

République Algérienne Démocratique et Populaire

Université Abdelhamid Ibn
Badis-Mostaganem
Faculté des Sciences de la
Nature et de la Vie



جامعة عبد الحميد ابن باديس
مستغانم
كلية علوم الطبيعة و الحياة

DEPARTEMENT DES SCIENCES ALIMENTAIRES

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Présenté par

BELOUIHAT ABDELLAH et BELHADJI ABDEL WAHID

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN SCIENCES ALIMENTAIRES

Spécialité : Nutrition et Pathologie

THÈME

Qualités nutritionnelles de millet perlé.

Déposé le 07/07/2020

DEVANT LE JURY

Président	Dr. CHAALAL ABDELMALEK	MCA U. Mostaganem
Examinatrice	Dr. YAHLA IMENE	MCA U. Mostaganem
Encadrante	Dr. ZIAR HASNIA	MCA U. Mostaganem
Co-directrice de mémoire	Melle KADDAR KAWTER	3ème année doctorat LMD

Dédicace

*Avec l'aide du bon DIEU, le tout puissant, ce travail est achevé ; je le dédie à
toutes les personnes qui me sont chères ;*

*A celle dont je suis le fruit de ses efforts, symbole de bonté, de sagesse et de fierté,
mon exemple dans la vie. Ma mère, sans son épaule et sa force inépuisables, jamais
je n'aurais pu regagner le port pour enfin accoster.*

*Celle qui m'a apporté sans cesse amour, soutien et encouragement. Celle qui
combattait depuis ma naissance, pour me voir un jour, un homme de fierté.*

A toute ma famille.

A tous mes amis.

*A tous mes enseignants tout au long de mes études. A tous ceux et celles qui me
sont chers et que j'ai omis involontairement de citer.*

Abdelwahid

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mes frères, ma grand-mère et ceux qui ont partagé avec moi tous les

moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail. Ils m'ont

chaleureusement supporté et encouragé tout au long de mon parcours.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

A tous ceux que j'aime.

Merci !

ABDELLAH

Remerciements

*En premier lieu, je tiens à remercier **ALLAH** de m'avoir donné le courage et la volonté d'aller jusqu'au bout et ramener ce présent travail à son point ultime.*

*Nous tenons tout particulièrement à adresser nos remerciements à notre encadrante, **Dr. Ziar Hasnia** qui nous a fait l'honneur de diriger notre mémoire sur un sujet passionnant et nous a bien voulu prendre en charge et nous guidés tout au long de son élaboration. Nous lui sommes très reconnaissants pour ses conseils, sa disponibilité et son sérieux dans le travail.*

*Nos remerciement sont adressés également au **Dr. CHAALEL Abdelmalek** d'avoir accepté de présider le jury et au **Dr. Yahla Imène** d'avoir accepté d'examiner ce modeste travail.*

Nous remercions tous les enseignants et les étudiants de la promotion de master II Nutrition et pathologie 2021-2022.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail de recherche.

