture des radicaux libres DPPH et ABTS, ainsi que par la capacité antioxydante réductrice du fer (FRAP) (**Donoso-Bustamante et al., 2025**), comme indiqué ci-dessous.

Tableau VI : Quelque tests pour l'évaluation de l'activité antioxydante (**Rumpf et al., 2023**)

	DPPH	ABTS	FRAP
Principe de la méthode	Réaction avec un radical organique	Réaction avec un cation radical organique	Réaction avec un complexe Fe (III)
Mécanisme de réaction	Mode mixte (HAT & SET)	Mode mixte (HAT & SET)	SET
Détermination du produit final	Colorimétrie (décoloration) à 518 nm	Colorimétrie (décoloration) à 734 nm	Colorimétrie (formation de couleur) à 593 nm
pH de travail	5–9	3–9	3.6
Polarité des antioxydants	Hydrophobe (uniquement solvants organiques)	Hydrophile & lipophile	Hydrophile (uniquement en solution aqueuse)

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

ABTS : 2,2'-Azino-bis(3-éthylbenzothiazoline-6-sulfonique) acide ;

FRAP : Ferric Reducing Antioxidant Power (Pouvoir antioxydant de réduction du fer).

Partie 2

Matériel et méthodes

1. Objectif du travail

L'objectif de notre étude est d'analyser l'effet de l'incorporation de graines de chia et du safran (séparément ou simultanément), à différentes concentrations, sur la composition en polyphénols totaux et sur l'activité antioxydante des muffins, en vue de développer un produit à valeur ajoutée.

Notre étude a été menée au niveau du laboratoire de nutrition alimentation du bloc des laboratoires numéro 09 de l'université de Bejaia pendant un mois (Annexe III).

2. Échantillonnage

Le matériel et les réactifs utilisés dans cette étude sont répertoriés dans l'Annexe II. Les ingrédients (sucre, lait, huile, œufs, farine, levure chimique et graines de chia) ont été achetés à la supérette Ritaj Mall, Rue Mahfoudi Fatah, Béjaïa

Le sucre de dattes a été choisi pour la préparation des muffins à la place du sucre de canne étant donné que le sucre de dattes est composé à 100% de dattes dénoyautées, séchées et finement broyées. Ainsi, tous les bénéfices nutritionnels de la datte sont conservés : fibres naturelles, tanins, flavonoïdes, vitamines (telles que la vitamine B6) et minéraux.



Figure 5 : Ingrédients utilisés pour la préparation des muffins.

3. Préparation des muffins

Les ingrédients constitués de farine tamisée (128g), de levure chimique (2g), sucre de dattes (50g), de lait (100ml), d'huile végétale (30 g) et d'un œuf ont été mélangés à l'aide d'un batteur électrique à une vitesse de 80 rpm pendant 1min, La pâte obtenue a été ensuite

pesée dans des caissettes en papier (30 g dans chacune). Ces dernières ont été placées dans un moule à muffins et enfournées pendant 13 min à 170°C (Soong *et al.*, 2014).

Pour la préparation des muffins enrichis en farine de chia, 10, 20, 30 et 40 % de farine de blé ont été substitués avec des quantités équivalentes de farine de chia pour enfin obtenir 5 échantillons : un témoin T (recette traditionnelle) et des muffins enrichis avec 10, 20, 30 et 40 % de farine de chia (formulation 1). Deux autres formulations ont également été réalisées :

Formulation 2 : constituée d'un témoin S, un échantillon préparé avec la recette traditionnelle et 20 mg de safran, et des échantillons enrichis avec 10, 20, 30 et 40% de farine de chia et de 20 mg de safran ;

Formulation 3 : constituée d'un échantillon préparé avec la recette traditionnelle et additionnée de 40mg de safran et des échantillons enrichis avec 10, 20, 30, et 40 % de farine de chia et de 40 mg de safran.

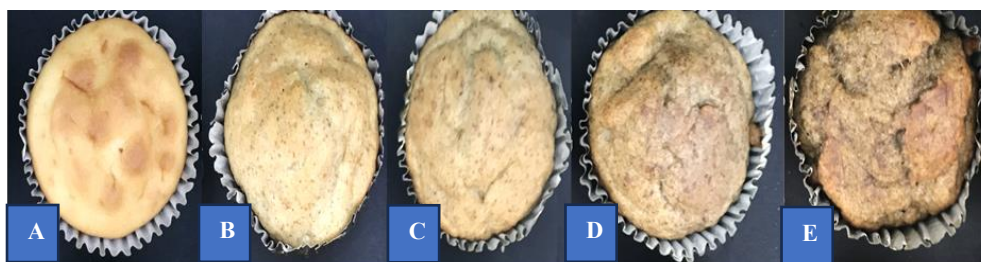


Figure 6 : Muffins enrichis avec 0, 10, 20, 30 et 40 % de farine de chia.

A : Muffin témoin (sans graines de chia, sans safran), B : Muffin avec 10 % de graines de chia, C : Muffin avec 20 % de graines de chia, D : Muffin avec 30 % de graines de chia, E : Muffin avec 40 % de graines de chia



Figure 7 : Muffins enrichis avec 0, 10, 20, 30 et 40 % de farine de chia et 20 mg de safran.

A : Muffin témoin (sans graines de chia, sans safran), B : Muffin avec safran sans graines de chia, C : Muffin avec 10 % de graines de chia et 20 mg de safran, D : Muffin avec 20 % de graines de chia 20 mg de safran, E : Muffin avec 30 % de graines de chia 20 mg de safran, F : Muffin avec 40 % de graines de chia 20 mg de safran.



Figure 8 : Muffins enrichis avec 0, 10, 20, 30 et 40 % de farine de chia et 40 mg de safran.

A : Muffin témoin (sans graines de chia, sans safran), B : Muffin avec safran sans graines de chia, C : Muffin avec 10 % de graines de chia et 40 mg de safran, D : Muffin avec 20 % de graines de chia 40 mg de safran, E : Muffin avec 30 % de graines de chia 40 mg de safran, F : Muffin avec 40 % de graines de chia 40 mg de safran.

4. Caractérisation physique des muffins

La perte de poids (%) des muffins a été calculée comme la diminution fractionnaire entre le poids des pâtes (avant cuisson) et celui des muffins (après cuisson), selon l'équation suivante :

$$\text{Perte de poids (\%)} = (\text{poids de la pâte} - \text{poids du muffin}) / \text{poids de la pâte} \times 100$$

La hauteur (cm) et le diamètre (cm) des muffins ont été déterminés selon les méthodes décrites respectivement par **Martínez-Cervera *et al.* (2012)** et **Amorim *et al.* (2021)**, à l'aide d'un pied

à coulisse (CD-800CSX, Mitutoyo Corp. Kawasaki, Japon). La hauteur a été enregistrée à partir du point le plus haut du muffin jusqu'au fond de la caissette en papier.

5. analyses physicochimiques des muffins

5.1. Préparation des poudres de muffins

Les muffins sont tout d'abord séchés à l'étuve (40°C pendant 48 heures) pour réduire leur teneur en eau. Une fois secs, ils sont broyés et la poudre obtenue est tamisée afin d'obtenir des particules de taille inférieure ou égale à 500 µm. Les poudres tamisées sont enfin conservées dans des flacons opaques en verre à 4°C jusqu'à analyse.

5.2. Mesure du taux d'humidité

Le taux d'humidité est mesuré selon la méthode **ISO (2015)**.

 **Principe** : La teneur en humidité est la perte de masse après séchage de l'échantillon dans une étuve réglée à 105 °C ± 2 °C, pendant un temps déterminé ou jusqu'à masse constante. La perte de masse correspond à la quantité d'eau évaporée.

 **Mode opératoire** : Chauffer les coupelles vides à 105 °C, puis les placer au dessiccateur et peser (m_1). Peser environ 2 g d'échantillon (poudre de muffins) dans chaque coupelle (m_2), et les placer à l'étuve à 105 °C pendant deux heures. Laisser les coupelles refroidir au dessiccateur et peser (m_3), puis répéter jusqu'à ce que la différence entre deux pesées n'excède pas 0,0005 g.

Le taux d'humidité a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Taux d'humidité \%} = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} \times 100$$

Où :

- m_1 : masse de la coupelle vide (g) ;
- m_2 : masse de la coupelle + échantillon avant séchage (g) ;
- m_3 : masse de la coupelle + échantillon après séchage (g).

5.3. Mesure du taux de cendres des muffins

✚ **Principe** : Le taux de cendres correspond à la substance minérale contenue dans le produit, déterminée suite à une destruction des matières organiques par chauffage de l'échantillon à une température de $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à obtention d'une masse constante (AOAC, 1995).

✚ **Mode opératoire** : Chauffer les creusets pendant 2 h dans le four à moufle réglé à $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Après refroidissement jusqu'à température ambiante dans un dessiccateur, les peser (m_1). À l'aide de la balance analytique, peser environ 2 g d'échantillon (poudre de muffins) (m_2), puis, replacer les creusets dans le four à moufle jusqu'à carbonisation complète de la prise d'essai. Après incinération, retirer les creusets du four, les refroidir dans le dessiccateur et les peser (m_3).

Le taux de cendres a été calculé selon la formule suivante :

$$\text{Taux de cendres (\%)} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100$$

Où :

- m_1 : masse du creuset vide ;
- m_2 : masse du creuset avec l'échantillon ;
- m_3 : masse du creuset avec le résidu de cendres.

5.4. Analyse colorimétrique des muffins

La couleur des muffins a été mesurée en utilisant un colorimètre PCE-XXM 30.

✚ **Principe** : Il s'agit d'un système normalisé qui permet de représenter la couleur à l'aide de trois paramètres L^* mesure la clarté, a^* exprime la position sur l'axe vert (valeur négative) / rouge (valeur positive) et b^* : exprime la position sur l'axe bleu (valeur négative) / jaune (valeur positive) (Nano-Lab, 2025).

✚ Le ΔE est une mesure de la différence de couleur entre deux échantillons. Il permet de quantifier à quel point deux couleurs sont perçues comme différentes par l'œil humain.

La différence de couleur (ΔE) entre les échantillons a été calculée selon la formule suivante :

$$\Delta E = \sqrt{(L2^* - L1^*)^2 + (a2^* - a1^*)^2 + (b2^* - b1^*)^2}$$

1 et 2 font référence aux deux échantillons comparés : l'échantillon 1 correspond au témoin (sans ajout de chia ou de safran), tandis que 2 désigne le muffin enrichi.

6. Extraction et dosage des composés phénoliques

6.1. Délipidation des poudres

✚ **Principe :** Le concept de la délipidation consiste à éliminer les lipides résiduels susceptibles de perturber les analyses ultérieures (**Kwaku Gyebi Duodu, 2011**).

✚ **Mode opératoire :** 1 g de poudre de muffins et 10 ml d'hexane sont agité pendant un certain temps (5 heures), puis le mélange est filtré pour séparer la phase liquide (graisses + solvant). Enfin la poudre est séchée pour évaporer tout résidu de solvant (**Aranibar et al., 2019**).

6.2. Extraction des composés phénoliques libres

Les extraits éthanoliques utilisés pour déterminer la teneur phénolique totale (TPC) et le potentiel antioxydant des muffins séchés, broyés et dégraissés ont été préparés en suspendant 1 g de l'échantillon de muffin dans 10 ml d'éthanol/eau 4 :1 (v/v). Les échantillons ont été agités pendant 1 h 30 min sur une plaque agitatrice. Les extraits ont été ensuite centrifugés à 6000 ppm pendant 20 min (**Contini et al., 2022**). Les surnageants ont été récupérés et les résidus sont conservés pour l'extraction ultérieure des polyphénols liés.

6.3. Extraction des composés phénolique liés

Le résidu issu de l'extraction des composés phénoliques libres a été agité avec du NaOH a 2M (5ml) pour extraire les composés phénoliques liés pendant 1 heure à température ambiante. La suspension a été ajustée à un pH de 2 ($\pm 0,1$) avec de l'acide chlorhydrique concentré. Le résidu acidifié a été agité avec 10 ml d'éther diéthylique : acétate d'éthyle (1 :1) pendant 1 minute, puis centrifugé pendant 10 minutes à 10 000 tr/min. L'extraction a été répétée trois fois et les surnageants regroupés ont été évaporés jusqu'à siccité à 33°C sous pression. Le résidu résultant a été ramené à 5 ml en utilisant de l'éthanol à 80 % (**Soong et al., 2014**).

6.4. Dosage des composés phénoliques

✚ **Principe :** La méthode de Folin–Ciocalteu repose sur une réaction de transfert d'électrons dans laquelle les composés antioxydants (comme les polyphénols) agissent comme donneurs d'électrons, et le réactif Folin-Ciocalteu comme accepteur. La réduction des dérivés anioniques des acides phosphotungstique et phosphomolybdique par les antioxydants entraîne un changement de couleur du jaune au bleu. L'amplitude de ce changement, une fois la réaction achevée, est directement proportionnelle à l'activité réductrice des composés phénoliques. Cette capacité réductrice est généralement exprimée en équivalents d'acide gallique (GAE) (Pérez *et al.*, 2023).

✚ **Mode opératoire :** 50 ul d'extrait phénolique, 2 ml d'eau distillée, 200 ul de Folin-Ciocalteu et 800 ul de carbonate de sodium (15,9 % p/v), sont introduits dans des tubes à essai. Les tubes ont été vortexés, puis chauffés dans un bain-marie pendant 5 minutes à 50 C. Les absorbances sont enfin mesurées à 765 nm. Les résultats ont été exprimés en équivalents d'acide gallique/ g de poids secs (mg EAG/g de poids sec) en référence à une courbe d'étalonnage préparée avec des concentration croissantes d'acide gallique (Annexe II) (Cardozo *et al.*, 2010).

7. Mesure de l'activité antioxydante

7.1. Activité scavenger sur le radical DPPH

✚ **Principe :** Le test DPPH (2,2-diphényle-1-picrylhydrazyle) se caractérise par la transformation d'une solution contenant le radical DPPH en présence d'un antioxydant fournisseur d'hydrogène (AH), menant à l'émergence d'une forme non radicalaire DPPH-H (Shah et Modi 2015).

✚ **Mode opératoire :** Un mélange réactionnel contenant 100ul d'extrait phénolique et 3,9 ml de solution de DPPH a 6 mM a été préparé, La préparation est laissée à l'obscurité pendant 20 min et les absorbances sont enfin mesurées au spectrophotomètre a 515 nm. Un contrôle a été préparé en remplaçant l'extrait par le solvant d'extraction (Bhat *et al.*, 2018).

L'activité antioxydante est estimée selon la formule suivante :

$$\text{DPPH (\%)} = \frac{\text{Absorbance du contrôle} - \text{Absorbance de l'échantillon}}{\text{Absorbance du contrôle}} \times 100$$

7.2. Activité antiradicalaire sur le radical ABTS

✚ **Principe :** Le test ABTS se base sur la production du radical cation $\text{ABTS}^{\bullet+}$ par l'interaction de l'ABTS avec le persulfate de potassium. Ce radical a une capacité d'absorption maximale à 734 nm. Lorsqu'il est en présence d'antioxydants, le radical ABTS^+ subit une réduction, entraînant une baisse de l'absorbance détectée à cette longueur d'onde (Shah et Modi, 2015).

✚ **Mode opératoire :** La solution d'ABTS à 7 mM a été obtenue en dissolvant 38,4 mg d'ABTS avec 6,62 mg de persulfate de potassium dans 10 mL d'eau distillée. Le mélange a ensuite été agité pendant 5 min et incubé pendant une durée de 16 heures à température ambiante et à l'abri de la lumière. Pour obtenir une densité optique de $0,7 \pm 0,02$ à 734 nm, la solution a été diluée avec un volume requis d'eau distillée. Pour le test d'inhibition de l'ABTS, 200 μL de l'extrait à doser ont été ajoutés à 1800 μL de la solution d'ABTS, Après 6 min d'incubation à l'obscurité, les absorbances ont été mesurées à 734 nm. Un contrôle a été préparé en remplaçant l'extrait par le solvant d'extraction (Re, 1999).

Les résultats ont été calculés selon la formule suivante :

$$\% \text{ d'inhibition de L'ABTS} = \frac{\text{Absorbance du contrôle} - \text{Absorbance de l'échantillon}}{\text{Absorbance du contrôle}} \times 100$$

8. Extraction et quantification des composés du safran

1 g de poudre de safran est pesé dans un flacon de couleur ambrée, puis 15 ml d'eau distillée sont ajoutés. Le mélange a été agité pour maximiser l'extraction des composés bioactifs pendant 24 h à l'obscurité. Après extraction, le mélange a été filtré et conservé au congélateur (-18°C) pour la suite de l'analyse.

La quantification des métabolites du safran a été effectuée en suivant les normes ISO/TS 3632. Selon cette procédure, la picrocrocine, le safranale et la crocine sont dosées par lecture directe de l'absorbance d'une solution aqueuse à 1 % de safran aux longueurs d'onde de 257 nm, 330 nm et 440 nm, respectivement (Bhat *et al.*, 2018).

Les teneurs en picrocrocine, safranal et crocine sont calculées par la formule :

$$E_{1cm} \% = (D \times 10\,000) / (m \times (100 - H))$$

Où

- D : l'absorbance spécifique ;
- M : masse du safran (g) ;
- H : teneur en eau et en matières volatiles.

9. Analyse statistique

Toutes les analyses ont été réalisées en triple, à l'exception des caractéristiques physiques qui ont fait l'objet de 10 répétitions.

Les résultats obtenus ont été analysés statistiquement à l'aide d'une analyse de la variance (ANOVA), suivie du test de comparaison multiple de Fisher (LSD) afin de déterminer les différences significatives entre les échantillons. Les différences entre les moyennes ont été considérées comme statistiquement significatives au seuil de probabilité de $p < 0,05$. Des lettres distinctes (A, B, C...) ont été utilisées dans les tableaux de résultats pour indiquer les moyennes statistiquement différentes.

Partie 3
Résultats et discussion

1. Caractéristiques physiques des muffins

La figure 9 présente les propriétés physiques des échantillons de muffins enrichis en farine de chia. Les résultats montrent que le poids des muffins reste globalement constant, sans différences significatives entre les différentes formulations ($P > 0.05$). Par ailleurs, la hauteur des muffins est similaire entre les échantillons, à l'exception de celui contenant 30 % de farine de chia, qui affiche une valeur significativement plus élevée. En ce qui concerne la largeur, elle tend à diminuer lorsque le taux d'enrichissement en farine de chia atteint 20 %, sans différence significative avec les taux de 30 % et 40 %.

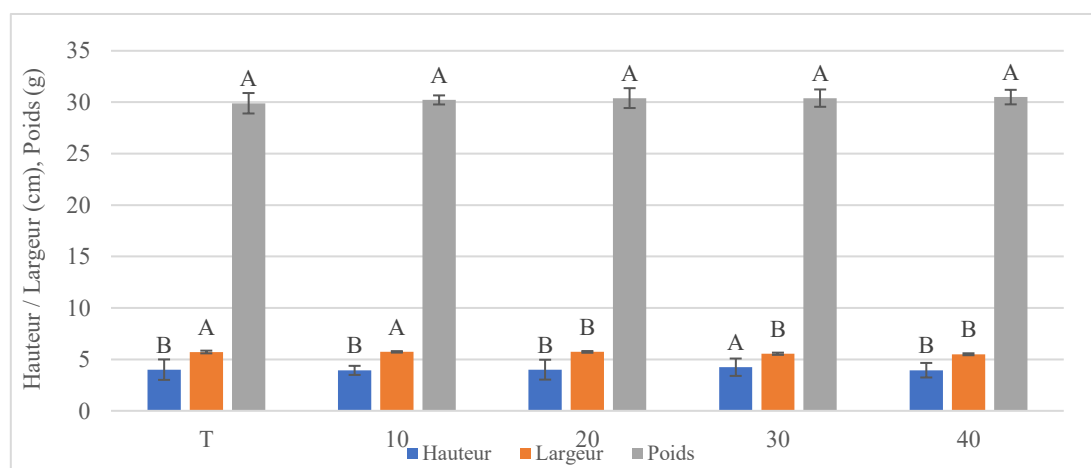


Figure 9 : Caractéristiques physiques des muffins enrichis en farine de chia.

T : Muffins témoin (sans graines de chia, sans safran), 10 : Muffins avec 10 % de graines de chia, 20 : Muffins avec 20 % de graines de chia, 30 : Muffins avec 30 % de graines de chia, 40 : Muffins avec 40 % de graines de chia.

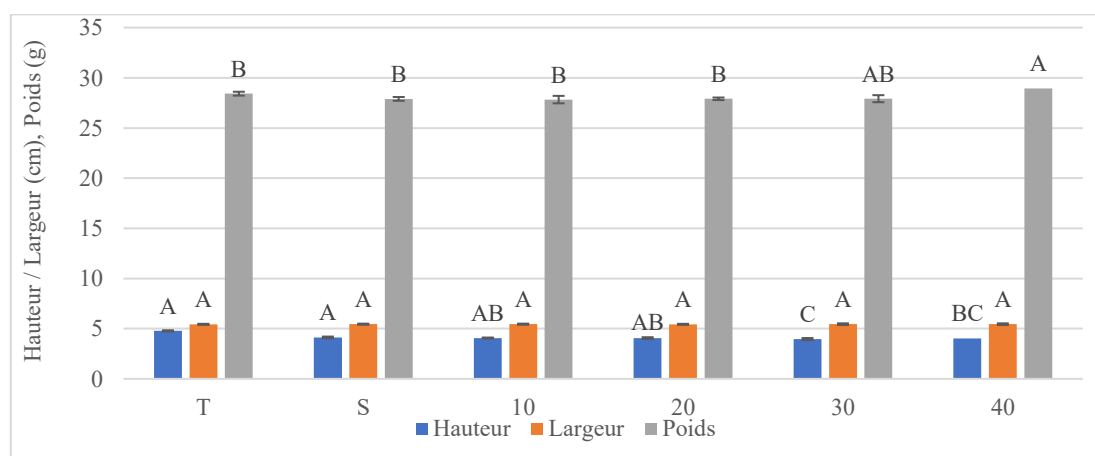


Figure 10 : Caractéristiques physiques des muffins enrichis en farine de chia et 20 mg de safran.

T : Muffin témoin (sans graines de chia, sans safran), S : Muffin avec safran sans graines de chia, 10 : Muffin avec 10 % de graines de chia et 20 mg de safran, 20 : Muffin avec 20 % de graines de chia 20 mg de safran, 30 : Muffin avec 30 % de graines de chia 20 mg de safran, 40 : Muffin avec 40 % de graines de chia 20 mg de safran.

D'après les résultats présentés dans la **figure 10**, on note quelques variations de poids entre les échantillons, mais elles ne sont pas statistiquement significatives ($P > 0,05$). Pour la hauteur, elle tend à diminuer à mesure que le taux d'enrichissement en farine de chia augmente, avec une valeur maximale enregistrée avec le taux de 30% (3.96 ± 0.08 cm). La largeur des muffins affiche des valeurs similaires parmi les échantillons testés ($P > 0.05$).