Résumé

Dans le présent travail, nous explorons les qualités nutritionnelles de *Pennisetum glaucum* L. ou Hobob Aldakhn utilisé traditionnellement en pharmacopée algérienne. Une première analyse physico-chimique a été effectuée, suivie de l'analyse des teneurs en macro et micronutriments et en composés phénoliques : polyphénols totaux, flavonoïdes et tannins condensés. Deux propriétés biologiques antioxydante et anti-inflammatoire (avec calcul des IC50), ont été aussi évaluées *in vitro*. La composition physico-chimique du millet perlé a montré qu'il contient 9.8% de protéines, 3.6% de lipides, 75% de glucides et 15.5% de fibres alimentaires. Le millet perlé contenait de bonnes concentrations en électrolytes indispensables et est considéré une céréale plus nutritive. Notre millet perlé analysé était surtout riche en calcium (222 mg/100 g), en phosphore (272 mg/100 g) et magnésium (158 mg/100 g). Nos résultats ont confirmé aussi qu'une quantité d'eau est nécessaire pour l'extraction des composés phénoliques (dans un rapport eau/éthanol 20v/80v) à partir de la farine de millet perlé. Le résultat obtenu indique que la quantité des composés phénoliques est de 2.69 mg Eq d'acide gallique/mg d'extrait en termes de polyphénols totaux, en flavonoïdes était égale à 3.44 mg Eq QER/g d'extrait et celle des tannins condensés à 1.04 mg Eq CAT/g d'extrait. L'évaluation du pouvoir anti-radicalaire de l'extrait par les méthodes de DPPH et FRAP a montré que dans l'ensemble, l'extrait avait une activité antioxydante modérée, mais plus prononcée en termes de l'IC50%, avec des valeurs respectives de l'ordre de 5.01 et de 6.01 mg/ml, telles que exprimées par les méthodes DPPH et FRAP. En revanche, L'activité antiinflammatoire de l'extrait éthanolique du millet perlé a révélé un pourcentage d'inhibition de la dénaturation de la SBA jugé satisfaisant avec une inhibition égale à 32,5%. Les résultats obtenus de l'IC50 pour cet extrait était en fait, 1/2 fois plus faibles comparés à ceux obtenus pour le diclofenac, un médicament anti-inflammatoire utilisé comme standard.

Mots clefs : *Pennisetum glaucum* L., extrait éthanolique, analyse physico-chimique, polyphénols, flavonoïdes, tannins condensés, activité antioxydante, activité anti-inflammatoire.

Abstract

In the present work, we explore the nutritional qualities of *Pennisetum glaucum* L. or Hobob Aldakhn, traditionally used in the Algerian pharmacopeia. A preliminary physicochemical analysis was performed, followed by an examination of the contents of macro- and micronutrients, as well as phenolic compounds such as total polyphenols, flavonoids, and condensed tannins. Two biological properties, antioxidant and anti-inflammatory (with calculation of IC₅₀), were also evaluated in vitro. The physicochemical composition of pearl millet showed that it contains 9.8% protein, 3.6% lipids, 75% carbohydrates, and 15.5% dietary fiber. Pearl millet contains good concentrations of essential electrolytes and is considered a more nutritious grain. Our pearl millet analyzed was especially rich in calcium (222 mg/100 g), phosphorus (272 mg/100 g) and magnesium (158 mg/100 g). Our results also confirmed that a quantity of water is necessary for the extraction of phenolic compounds (in a water/ethanol ratio of 20v/80v) from pearl millet flour. The result obtained indicates that the quantity of phenolic compounds is 2.69 mg Eq of gallic acid/mg of extract in terms of total polyphenols, in flavonoids was equal to 3.44 mg Eq QER/g of extract and that of condensed tannins to 1.04 mg Eq CAT/g of extract. The evaluation of the antiradical power of the extract by DPPH and FRAP methods showed that overall, the extract had moderate antioxidant activity but was more pronounced in terms of IC₅₀%, with respective values in the range of 5.01 and 6.01 mg/ml, as expressed by DPPH and FRAP methods. On the other hand, the anti-inflammatory activity of the ethanolic extract of pearl millet revealed a percentage of inhibition of SBA denaturation considered satisfactory, with an inhibition equal to 32.5%. The IC₅₀ results obtained for this extract were, in fact, 1.5 times lower compared to those obtained for diclofenac, an anti-inflammatory drug used as a standard.

Keywords: *Pennisetum glaucum* L., ethanolic extract, physicochemical analysis, polyphenols, flavonoids, condensed tannins, antioxidant activity, anti-inflammatory activity.

ملخص

في هذا العمل ، نستكشف الصفات الغذائية لحبوب الدخن المستخدمة تقليديًا في الأدوية الجزائرية. تم إجراء أول تحليل فيزيائي-كيميائي ، تلاه تحليل محتويات المركب الكلي والمغذيات الدقيقة والمركبات الفينولية: البوليفينول الكلي ، الفلافونويد والعفص المكثف. تم أيضًا تقييم اثنين من الخصائص البيولوجية المضادة للأكسدة والمضادة للالتهابات) مع حساب (IC50 في المختبر. أظهرت التركيبة الفيزيائية الكيميائية للدخن أنه يحتوي على 9.8% بروتين و 3.6% دهون و 75% كربوهيدرات و 15.5% ألياف غذائية. يحتوي الدخن اللؤلؤي على تركيزات جيدة من الإلكتروليتات الأساسية ويعتبر من الحبوب المغذية بشكل أكبر. كان الدخن اللؤلؤي الذي تم تحليله غنيًا بشكل خاص بالكالسيوم (222 مجم / 100 جم) والفوسفور (272 مجم / 100 جم) والمغنيسيوم (158 مجم / 100 جم). أكدت نتائجنا أيضًا أن كمية الماء ضرورية لاستخراج المركبات الفينولية (في نسبة الماء / الإيثانول 20 فولت / 80 فولت) من دقيق الدخن اللؤلؤي. تشير النتيجة التي تم الحصول عليها إلى أن كمية المركبات الفينولية هي 2.69 مجم من مكافئ حمض الجاليك / مجم من المستخلص من حيث إجمالي البوليفينول ، في الفلافونويد كانت تساوي 3.44 مجم مكافئ / QER جم من المستخلص وتانيات التانيات المكثفة عند 1.04 مجم مكافئ / CAT غرام من المستخلص. أظهر تقييم القوة المضادة للجذور الحرة للمستخلص بواسطة طرق DPPH و FRAP أن المستخلص بشكل عام كان له نشاط مضاد للأكسدة معتدل ، ولكنه أكثر وضوحًا من حيث IC50 % ، بترتيب 5.01 و 6.01 على التوالي. مجم / مل ، كما تم التعبير عنه بواسطة طرق DPPH و FRAP من ناحية أخرى ، أظهر النشاط المضاد للالتهابات للمستخلص الإيثانولي من الدخن اللؤلؤي نسبة من تثبيط تمسخ SBA التي تعتبر مرضية مع تثبيط يساوي 32.5%. كانت نتائج IC50 التي تم الحصول عليها من هذا المستخلص في الواقع أقل بمقدار نصف مرة مقارنة بتلك التي تم الحصول عليها من diclofenac ، وهو دواء مضاد للالتهابات يستخدم كمعيار.

الكلمات المفتاحية: Pennisetum glaucum L. ، مستخلص الإيثانول ، التحليل الفيزيائي والكيميائي ، البوليفينول ، الفلافونويد ، العفص المكثف ، النشاط المضاد للأكسدة ، النشاط المضاد للالتهابات.

Table des matières

Remerciements	4
Résumé.....	5
Abstract	6
ملخص.....	7

Liste des abréviations.....	11
LISTES DES TABLEAUX.....	12
LISTES DES FIGURES.....	13
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I.....	3
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
Chapitre I : Historique, production et aspect botanique.....	5
I.1. Provenance du millet.....	5
I.2.1. Systèmes de production du mil.....	7
I.3. Aspect botanique.....	10
I.4. Croissance et développement.....	13
- Phase végétative.....	13
- Phase de reproduction.....	13
- Phase de maturation.....	14
Chapitre II : Qualités nutritionnelles et bio-fonctionnelles du millet.....	16
II.1. Le millet : un aliment nutritif alternatif.....	16
II.2. Composition et interaction nutritionnelles de millet perlé.....	16
II.2.1. Composition biochimique.....	16
II.2.2. Biodisponibilité nutritionnelle.....	18
- Le millet comme matrice alimentaire à base d'amidon.....	18
- Le millet comme matrice alimentaire à base de protéines.....	19
- Le millet comme matrice alimentaire à base de polyphénols.....	20
- Le millet comme matrice alimentaire à base de micronutriments.....	21
Partie II.....	22
La partie expérimentale.....	22
CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES.....	24
III.1. Matériels.....	24
III.1.1. Matériel biologique.....	24
III.1.2. Matériel non biologique.....	24
III.2. Méthodes.....	25