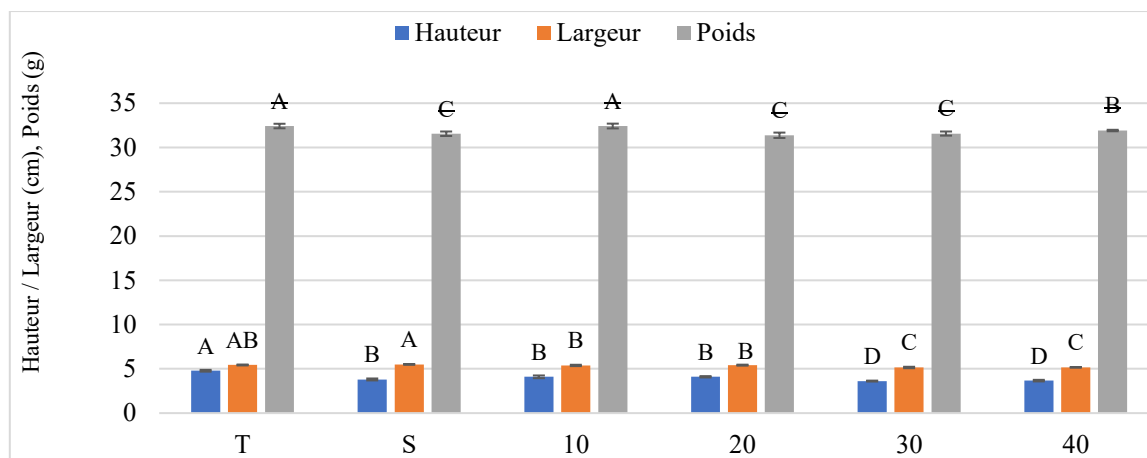


Figure 11 : Caractéristiques physiques des muffins enrichis en farine de chia et 40 mg de safran.

La hauteur des muffins enrichis en farine de chia et 40 mg de safran tend à diminuer à mesure que le pourcentage d'enrichissement en farine de chia augmente ($P < 0.05$), avec une valeur maximale enregistrée par le témoin (4.78 ± 0.09 cm) (**Figure 11**).

Concernant le poids, les échantillons enrichis avec des taux élevés de farine de chia affichent des valeurs plus basses que les autres ($P < 0.05$). La largeur des muffins rétrécit lorsque le pourcentage de substitution en farine de chia atteint les 20 % (5.41 ± 0.05 cm), avec les valeurs les plus basses notées pour le 40% (5.16 ± 0.1 cm) ($P < 0.05$).

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que l'enrichissement des muffins en graines de chia influence significativement certaines caractéristiques physiques, en accord avec plusieurs travaux. Ainsi, le poids des muffins reste relativement stable dans le cas d'un enrichissement en chia seul (10 à 40 %), ce qui rejoint les observations de **Aranibar *et al.* (2019)** et **Mihaylova *et al.* (2023)**, qui notent une augmentation légère ou non significative du poids, probablement liée à la capacité des fibres de chia à retenir l'eau. En revanche, l'ajout combiné de chia et de safran (40 mg) a montré une légère diminution du poids, suggérant une possible interaction défavorable à forte concentration.

La diminution progressive de la hauteur, particulièrement marquée avec les formulations à 40 mg de safran a également été décrite par **Aranibar *et al.* (2019)** ; ces auteurs relient cette diminution à la densification de la pâte (due à la forte teneur en fibres), réduisant la rétention d'air et donc la levée pendant la cuisson.

De même, **Mihaylova *et al.* (2023)** ont rapporté une diminution de la hauteur et du volume lors de l'utilisation de substituts d'œufs à base de gel de chia. L'ajout de safran à 20 mg semble avoir un effet bénéfique aux faibles concentrations de chia (10–20 %), mais n'atténue pas la perte de structure aux concentrations plus élevées. Enfin, la largeur des muffins n'a pas été significativement modifiée dans notre étude.

2. Paramètres physicochimiques des muffins

2.1. Taux d'humidité des muffins

Dans la formulation sans safran, On observe que le taux d'humidité des muffins demeure pratiquement constant parmi les échantillons étudiés (**Tableau VII**).

Tableau VII : Taux d'humidité des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia

Échantillons(0mg)	Humidité (%)
T	6.15 ± 0.35355339 (AB)
10	6.8 ± 0.28284271 (A)
20	5.8 ± 0.14142136 (AB)
30	5.35 ± 0.49497475 (B)
40	6.4 ± 0.56568542 (A)

Nos résultats d'analyses, illustrés dans la **figure 13** révèlent que l'humidité est quasiment constante parmi les échantillons tastés, à l'exception du 40% qui affiche une valeur significativement plus élevée (5.92 ± 0.09 %).

Tableau VIII : Taux d'humidité des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia et 20 mg de safran

Échantillons (20mg)	Humidité (%)
T	5.30439519 ± 0.045173 (C)
s	$5.47388719 \pm 0.016132064$ (B)
10	$5.51199938 \pm 0.057621175$ (B)
20	$5.5503695 \pm 0.167464761$ (B)
30	$5.60974721 \pm 0.129854865$ (B)
40	$5.92592401 \pm 0.037803108$ (A)

Nos données analytiques montrent que les muffins témoin (ne contenant pas de graines de chia), présentent la teneur en humidité la plus faible comparée aux échantillons enrichis (**Tableau IX**). L'humidité augmente progressivement avec l'ajout des graines de chia, avec une valeur maximale d'humidité enregistrée au taux d'incorporation de 40 % (6.41 ± 0.1 %).

Tableau IX : Taux d'humidité des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia et 40 mg de safran

Échantillons(40mg)	Humidité (%)
T	5.30439519 ± 0.045173 (D)
S	6.505178 ± 0.033218533 (BC)
10	$5.66912822 \pm 0.223610224$ (B)
20	$5.82571659 \pm 0.132016859$ (A)
30	$5.90083439 \pm 0.050396116$ (A)
40	$6.41077518 \pm 0.107037296$ (C)

La comparaison des trois formulations étudiées montre que l'incorporation de graines de chia augmente le taux d'humidité, indépendamment de la présence ou de la concentration de safran. Toutefois, la formulation contenant 40 mg de safran présente une augmentation plus marquée du taux d'humidité à mesure que le pourcentage de chia s'élève, avec des valeurs maximales observées pour un enrichissement à 40 % ($6,41 \pm 0,13$ %).

L'augmentation progressive du taux d'humidité, observée suite à l'ajout de graines de chia s'explique principalement par la capacité exceptionnelle de ces graines à absorber l'eau et à

former un gel. Cette propriété est due à la présence d'un mucilage naturellement présent à la surface des graines, composé de polysaccharides capables de retenir jusqu'à 27 fois leur poids en eau. Lorsqu'il est hydraté, ce mucilage forme une couche gélatineuse qui piège l'eau et la maintient dans la matrice du produit (Orona-Tamayo *et al.*, 2017).

De plus, La fraction riche en fibres obtenue à partir de farine de chia dégraissée a été rapportée avoir d'excellentes capacités de rétention d'eau, ce qui contribue directement à l'amélioration de la texture et de l'humidité dans les produits de boulangerie (Valdivia-Lopez & Tecante, 2015).

Ces caractéristiques expliquent pourquoi la formulation contenant une proportion plus élevée de chia (notamment à 40 %) retient mieux l'humidité. Cet effet est renforcé en présence de 40 mg de safran, probablement dû au fait que celui-ci renferme des composés hydrophiles, notamment la crocine, un caroténoïde hydrophile responsable de sa couleur caractéristique (Aissa *et al.*, 2023).

2.2. Taux de cendres des muffins

Le taux de cendres des muffins enrichis en chia et dépourvus de safran augmente de manière progressive et significative à mesure que le pourcentage de substitution en farine de chia augmente (Figure 12). Ainsi, la teneur la plus élevée est enregistrée par le 40 % ($3.69 \pm 0.1\%$ de MS).

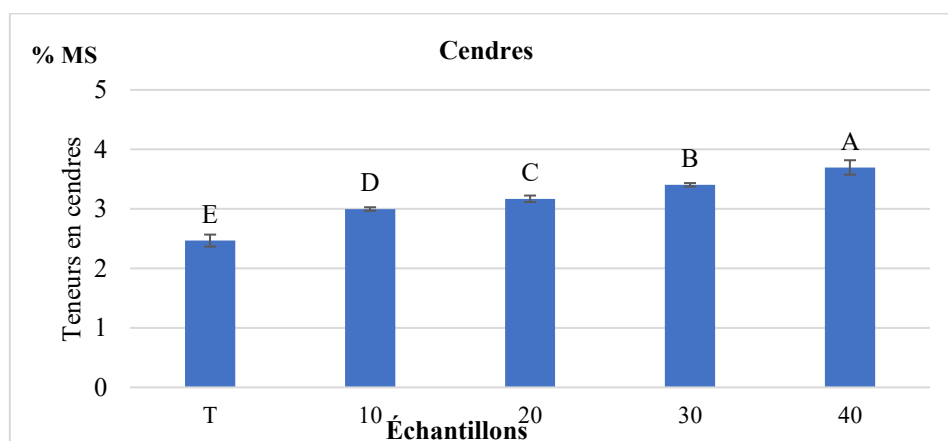


Figure 12 : Teneurs en cendres des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia.

Pour les formulations contenant 20 mg de safran, la même tendance est observée que pour les formulations dépourvues de safran, avec des valeurs maximales notées pour le 40% (**Figure 13**).

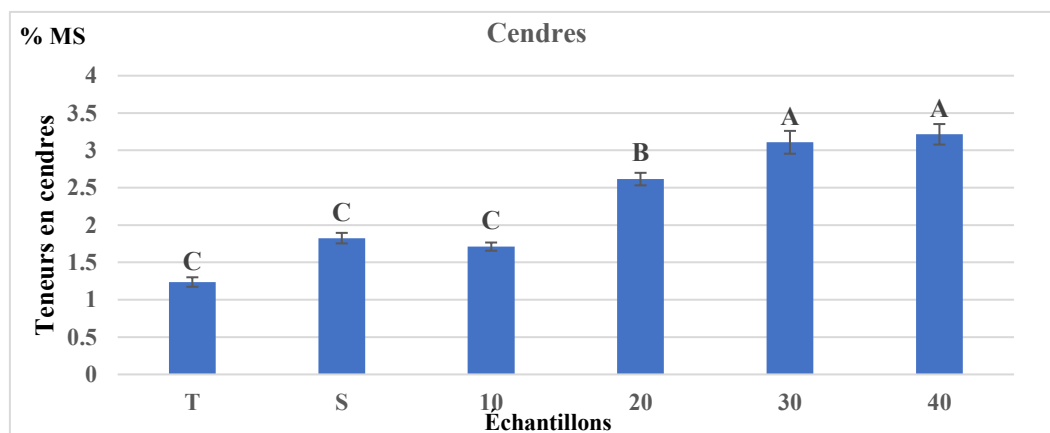


Figure 13 : Teneurs en cendres des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia et 20 mg d safran.

Pour les formulations à 40 mg de safran, les teneurs en cendres augmentent significativement à mesure que le taux de chia ajouté augmente (**Figure17**).

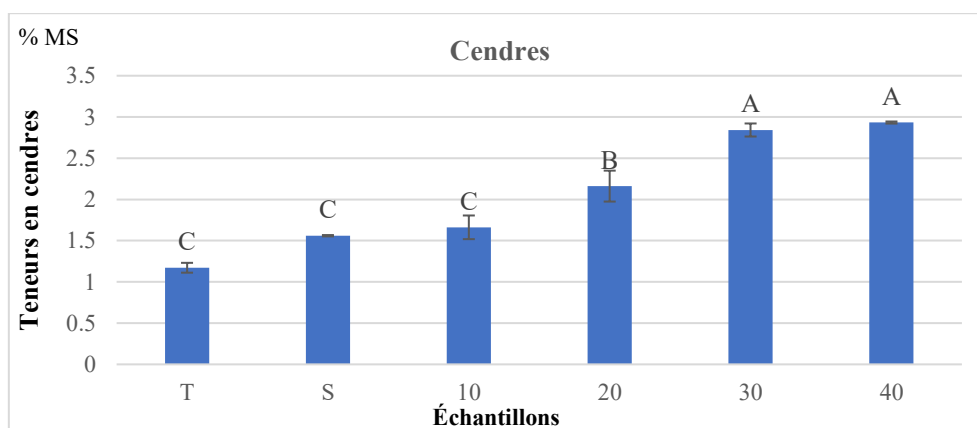


Figure 14 : Teneurs en cendres des muffins enrichis avec différents taux de farine de chia et 40 mg d safran.

L'enrichissement des muffins en chia induit une augmentation du taux de cendres pour les 3 formulations préparées. Des résultats similaires ont été rapportés par **Aranibar et al. (2019)** ainsi que par **Rabail et al. (2022)**, qui ont observé une hausse du taux de cendres dans des muffins enrichis en graines de chia. Cette évolution pourrait s'expliquer par la composition riche des graines de chia en minéraux. Elles contiennent notamment des quantités importantes de manganèse, phosphore, cuivre, sélénium, fer, magnésium et calcium, ce qui justifierait en partie cette augmentation (**Khalid et al., 2023**).

2.3. Couleur des muffins

La substitution partielle de la farine de blé par la farine de chia dans la préparation des muffins a engendré une chute drastique de la valeur de L^* , traduisant un assombrissement prononcé des échantillons enrichis (**Tableau X**). La composante a^* affiche une valeur maximale pour l'échantillon à 30 %, tandis qu'une valeur relativement très basse est enregistrée par le témoin. La composante b^* diminue de façon significative dans les échantillons enrichis, signalant une perte importante de la teinte rouge. L'indice ΔE^* augmente avec l'augmentation du taux de l'enrichissement, indiquant une altération colorimétrique très marquée et facilement perceptible à l'œil nu de tous les échantillons par rapport au témoin. En outre, les échantillons hautement enrichis diffèrent de façon plus marquée du témoin.

Tableau X : Couleur des muffins substitués avec différents pourcentage de farine de chia (0-40%).

Échantillons (0 mg)	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
T	50.8 ±1.52 a	0.26±0.08 e	37.3±2.75 b	0
10	27.26±1.69 b	4.21±0.72 d	47.33±2.64 a	25.89
20	16.32±1.54 c	11.87±0.96 b	27.5±2.79 c	37.70
30	6.66±2.23 d	17.25±1.23 a	10.9±1.52 d	54.20
40	5.82±1.05 d	10.65±1.24 c	7.4±1.69 e	55.02

Pour les formulations à 20 mg de safran, la même tendance est observée pour les composantes L^* , a^* et ΔE^* , alors que la composante b^* suit une tendance inverse vers la hausse à mesure que le taux de substitution augmente, ce qui témoigne d'une intensification des nuances jaunes (**Tableau XI**).

Tableau XI : Couleur des muffins substitués avec différents pourcentages de farine de chia et 20 mg de safran.

Échantillons (20mg)	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
S	69.37±1.06 a	8.1±0.69 c	34.35±1.79 c	9.5
10	63.1±0.56 b	8.67±0.2 bc	33.4±0.42 c	16.18
20	57.02±0.69 c	10.02±0.15 ab	36.22±0.51 b	18.83
30	55.92±1.13 c	11.25±1.1 a	39.82±0.35 a	23.74
40	48.37±1.77 d	11.2±1.8 a	40.6±1.08 a	24.07

La comparaison des échantillons appartenant à la formulation à 40 mg de safran indique que la luminosité, traduite par la composante L^* , est très prononcée pour le témoin (72.1 ± 1.1) et tend à diminuer avec l'augmentation du taux de substitution. L'échantillon S (sans chia, avec safran) est moins lumineux que le témoin et plus lumineux que les échantillons à 20, 30 et 40% de chia.

La valeur a^* affiche des valeurs similaires entre les échantillons testés, à l'exception de S qui montre une valeur significativement plus élevée, traduisant un penchant vers la teinte rouge (**Tableau XII**).

La composante b^* affiche des valeurs assez rapprochées entre les échantillons, avec une baisse significative pour les muffins fortement enrichis en chia. L'indice ΔE^* suit la même tendance que pour les formulations précédentes.

On remarque que l'enrichissement des muffins en chia et en safran a un impact remarquable sur leur couleur. Ceci se manifeste par une diminution significative progressive la luminosité dans toutes les formulations.

La composante a^* affiche une stabilité relative dans les formulations à 40mg de safran et une évolution dans les échantillons enrichis en chia pour les formulations à 20 mg de safran et les formulations sans safran.

La manifestation de la teinte jaune est beaucoup plus prononcée pour les formulations contenant du safran (20 et 40 mg) comparativement aux échantillons dépourvus de safran.

Tableau XII : Couleur des muffins substitués avec différents pourcentage de farine de chia et 40 mg de safran

Échantillons (40 mg)	L^*	a^*	b^*	ΔE^*
T	72.1 ± 1.15 a	9.17 ± 0.27 b	30.40 ± 0.37 c	0
S	62.6 ± 1.21 c	11.95 ± 1.22 a	36.65 ± 1.36 a	11.7
10	66.6 ± 0.52 b	8.55 ± 0.057 b	37.27 ± 0.25 a	8.82
20	59.97 ± 1.24 d	8.72 ± 0.27 b	33.22 ± 0.4 b	12.45
30	59.1 ± 0.70 d	8.3 ± 0.77 b	32.62 ± 0.33 b	13.21
40	57.22 ± 1.13 e	8.25 ± 0.46 b	33.55 ± 0.75 b	15.23

Les valeurs obtenues pour le paramètre L^* (luminosité) sont cohérentes avec celles rapportées par **Rabail et al. (2022)** ainsi que **Guedes de Melo et al. (2022)**, qui ont également observé une diminution progressive de la luminosité des muffins enrichis en graines de chia. Cette baisse

reflète un assombrissement du produit au fur et à mesure de l'augmentation du taux d'incorporation.

Cet assombrissement peut s'expliquer par la présence de caroténoïdes et de chlorophylles dans l'enveloppe des graines de chia (Aljobair et Patarata, 2022), par la couleur naturellement foncée de la farine de chia, ainsi que par l'intensification de la réaction de Maillard favorisée par sa richesse en protéines (Du *et al.*, 2025).

L'ajout de safran à différentes concentrations (20 et 40 mg) a significativement influencé les paramètres colorimétriques des muffins. En effet, les valeurs de a^* et b^* ont augmenté avec l'ajout de safran, indiquant une intensification des teintes rouges et jaunes. Cette tendance est particulièrement marquée dans les échantillons à 40 mg de safran, Cela s'explique par la richesse du safran en pigments naturels, notamment les caroténoïdes comme la crocine. La crocine qui est un pigment caroténoïde responsable de la couleur jaune-orange de l'épice (Mzabri *et al.*, 2019).

3. Teneurs en composés phénolique des muffins

L'enrichissement des muffins en farine de chia a eu un impact positif sur les teneurs en composés phénoliques libres et liés, avec une hausse du pourcentage graduelle et significative simultanée à la hausse du pourcentage du farine de chia ajoutée. L'échantillon incorporé de 40% de farine de chia affiche une concentration maximale en polyphénols libres de 1.2 ± 0.1 mg/g (Figure 15).

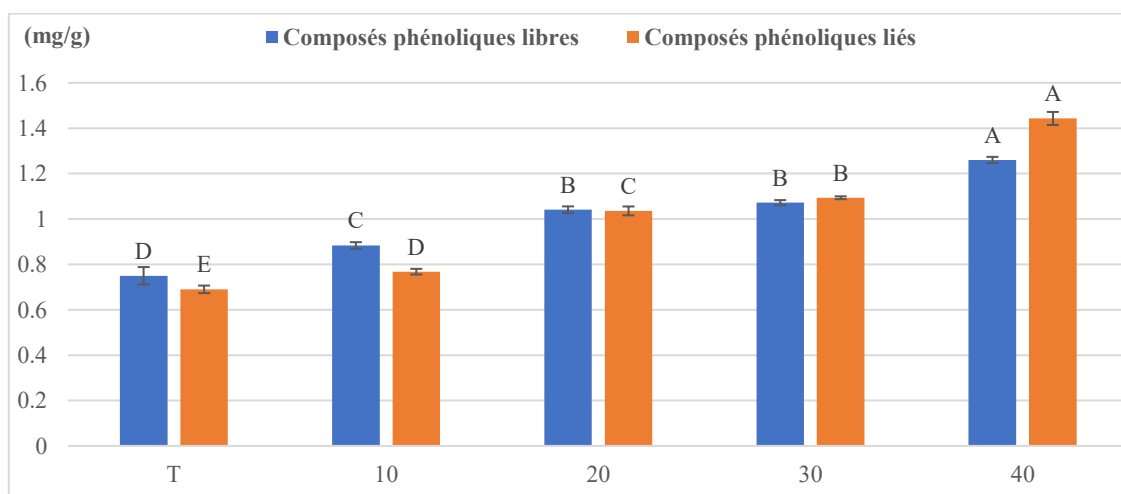


Figure 15 : Teneurs en composés phénoliques des muffins substitués avec différents % de farine de chia

Des tendances similaires ont été observées pour les formulations contenant 20 et 40 mg de safran (**Figure 16, 17**).

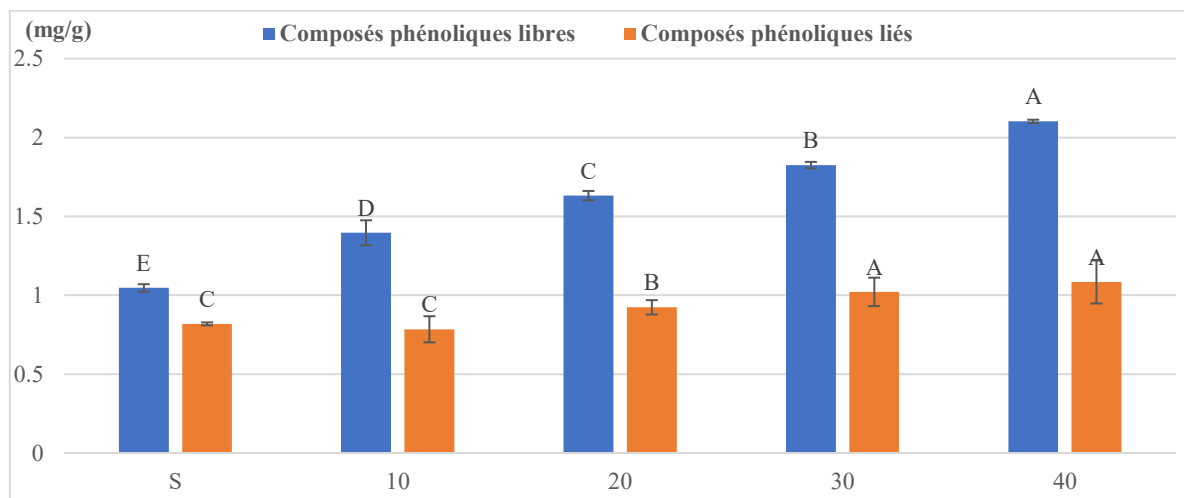


Figure 16 : Teneurs en composés phénoliques des muffins substitués avec différents % de farine de chia et 20 mg de safran.