III.2.1. Analyse physico-chimique de la farine de millet perlé	25
III.2.1.1. Teneur en eau	25
III.2.1.2. Teneur en matière grasse	26
III.2.1.3. Teneur en cendres	26
III.2.1.4. Teneur en protéines totales.....	27
III.2.1.5. Teneur en fibres brutes	28
III.2.1.6. Teneur en glucides totaux.....	28
III.2.1.7. Analyse des micronutriments de la farine de millet perlé.....	29
III.2.2. Préparation de l'extrait	29
- Extration hydro-éthanolique	29
- Extration hydrolique.....	29
III.2.3. Analyses phyto-chimique de la farine de millet perlé.....	30
- Les flavonoïdes.....	30
- Les Tannins.....	31
- Les Saponines	31
- Les quinones libres.....	31
- Les terpénoïdes libres.....	31
- Les alcaloïdes	31
III.2.4. Dosage des composés phénoliques.....	32
III.2.4.1. Dosage des Polyphénols totaux.....	32
III.2.4.2. Dosage des Flavonoïdes	32
III.2.4.3. Dosage des Tanin condensés.....	33
Principe	33
Mode opératoire.....	33
Expression des résultats	33
III.2.5. Activité antioxydante.....	33
III.2.5.1. Essai de piégeage des radicaux libres par le 2,2-diphényl-1-picrylhydrazil (DPPH)	33
Mode opératoire.....	34
1- Une gamme de concentrations (0-200 µg/ml) d'extrait ou de la Quercétine (antioxydant de référence) est préparée dans le méthanol.	34
2- Un volume de 2.5 ml de cette solution, est mélangé à 2.5 ml de DPPH (100 µM) préparé également dans le méthanol.	34
3- Après homogénéisation, le mélange est incubé à la température ambiante (25 °C) à l'abri de la lumière.	34

4-Après 15 minutes d'incubation, l'absorbance est lue à 517 nm contre un « blanc » qui ne contient que du méthanol.	34
Le pourcentage d'inhibition du radical DPPH est calculé selon l'équation suivante :	34
III.2.5.2 Activité de piégeage du peroxyde d'hydrogène	34
III.2.6. Evaluation de l'activité anti-inflammatoire in vitro	35
Chapitre IV: Résultats et discussion.	38
IV.1. Extraction	38
IV.2. Screening phyto-chimique	38
IV.3. Composition de grains de millet perlé.....	40
IV.4. Teneur en polyphénols totaux	42
IV.5. Teneur en flavonoïdes	43
VI.6. Teneur en tannins condensés	44
IV.7. Etude de l'activité antioxydante	45
IV.7.1. Test de piégeage du radical libre DPPH.....	45
IV.7.1. Test de la réduction du fer (FRAP).....	46
IV.8. Etude de l'activité anti-inflammatoire (in vitro).....	47
Conclusion	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	53

Liste des abbreviations

FAO : Food and Agriculture Organization

mg Eq G : milligrammes en équivalent d'acide gallique.

mg Eq QER: milligrammes en équivalent quercétine.

mg Eq CAT: milligrammes en équivalent catéchine.

BSA : Sérum Albumine Bovine,

IC50 : concentration inhibant 50% des radicaux libres.

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les différentes caractéristiques du millet (source : sites Google et Baidu).....	12
Tableau 2 : Profil nutritionnel complet de différents types de millet (Kumar et al., 2022).	17
Tableau 3 : Caractéristiques des deux extraits de Millet perlé.	38
Tableau 4 : Résultats des réactions de caractérisation des principaux métabolites secondaires contenus dans les grains de millet perlé.	39
Tableau 5: Analyse de la composition en macronutriments de grains de millet perlé	40
Tableau 6 :Analyse de la composition en micronutriments de grains de millet perlé	41
Tableau 7: Effet anti-inflammatoire de l'extrait éthanolique de Millet perlé in vitro comparé à la diclofénac.....	47