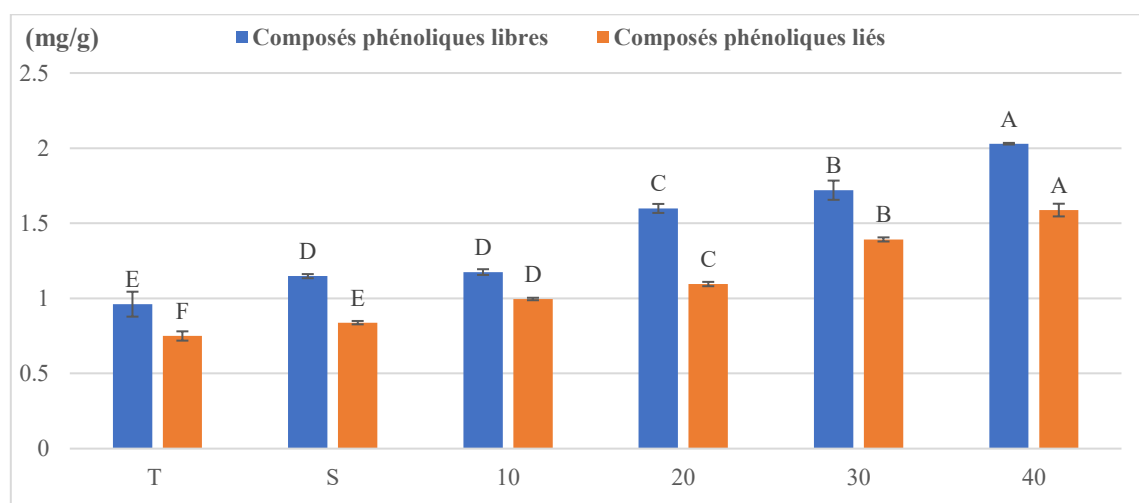


Figure 17 : Teneurs en composés phénoliques des muffins substitués avec différents % de farine de chia et 40 mg de safran.

Nos résultats sont en accord avec ceux rapportés par **Aranibar *et al.* (2019)**, qui ont observé une augmentation progressive de la teneur en composés phénoliques totaux dans des muffins enrichis en farine de chia partiellement déshuillée (PDCF). De manière générale, plusieurs études ont confirmé que l'enrichissement des muffins en graines, mucilage ou farine de chia conduit à une amélioration significative de la teneur en composés phénoliques (**Mihaylova *et al.*, 2023**).

Romankiewicz *et al.* (2017) ont, quant à eux, démontré que la farine de chia renferme environ six fois plus de composés phénoliques totaux que la farine de blé, ce qui corrobore notre constat. Cette richesse serait liée notamment à la présence d'acides phénoliques comme l'acide chlorogénique et l'acide caféique, ainsi qu'à certains flavonoïdes tels que la myricétine, la quercétine ou encore le kaempférol (**Valdivia-López et Tecante, 2015 ; Fernandes *et al.*, 2021**).

L'analyse ANOVA simultanée de l'ensemble des échantillons issus des trois formulations a montré que l'ajout de safran a significativement renforcé les teneurs en composés phénoliques libres, comme en témoignent les écarts significatifs observés entre les formulations contenant 20 et 40 mg de safran et celles sans safran. En revanche, l'incorporation de safran n'a pas exercé d'influence significative sur les concentrations en composés phénoliques liés ($P > 0,05$).

4. Activité antioxydante des muffins

4.1. Activité scavenger sur le radical DPPH

L'ajout de la farine de chia à différents pourcentages a entraîné une hausse graduelle et significative de l'activité scavenger du radical DPPH pour toutes les formulations étudiées (**Figure 18,19 et 20**).

Les composés phénoliques libres affichent généralement une activité antioxydante supérieure que celle induite par les composés phénoliques liés. Quelle que soit la formulation, les muffins à 40 % de chia exhibent toujours l'activité antioxydante la plus intense, qu'elles soient induites par les composés phénoliques libres ou liés dont les teneurs sont respectivement de 22.16 ± 0.08 % et de 20.7 ± 0.23 %.

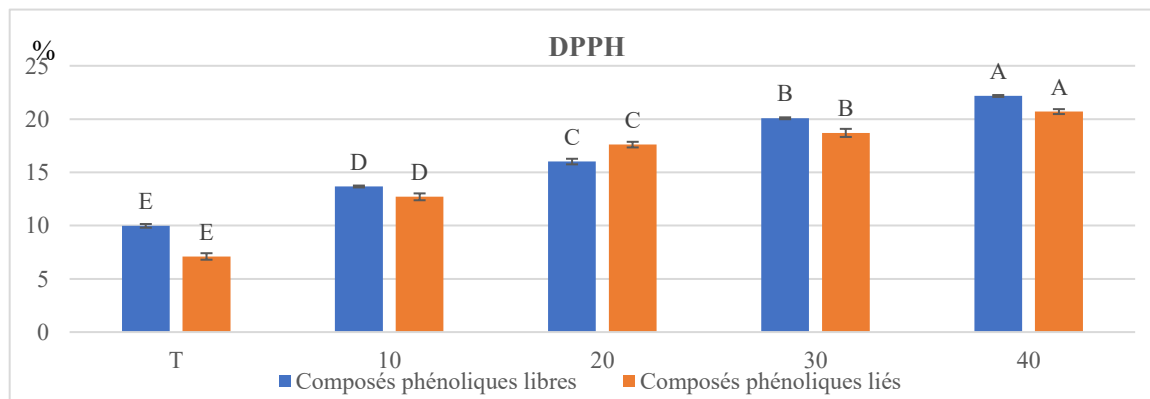


Figure 18 : Activité scavenger sur le radical DPPH des muffins substitués avec différents % de farine de chia.

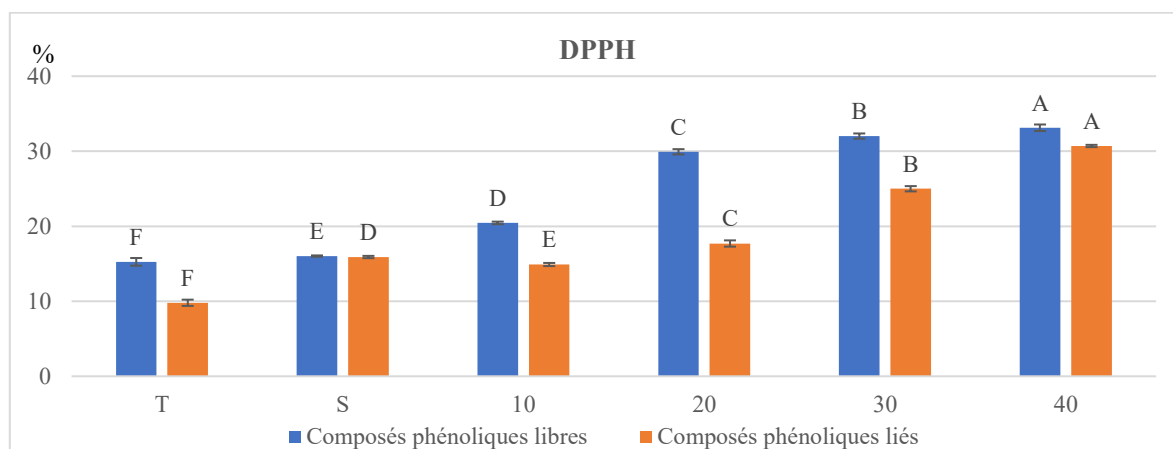


Figure 19 : Activité scavenger sur le radical DPPH des muffins substitués avec différents % de farine de chia et en 20 mg de safran.

Ces résultats sont en accord avec ceux de **Sharma *et al.* (2020)**, qui ont observé une augmentation significative de l'activité antioxydante des muffins enrichis en graines de chia ($0,78 \pm 0,34$ mg ET/100 g) par rapport au témoin ($0,39 \pm 0,25$ mg ET/100 g ; ET : équivalents Trolox).

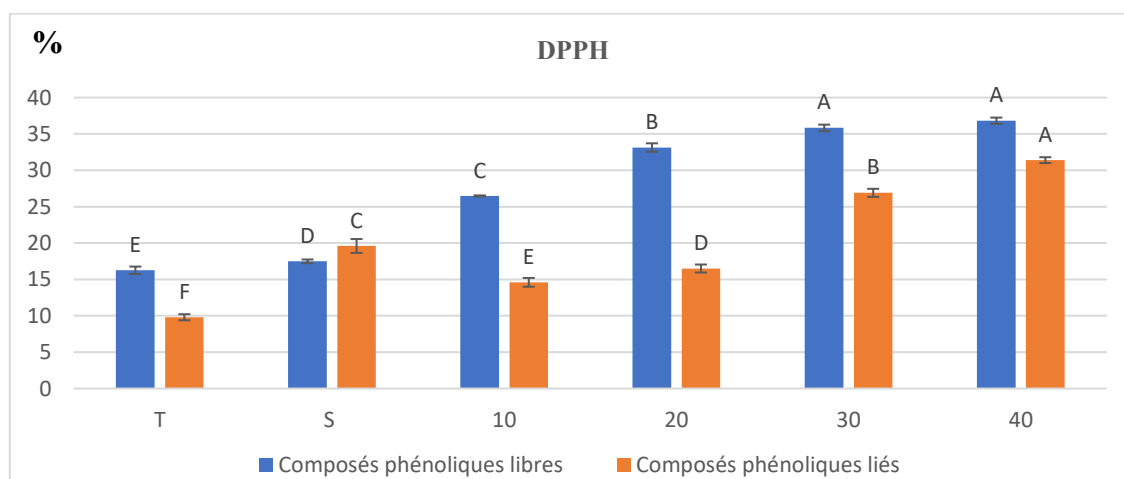


Figure 20 : Activité scavenger sur le radical DPPH des muffins substitués avec différents % de farine de chia et en 40 mg de safran.

4.2. Activité antiradicalaire sur le radical ABTS

La substitution partielle de la farine de blé par la farine de chia (**Figures 21**) dans la formulation des muffins améliore significativement leur activité antiradicalaire sur l'ABTS. Les

composés phénoliques libres induisent une meilleure activité antioxydante que les composés phénoliques liés.

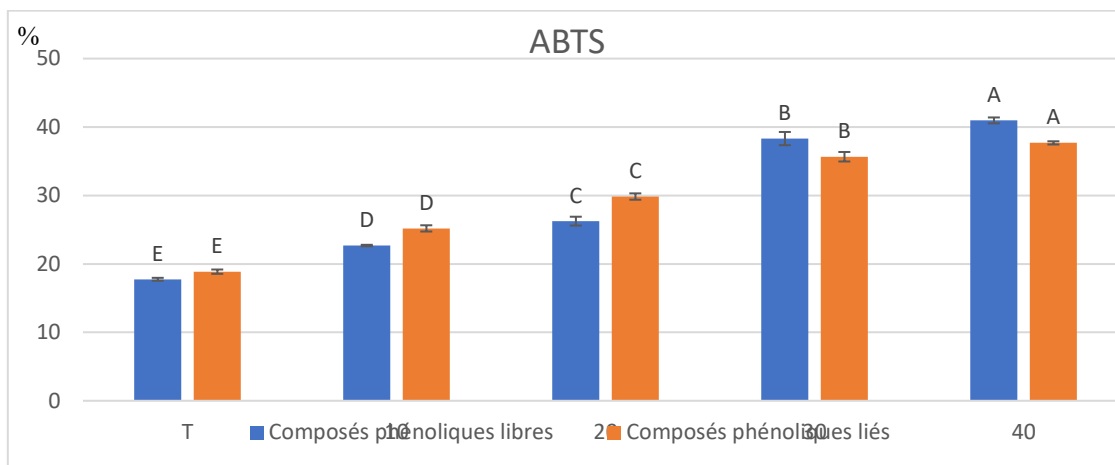


Figure 21 : Activité antiradicalaire contre le radical ABTS des muffins enrichis en graines de chia.