LISTES DES FIGURES

Figure 1 ; Production mondiale de millet (FAO, 2021).....	9
Figure 2 : Distribution du marché de millet (FAO, 2021).....	10
Figure 3 : Pennisetum glaucum L.	11
Figure 4 : Les grains de millet perlé utilisés dans cette étude.	24
Figure 5 : Les différentes étapes de l'extraction des composants actifs de millet perlé.	30
Figure 6 : Courbe d'étalonnage à l'acide gallique.	42
Figure 7 : Les teneurs en différents composé phénolique du millet perlé analysé.	43
Figure 8 : Courbe d'étalonnage à la quercétine.	44
Figure 9: Courbe d'étalonnage à la cathécine.	45
Figure 10 : Pourcentage d'inhibition du radicale libre IC50% de l'extrait éthanolique de millet perlé comparé à l'ac. ascorbique selon la méthode DPPH.	46
Figure 11 : Pourcentage d'inhibition du radicale libre IC50% de l'extrait éthanolique de millet perlé comparé à l'ac. ascorbique selon la méthode FRAP.	47

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Aliment de base de nombreux régimes alimentaires dans le monde, le millet a poussé à l'état sauvage en Afrique pendant des siècles avant d'être cultivé par l'homme. En plus d'être riche en nutriments, il pousse bien dans les régions froides et arides et peut être récolté dans les 70 jours suivant sa plantation. Bien qu'il ait été principalement cultivé en Afrique, en Asie et en Europe, il devient de plus en plus populaire dans le monde occidental.

Le millet est souvent décrit comme une céréale ancienne, bien qu'il s'agisse techniquement d'une graine. Il n'existe pas de définition officielle du terme "grain ancien", mais le Whole Grains Council inclut dans cette catégorie les grains qui n'ont pratiquement pas changé au cours des derniers siècles. Le quinoa, les graines de chia et le sarrasin sont tous considérés comme des céréales anciennes, alors que les variétés modernes de blé ne le sont pas.

Bien qu'il s'agisse techniquement d'une graine, le millet présente les mêmes avantages pour la santé que les autres céréales et peut être préparé de la même manière. Il ressemble à de petites boulettes jaunes de graines pour oiseaux (ce qui est, en fait, l'une des façons dont il est utilisé) mais il cuit en un grain tendre qui a un léger goût de maïs. Il est à la fois riche en nutriments et offre de nombreuses propriétés sanitaires. De plus, c'est un aliment unique qui peut contribuer à varier les saveurs de votre régime sans gluten.

Une tasse de millet cuit contient environ 207 calories, plus de 6 grammes de protéines, 2 grammes de fibres alimentaires et moins de 2 grammes de graisses. Il est riche en minéraux comme le calcium, le cuivre, le fer, le magnésium, le phosphore, le potassium et le sélénium, ainsi qu'en vitamines essentielles comme l'acide folique, l'acide pantothénique, la niacine, la riboflavine et les vitamines B6, C, E et K.

La plupart des avantages les plus importants du millet pour la santé sont liés à sa teneur en fibres. Par exemple, les niveaux élevés de fibres trouvés dans le millet peuvent aider à réduire les lipoprotéines de basse densité (LDL) ou "mauvais" cholestérol tout en augmentant les lipoprotéines de haute densité (HDL) ou "bon" cholestérol. En plus d'améliorer le taux de cholestérol, la teneur en fibres du millet favorise la santé cardiaque en réduisant la pression artérielle et, de même, le risque de crise cardiaque et d'accident vasculaire cérébral (**Zhang et al., 2021**).

INTRODUCTION

Dans le présent travail nous explorons les qualités nutritionnelles du millet perlé *Pennisetum glaucum* L., communément appelé « Hobob Aldakhn » en déterminant :

- Sa composition pytochimique,
- Sa composition en macro et micro-nutriments
- Ses teneurs en composés phénoliques et en tannins,
- Son activité antioxydante ;
- Son activité anti-inflammatoire *in vitro*.

PARTIE I
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I
HISTORIQUE, PRODUCTION ET
ASPECT BOTANIQUE.

Chapitre I : Historique, production et aspect botanique.

I.1. Provenance du millet

La culture du mil remonte en effet à la plus haute antiquité. Il était déjà utilisé et cultivé dans les temps préhistoriques dans beaucoup d'endroits. C'est ainsi qu'il a été identifié dans de nombreuses stations néolithiques. Les données de fouilles dans le site de Dhar Titchilt en Mauritanie, témoignent de la culture du millet par les populations locales durant une période de deux siècles, de 1000 à 900 avant J.C, sans qu'on a pu démontrer qu'il s'agissait d'une domestication sur place ou d'une introduction. Des représentations de millet sauvage ont été découvertes sur des poteries datant d'environ 5000 ans dans le centre du Soudan. En Europe, les mils étaient cultivés pour leurs grains servant à l'alimentation humaine. Ils ont néanmoins progressivement perdu toute leur importance.