Les valeurs minimales de l'activité antiradicalaire induite par les polyphénols liés sont notées pour le témoin ($18.86 \pm 0.31\%$) tandis que l'activité maximale est enregistrée par les muffins à 40 % de chia ($37.68 \pm 0.23\%$).

L'analyse de l'ANOVA par les formulations à 20 mg de safran révèle que les composés phénoliques libres sont plus efficaces pour induire une activité antioxydante en comparaison avec les composés phénoliques liés (**Figure 22**).

Par ailleurs, la tendance générale de l'évolution de l'activité antioxydante est similaire à cette des formulations à 0 mg de safran.

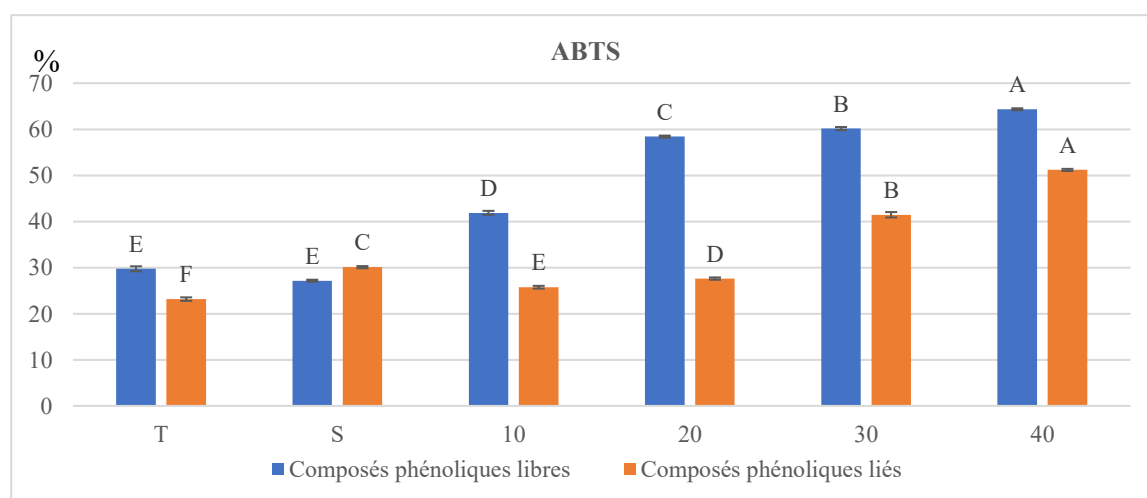


Figure 22 : Activité antiradicalaire contre le radical ABTS des muffins enrichis en graines de chia et avec 20 mg de safran.

On peut observer que le safran améliore l'activité antioxydante des muffins ($P < 0,05$), puisque l'échantillon S (contenant du safran) affiche des valeurs significativement plus élevées ($24,48 \pm 0,23$ % pour les extraits liés et $30,34 \pm 0,46$ % pour les extraits libres) que l'échantillon T dépourvu de safran ($23,16 \pm 0,38$ % pour les extraits liés et $29,74 \pm 0,53$ % pour les extraits libres).

Ces résultats concordent avec ceux obtenus par **Sharma *et al.* (2020)**, qui ont constaté une augmentation de l'activité antioxydante des muffins enrichis en graines de chia par rapport au témoin. De même, **Aranibar *et al.* (2019)** ont rapporté une amélioration significative de l'activité antioxydante, évaluée par la méthode ABTS, dans des muffins enrichis en farine de chia partiellement déshuilée.

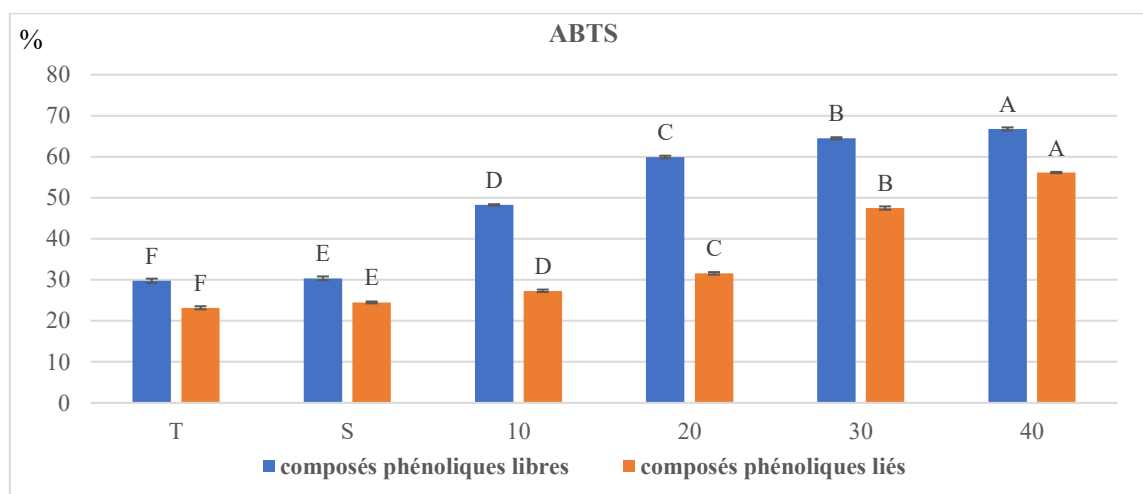


Figure 23 : Activité antiradicalaire contre le radical ABTS des muffins enrichis en graines de chia et 40 mg de safran.

Les données statistiques ont révélé que la présence du safran a accentué l'intensité de l'activité antioxydante (estimée par les tests DPPH et ABTS) des muffins enrichis, en particulier pour les composés phénoliques libres. Ces observations concordent avec nos données sur les teneurs en polyphénols libres, tel que décrit précédemment. De plus, un effet de concentration a été noté puisque l'augmentation de la concentration du safran (de 20 à 40 mg) a permis d'améliorer l'activité antioxydante des muffins.

Nos résultats rejoignent ceux obtenus par **Bhat *et al.* (2021)**, qui ont rapporté que l'enrichissement des cakes avec du safran a amélioré leur activité antioxydante. **Cerdá-Bernad *et al.* (2023)** ont observé la même tendance pour le pain incorporé de fleurs du safran.

Cet impact positif est probablement obtenu grâce à la richesse du stigmate de *Crocus sativus* composés phénoliques, ainsi qu'à certains composés bioactifs tels que le safranal, les crocines, la crocétine et le carotène, qui ont tous été reconnus pour leurs effets antioxydants (**Karimi *et al.*, 2010**).

5. Teneurs en composés bioactifs du safran

Tableau XIII: Contenu en composés bioactifs du safran

Le compose	Picrocrocine	Safranal	Crocines
La longueur d'onde	257 nm	330 nm	440 nm
(E _{1cm} %)	546.35	520.51	497.61

Les valeurs des coefficients d'absorption spécifiques (E_{1cm}%) obtenues pour les composés du safran analysés dans cette étude sont supérieures aux seuils établis par la norme ISO 3632, qui classe la qualité du safran en quatre catégories. En effet, la picrocrocine a présenté une valeur d'environ 546.35, largement supérieure au minimum requis pour la catégorie I (70), indiquant une intensité de saveur élevée.

De même, la crocine, responsable de la couleur, a affiché une valeur de 497.61, dépassant largement le seuil de 190 exigé pour la catégorie I, ce qui reflète une très forte intensité colorante. Enfin, la valeur du safranal (520.51) est aussi supérieure à la plage maximale attendue (20–50), ce qui pourrait indiquer une teneur très élevée en composés volatils responsables de l'arôme. Ainsi, les résultats suggèrent que le safran utilisé appartient à une qualité supérieure à la catégorie I selon la norme ISO 3632, mettant en évidence sa richesse en composés bioactifs.

Conclusion

Conclusion

Ce travail expérimental a été mené dans le but d'évaluer l'impact de l'enrichissement des muffins en graines de chia et en safran, séparément ou simultanément, sur leurs propriétés physicochimiques et leur activité antioxydante.

L'analyse des résultats a révélé que l'ajout de graines de chia et/ou de safran a eu une influence significative sur les caractéristiques des muffins. Les paramètres physiques ont révélé que le poids et le diamètre des muffins après cuisson demeure quasiment constant parmi les formulations étudiées, tandis que la hauteur a diminué dans les échantillons incorporés de farine de chia. L'humidité et la teneur en cendres ont montré une tendance générale vers la hausse dans les formulations enrichies.

Les données de l'étude colorimétrique ont mis en évidence un net assombrissement de la couleur, une tendance vers des teintes plus rouges et une accentuation des tons jaunes dans les échantillons contenant de la farine de chia et du safran. Cette évolution globale confère aux muffins enrichis des couleurs plus chaudes et plus intenses que celles observées dans les échantillons témoins.

D'un point de vue fonctionnel, l'enrichissement a permis d'améliorer les teneurs en composés phénoliques totaux, en particulier dans les formulations combinant graines de chia et safran. Cette amélioration s'est accompagnée d'une augmentation notable de l'activité antioxydante, évaluée par les méthodes DPPH et ABTS, confirmant ainsi le rôle bénéfique de ces ingrédients en tant qu'agents antioxydants naturels.

Malgré ces résultats prometteurs, certaines limites peuvent être soulignées, notamment l'absence d'évaluation sensorielle et de tests de conservation, qui auraient permis d'approfondir l'analyse de la qualité globale du produit.

En conclusion, ce travail met en évidence l'intérêt de l'enrichissement des muffins en graines de chia et en safran pour développer des produits de boulangerie aux propriétés nutritionnelles et fonctionnelles améliorées. Des études futures pourraient s'orienter vers l'optimisation des formulations, l'évaluation de la stabilité des antioxydants au cours du stockage, ainsi que l'acceptabilité sensorielle par les consommateurs.

Références bibliographiques

A

- Ahsan, M., Moin, A., Ashraf, H., Khan, A., & Giuffre, A. M. (2025). Formulation and characterization of reduced fat muffins using a plant based fat replacer. *J Food Sci Technol*, 62(3), 551-561. <https://doi.org/10.1007/s13197-024-06045-6>
- Aissa, R., Ibourki, M., Ait Bouzid, H., Bijla, L., Oubannin, S., Sakar, E. H., Jadouali, S., Hermansyah, A., Goh, K. W., Ming, L. C., Bouyahya, A., & Gharby, S. (2023). Phytochemistry, quality control and medicinal uses of Saffron (*Crocus sativus* L.): an updated review. *J Med Life*, 16(6), 822-836. <https://doi.org/10.25122/jml-2022-0353>
- Alljobair, M. O., & Patarata, L. (2022). Effect of Chia Seed as Egg Replacer on Quality, Nutritional Value, and Sensory Acceptability of Sponge Cake. *Journal of Food Quality*, 2022, 1-11. <https://doi.org/10.1155/2022/9673074>
- Amato, M., Caruso, M. C., Guzzo, F., Galgano, F., Commisso, M., Bochicchio, R., Labella, R., & Favati, F. (2015). Nutritional quality of seeds and leaf metabolites of Chia (*Salvia hispanica* L.) from Southern Italy. *European Food Research and Technology*, 241(5), 615-625. <https://doi.org/10.1007/s00217-015-2488-9>
- Amorim, C., Cardoso, B. B., Silvério, S. C., Silva, J. C., Alves, J. I., Pereira, M. A., Moreira, R., & Rodrigues, L. R. (2021). Designing a functional rice muffin formulated with prebiotic oligosaccharides and sugar reduction. *Food Bioscience*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2020.100858>
- Aranibar, C., Aguirre, A., & Borneo, R. (2019). Utilization of a by-product of chia oil extraction as a potential source for value addition in wheat muffins. *J Food Sci Technol*, 56(9), 4189-4197. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03889-1>
- Armellini, R., Peinado, I., Pittia, P., Scampicchio, M., Heredia, A., & Andres, A. (2018). Effect of saffron (*Crocus sativus* L.) enrichment on antioxidant and sensorial properties of wheat flour pasta. *Food Chem*, 254, 55-63. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.174>

B

- Bakshi, R. A., Sodhi, N. S., Wani, I. A., Khan, Z. S., Dhillon, B., & Gani, A. (2022). Bioactive constituents of saffron plant: Extraction, encapsulation and their food and pharmaceutical applications. *Applied Food Research*, 2(1). <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100076>
- Bhat, N. A., Hamdani, A. M., & Masoodi, F. A. (2018). Development of functional cookies using saffron extract. *J Food Sci Technol*, 55(12), 4918-4927. <https://doi.org/10.1007/s13197-018-3426-1>
- Biswas, S., Islam, F., Imran, A., Zahoor, T., Noreen, R., Fatima, M., Zahra, S. M., & Asif Shah, M. (2023). Phytochemical profile, nutritional composition, and therapeutic potentials of chia seeds: A concise review. *Cogent Food & Agriculture*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2220516>
- Bolhassani, A. (2018). Bioactive Components of Saffron and Their Pharmacological Properties. In (pp. 289-311). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64056-7.00010-6>

C

- Cardozo, M. L., Ordoñez, R. M., Zampini, I. C., Cuello, A. S., Dibenedetto, G., & Isla, M. I. (2010). Evaluation of antioxidant capacity, genotoxicity and polyphenol content of non

Références bibliographiques

conventional foods: Prosopis flour. Food Research International, 43(5), 1505-1510.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.04.004>

Cerda-Bernad, D., & Frutos, M. J. (2023). Saffron Floral By-Products as Novel Sustainable Vegan Ingredients for the Functional and Nutritional Improvement of Traditional Wheat and Spelt Breads. Foods, 12(12). <https://doi.org/10.3390/foods12122380>

Charlton, N. C., Mastuyugin, M., Torok, B., & Torok, M. (2023). Structural Features of Small Molecule Antioxidants and Strategic Modifications to Improve Potential Bioactivity. Molecules, 28(3). <https://doi.org/10.3390/molecules28031057>

Chaudhary, N., Dangi, P., Kumar, R., & Bishnoi, S. (2021). Chia Seeds—A Renewable Source as a Functional Food. In Handbook of Cereals, Pulses, Roots, and Tubers (pp. 235-252). <https://doi.org/10.1201/9781003155508-15>

Contini, G. K., Simões, D. R. S., Los, P. R., Kotovicz, V., Bedin, A. C., Martins, A., & Demiate, I. M. (2022). High nutritional value muffins produced with wholemeal rye (*Secale cereale* L.) and wholemeal bean (*Phaseolus vulgaris* L.) flour mix. Food Science and Technology, 42.

D

Donoso-Bustamante, V., Osorio, E., Arias-Santé, M. F., De Camargo, A. C., Rincón-Cervera, M. Á., Amalraj, J., Carrasco, B., Palomo, I., & Araya-Maturana, R. (2025). Antioxidant activity of sinapic acid anilides: DPPH, ABTS, FRAP, electrochemical and theoretical analysis. Lwt, 222. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2025.117656>

Du, H., Baek, I., Jang, Y., Said, N. S., & Lee, W. Y. (2025). Effects on Physicochemical, Nutritional, and Quality Attributes of Fortified Vegan Muffins Incorporated with Hempseed as an Alternative Protein Source. Foods, 14(4). <https://doi.org/10.3390/foods14040601>

F

Fernandes, S. S., Prentice, C., & Salas-Mellado, M. d. I. M. (2021). Chia Seed (*Salvia hispanica*). In Oilseeds: Health Attributes and Food Applications (pp. 285-303).
https://doi.org/10.1007/978-981-15-4194-0_11

Flieger, J., Flieger, W., Baj, J., & Maciejewski, R. (2021). Antioxidants: Classification, Natural Sources, Activity/Capacity Measurements, and Usefulness for the Synthesis of Nanoparticles. Materials (Basel), 14(15). <https://doi.org/10.3390/ma14154135>

G

Gashi, N., Hasani, E., & Salihu, S. (2024). Quality Evaluation of Muffins Enriched With Blueberry and Cranberry Powders. Int J Food Sci, 2024, 7045401.
<https://doi.org/10.1155/2024/7045401>

Gerber, A. J., P. (2008). Chia, découvrez la graine de la force riche en oméga 3. Filière Nutrition et Diététique, 1–4. https://doi.org/https://www.doc-developpement-durable.org/file/Culture/Culture-plantesalimentaires/FICHES_PLANTES/chia/Chia_d%C3%A9couvrez%20la%20graine%20de%20la%20force%20riche%20en%20om%C3%A9ga%203.pdf

Guedes de Melo, B., Santos Fernandes, S., Domínguez Razo, A., Us Medina, U., & Segura Campos, M. R. (2022). Chia seeds as functional ingredient of healthy muffins. Journal of

Références bibliographiques

Food Measurement and Characterization, 16(5), 4251-4261. <https://doi.org/10.1007/s11694-022-01503-1>

I

Ikumi, P., Mburu, M., & Njoroge, D. (2019). Chia (*Salvia hispanica* L.) – A Potential Crop for Food and Nutrition Security in Africa. *Journal of Food Research*, 8(6). <https://doi.org/10.5539/jfr.v8n6p104>

International, A. (1995). Official methods of analysis (16th ed.). <https://www.aoac.org/flour-ash-92303>

J

Jalal, A., Abdelaziz, M. E., Salem, M., Liew, K. X., Wang, J. Y., Alrasheed, W., Al-Ateeq, T. K., Althobiti, S., Qaryouti, M., Al-Soqeer, A., Jamil, M., & Al-Babili, S. (2025). Mimics of the Growth Regulator Zaxinone Increase Saffron Yield and Improve its Nutritional Value. *Journal of Plant Growth Regulation*. <https://doi.org/10.1007/s00344-025-11690-y>

K

Karimi, E., Oskoueian, E., Hendra, R., & Jaafar, H. Z. (2010). Evaluation of *Crocus sativus* L. stigma phenolic and flavonoid compounds and its antioxidant activity. *Molecules*, 15(9), 6244-6256. <https://doi.org/10.3390/molecules15096244>

Khalid, W., Arshad, M. S., Aziz, A., Rahim, M. A., Qaisrani, T. B., Afzal, F., Ali, A., Ranjha, M., Khalid, M. Z., & Anjum, F. M. (2023). Chia seeds (*Salvia hispanica* L.): A therapeutic weapon in metabolic disorders. *Food Sci Nutr*, 11(1), 3-16. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3035>

Kwaku Gyebi Duodu, A. M. (2011). Legume Composite Flours and Baked Goods: Nutritional, Functional, Sensory, and Phytochemical Qualities. 193–203. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-380886-8.10018-2>

Kulczynski, B., Kobus-Cisowska, J., Taczanowski, M., Kmiecik, D., & Gramza-Michalowska, A. (2019). The Chemical Composition and Nutritional Value of Chia Seeds—Current State of Knowledge. *Nutrients*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/nu11061242>

L

Lafiandra, D., Riccardi, G., & Shewry, P. R. (2014). Improving cereal grain carbohydrates for diet and health. *J Cereal Sci*, 59(3), 312-326. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.01.001>

Li, B., Peng, L., Cao, Y., Liu, S., Zhu, Y., Dou, J., Yang, Z., & Zhou, C. (2024). Insights into Cold Plasma Treatment on the Cereal and Legume Proteins Modification: Principle, Mechanism, and Application. *Foods*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/foods13101522>

Losada-Barreiro, S., Sezgin-Bayindir, Z., Paiva-Martins, F., & Bravo-Diaz, C. (2022). Biochemistry of Antioxidants: Mechanisms and Pharmaceutical Applications. *Biomedicines*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/biomedicines10123051>

M

Maggi, M. A., Bisti, S., & Picco, C. (2020). Saffron: Chemical Composition and Neuroprotective Activity. *Molecules*, 25(23). <https://doi.org/10.3390/molecules25235618>

Références bibliographiques

- Maqbool, Z., Arshad, M. S., Ali, A., Aziz, A., Khalid, W., Afzal, M. F., Bangar, S. P., Addi, M., Hano, C., & Lorenzo, J. M. (2022). Potential Role of Phytochemical Extract from Saffron in Development of Functional Foods and Protection of Brain-Related Disorders. *Oxid Med Cell Longev*, 2022, 6480590. <https://doi.org/10.1155/2022/6480590>
- Marinova, K. G., Basheva, E. S., Nenova, B., Temelska, M., Mirarefi, A. Y., Campbell, B., & Ivanov, I. B. (2009). Physico-chemical factors controlling the foamability and foam stability of milk proteins: Sodium caseinate and whey protein concentrates. *Food Hydrocolloids*, 23(7), 1864–1876. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.03.003>
- Marrone, G., Urciuoli, S., Di Lauro, M., Cornali, K., Montalto, G., Masci, C., Vanni, G., Tesaro, M., Vignolini, P., & Noce, A. (2024). Saffron (*Crocus sativus* L.) and Its By-Products: Healthy Effects in Internal Medicine. *Nutrients*, 16(14). <https://doi.org/10.3390/nu16142319>
- Masood, M. A. B. (2022). Chia Seeds as Potential Nutritional and Functional Ingredients: A Review of their Applications for Various Food Industries. *Journal of Nutrition Food Science and Technology*, 4(1), 1–14.
- Motyka, S., Koc, K., Ekiert, H., Blicharska, E., Czarnek, K., & Szopa, A. (2022). The Current State of Knowledge on *Salvia hispanica* and *Salviae hispanicae* semen (Chia Seeds). *Molecules*, 27(4). <https://doi.org/10.3390/molecules27041207>
- Mutlu, M., Bingol, Z., Ozden, E. M., Köksal, E., Erturk, A., Goren, A. C., Alwasel, S., & Gulcin, İ. (2025). Antioxidant, and enzyme inhibition effects of chia (*Salvia hispanica*) seed oil: A comprehensive phytochemical screening using LC-HR/MS. *Electronic Journal of Biotechnology*, 74, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2024.12.002>
- Muñoz, L. A., Cobos, A., Diaz, O., & Aguilera, J. M. (2013). Chia Seed (*Salvia hispanica*): An Ancient Grain and a New Functional Food. *Food Reviews International*, 29(4), 394–408. <https://doi.org/10.1080/87559129.2013.818014>
- Mzabri, I., Addi, M., & Berrichi, A. (2019). Traditional and Modern Uses of Saffron (*Crocus Sativus*). *Cosmetics*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/cosmetics6040063>

N

- Nano-Lab. (2025). Tests de couleur des aliments. <https://www.nanolab.com.tr/fr/blog/detail/tests-de-couleur-des-aliments#:~:text=La%20couleur%20des%20aliments%20est%20d%C3%A9termin%C3%A9e%20%C3%A0%20l'aide,donne%20des%20valeurs%20comprises%20entre%200%20et%20100>
- Naître et grandir. (2025). https://naitreetgrandir.com/fr/etape/1_3_ans/alimentation/produits-cerealiers/
- Normalisation, O. i. d. (2015). *Céréales et produits céréaliers — Détermination de la teneur en humidité — Méthode de référence*. Vol. 712:2009.

O

- Orona-Tamayo, D., Valverde, M. E., & Paredes-López, O. (2017). Chia—The New Golden Seed for the 21st Century. In *Sustainable Protein Sources* (pp. 265–281). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802778-3.00017-2>

Références bibliographiques

P

- Pérez, M., Dominguez-López, I., & Lamuela-Raventós, R. M. (2023). The Chemistry Behind the Folin–Ciocalteu Method for the Estimation of (Poly)phenol Content in Food: Total Phenolic Intake in a Mediterranean Dietary Pattern. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 71(46), 17543–17553. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.3c04022>
- Pisoschi, A. M., & Pop, A. (2015). The role of antioxidants in the chemistry of oxidative stress: A review. *Eur J Med Chem*, 97, 55–74. <https://doi.org/10.1016/j.ejmech.2015.04.040>
- Puttachar, T. G., Fernandes, D., Patil, S., Thomas, S., Pillai, S. B., Harish, T. K., Mascarenhas, V., Naik, S., & Correia, S. (2023). Extraction and Standardization of Saffron Extract for Usage in Food, Beverage and Pharmacological Activities. *IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC)*, 16, 12–22. <https://www.iosrjournals.org/iosr-jac/papers/Vol16-issue7/Ser-1/C1607011222.pdf>

R

- Rabail, R., Sultan, M. T., Khalid, A. R., Sahar, A. T., Zia, S., Kowalczewski, P. L., Jezowski, P., Shabbir, M. A., & Aadil, R. M. (2022). Clinical, Nutritional, and Functional Evaluation of Chia Seed-Fortified Muffins. *Molecules*, 27(18). <https://doi.org/10.3390/molecules27185907>
- Rauf, M. A., Sharif, M. K., Naz, T., Razzak, M. A., Shahid, F., Aslam, T., Ali, R., & Ahmad, T. (2024). Utilization Of Chia Seed Mucilage To Reduce The Fat Contents In Muffins. <https://doi.org/10.53555/sfs.v11i2.2099>
- Rendón-Villalobos, J. R., Ortiz-Sánchez, A., & Flores-Huicochea, E. (2018). Nutritionally Enhanced Foods Incorporating Chía Seed. In *Therapeutic Foods* (pp. 257–281). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811517-6.00009-x>
- ROBERTA RE, N. P., ANNA PROTEGGENTE, ANANTH PANNALA, MIN YANG, & CATHERINE RICE-EVANS. (1999). Antioxidant Activity Applying an Improved ABTS Radical Cation Decolorization Assay. *Free Radical Biology & Medicine*, 26, 1231–1237. [https://doi.org/10.1016/S0891-5849\(98\)00315-3](https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00315-3)
- Rumpf, J., Burger, R., & Schulze, M. (2023). Statistical evaluation of DPPH, ABTS, FRAP, and Folin-Ciocalteu assays to assess the antioxidant capacity of lignins. *Int J Biol Macromol*, 233, 123470. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.123470>

S

- Saulnier, L. (2012). Les grains de céréales : diversité et compositions nutritionnelles. *Cahiers de Nutrition et de Diététique*, 47(1), S4–S15. [https://doi.org/10.1016/s0007-9960\(12\)70292-4](https://doi.org/10.1016/s0007-9960(12)70292-4)
- Shah, P., & Modi, H. A. (2015). Comparative study of DPPH, ABTS and FRAP assays for determination of antioxidant activity. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 6. <https://www.researchgate.net/publication/307464470>
- Sharma, V., Mogra, R., & Mordia, A. (2020). Effect of chia (*Salvia hispanica* L.) seeds incorporation on nutritional quality of muffin mix. *Nutrition & Food Science*, 50(6), 1151–1161. <https://doi.org/10.1108/NFS-10-2019-0306>
- Shukla, D., Tewari, B. N., Trivedi, S. P., Dwivedi, S., Kumar, V., & Tiwari, V. (2024). Quality and functional attributes of muffins with incorporation of fruit, vegetable, and grain

Références bibliographiques

substitutes: A review. *Journal of Applied and Natural Science*, 16(1), 344–355.
<https://doi.org/10.31018/jans.v16i1.5330>

Soong, Y. Y., Tan, S. P., Leong, L. P., & Henry, J. K. (2014). Total antioxidant capacity and starch digestibility of muffins baked with rice, wheat, oat, corn and barley flour. *Food Chem*, 164, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.05.041>

Srikrishna Lingadahalli Puttachar, T. G., Fernandes, D., Patil, S., Thomas, S., Pillai, S. B., Harish, T. K., Mascarenhas, V., Naik, S., & Correia, S. (2023). Extraction and Standardization of Saffron Extract for Usage in Food, Beverage and Pharmacological Activities. *IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSR-JAC)*, 16, 12–22. <https://www.iosrjournals.org/iosr-jac/papers/Vol16-issue7/Ser-1/C1607011222.pdf>

T

Tavares, L. D., de Souza, E. O., Ugrinowitsch, C., Laurentino, G. C., Roschel, H., Aihara, A. Y., Cardoso, F. N., & Tricoli, V. (2017). Effects of different strength training frequencies during reduced training period on strength and muscle cross-sectional area. *Eur J Sport Sci*, 17(6), 665–672. <https://doi.org/10.1080/17461391.2017.1298673>

Tazart, K., Kati, D. E., Smail-Benazzouz, L., Ould-Saadi, L., & Tazart, K. (2023). Impact of whole chia seeds (*Salvia Hispanica*) addition on the properties and stability of the set-type yogurt. *The Annals of the University Dunarea de Jos of Galati. Fascicle VI - Food Technology*, 47(1), 125–139. <https://doi.org/10.35219/foodtechnology.2023.1.08>

U

Ullah, R., Nadeem, M., Khalique, A., Imran, M., Mehmood, S., Javid, A., & Hussain, J. (2015). Nutritional and therapeutic perspectives of Chia (*Salvia hispanica* L.): A review. *Journal of Food Science and Technology*, 52, 6415–6426. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1784-9>

V

Valdivia-Lopez, M. A., & Tecante, A. (2015). Chia (*Salvia hispanica*): A Review of Native Mexican Seed and its Nutritional and Functional Properties. *Adv Food Nutr Res*, 75, 53–75. <https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2015.06.002>

Valko, M., Leibfritz, D., Moncol, J., Cronin, M. T., Mazur, M., & Telser, J. (2007). Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. *Int J Biochem Cell Biol*, 39(1), 44–84. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2006.07.001>

W

WINTERHALTER. (2008). SAFFRON—RENEWED INTEREST IN AN ANCIENT SPICE. *Food Reviews International*, 16, 30–59. <https://doi.org/10.1081/FRI-100100281>

Annexe I : Matériels et réactifs utilisés

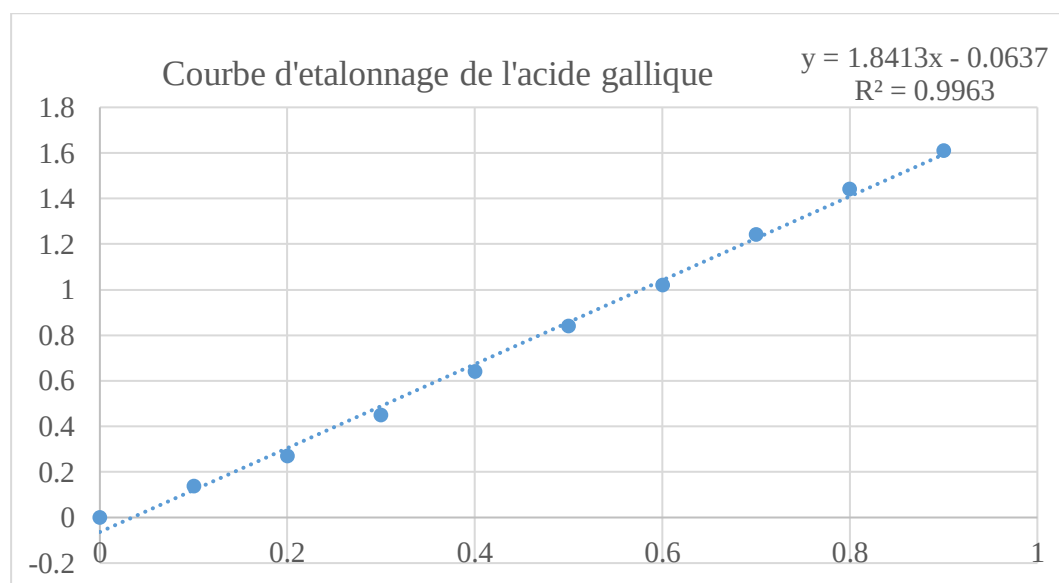
1. Ensemble de matériel utilisé :

Un broyeur	Des fioles	Des tubes à essais
Des barreaux magnétiques	Eau distillée	vortex
Une balance de précision	Un papier absorbant	Micropipettes
Des béchers	Papier aluminium	Des pipettes
Des éprouvettes	Un pH mètre	Des culières
Papier filtre	Des étuves	Colorimétrie
Une hotte	Un réfrigérateur	Un spectrophotomètre
Une plaque agitatrice	Un bain marie	Une centrifugeuse

2. Ensemble des réactifs utilisés :

Éthanol	ABTS	Acide gallique
Hexane	Folin-Ciocalteu	Acide chlorhydrique
DPPH	Hydroxyde de sodium	Carbonate de sodium

Annexe II : Courbe d'étalonnage d'acide gallique



Résumé

L'enrichissement de muffins avec des graines de chia et du safran, seuls ou combinés, a permis d'évaluer leurs effets sur la qualité globale du produit fini. Les formulations enrichies ont présenté une stabilité du poids et du diamètre après cuisson, tandis qu'une légère diminution de la hauteur a été observée dans les échantillons contenant de la farine de chia. Le taux de cendres a montré une augmentation dans les muffins enrichis, traduisant une modification de leur composition physicochimique. L'étude colorimétrique a révélé une intensification des teintes rouges et jaunes, ainsi qu'un assombrissement global, en particulier dans les formulations contenant du safran. L'analyse des composés phénoliques a mis en évidence une augmentation significative des teneurs totales, notamment sous forme libre, et cette richesse en antioxydants s'est traduite par une amélioration significative de l'activité antioxydante, confirmée par les tests DPPH et ABTS. Ces résultats confirment l'intérêt d'un enrichissement simultané en chia et safran pour développer des aliments de boulangerie à haute valeur nutritionnelle et fonctionnelle.

Mots clés : Muffins, graines de chia, safran, couleur, composés phénoliques, activité antioxydante.

Abstract

Enriching muffins with chia seeds and saffron, alone or in combination, enabled us to assess their effects on the overall quality of the finished product. Enriched formulations showed stability in weight and diameter after baking, while a slight decrease in height was observed in samples containing chia flour. Ash levels showed an increase in the enriched muffins, reflecting a change in their physicochemical composition. The colorimetric study revealed an intensification of red and yellow hues, as well as an overall darkening, particularly in formulations containing saffron. Analysis of phenolic compounds revealed an increase in total content, particularly in free form, and this richness in antioxidants translated into a significant improvement in antioxidant activity, confirmed by DPPH and ABTS tests. These results confirm the value of simultaneous enrichment with chia and saffron to develop bakery products with high nutritional and functional value.

Keywords: Muffins, chia seeds, saffron, color, phenolic compounds, antioxidant activity.