Le terme "mil" regroupe un ensemble de graminées alimentaires annuelles qui ont pour caractéristique commune la petitesse de leurs graines. Ces céréales sont surtout cultivées sur les terres marginales dans les régions sèches des zones tempérées, subtropicales et tropicales. Les espèces les plus importantes sont le mil pénicillaire, l'éleusine, le millet commun et le millet des oiseaux. Le mil pénicillaire compte pour près de la moitié de la production mondiale du mil

C'est la céréale la plus tolérante à la sécheresse. Elle est cultivée dans des régions où la pluviosité annuelle se situe entre 150 et 800 mm. Sa culture couvrait plus de 33.39 millions d'hectares, qui se répartissent principalement dans les zones arides et semi-arides de l'Afrique avec 20.6 millions d'hectares cultivés pour une production de 13.6 millions de tonnes. Le millet perlé est une culture céréalière polyvalente qui fournit de la nourriture, du fourrage et du combustible sur plus de 31 millions d'hectares dans le monde ce qui représente 50 % de la production totale de millet (**Jalaja et al., 2016**). Plus de 90 millions de personnes sont dépendantes du millet perlé pour leur alimentation quotidienne et leurs revenus. Il est cultivé dans plus de 30 pays des cinq continents, à savoir l'Asie, l'Afrique, l'Amérique du Nord, l'Amérique du Sud et l'Australie, et fait vivre plus de 100 millions de personnes - les plus pauvres des pauvres.

Le millet perlé peut être cultivé dans des conditions agro-climatiques défavorables et se développe bien sans compromettre la quantité et la qualité des grains.

Le millet perlé a été caractérisé comme ayant un génome de 2530 Mb et un nombre de chromosomes diploïdes de 7 ($2n = 14$) (**Kadri et al., 2019**).

Il a évolué dans des conditions environnementales défavorables comme des sols infertiles, la chaleur, la sécheresse, etc. infertiles, la chaleur, la sécheresse, etc., ce qui lui donne une capacité naturelle à se développer dans des sols peu ce qui lui donne une capacité naturelle à se développer dans des sols pauvres en humidité et en nutriments et à des températures élevées (>40 °C). Elle est largement cultivé dans les régions arides et semi-arides de l'Afrique de l'Ouest, de l'Afrique de l'Est et de nombreuses régions de l'Inde (**Oumar et al., 2008**). Dans ces régions, le millet perlé constitue jusqu'à 75% de la production céréalière totale, et représente une part importante des régimes alimentaires locaux.

Les grains de millet perlé sont naturellement nutritifs, notamment en ce qui concerne les éléments suivants micronutriments (Fe et Zn). Il nécessite moins d'intrants (engrais, irrigation), par rapport à d'autres cultures importantes, et il est cultivé sur des terres stériles ou des terres qui ne sont pas considérées comme appropriées pour d'autres cultures (**Jalaja et al., 2016**).

En Inde, la production du millet a atteint 6.15 millions de tonnes sur une superficie de 9 millions d'hectares (**Jalaja et al., 2016**). En Afrique, 70% de la production provient de l'ouest du continent. Les principaux pays producteurs sont, par ordre d'importance décroissante : le Nigéria, le Niger, le Burkina, le Tchad, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. En Afrique de l'Est, le Soudan et l'Ouganda sont les plus gros producteurs, alors qu'en Afrique australe les cultures traditionnelles et donc celle du millet ont quasiment disparu (**Oumar et al., 2008**).

En Inde, où le millet arrive au quatrième rang des céréales après le riz, le blé et le maïs, sa culture est importante dans les états du Rajasthan, du Gujarat et du Haryana (**Govindan & Russell, 2003**). Comme en Afrique sahélienne, il joue un rôle majeur pour les populations locales dans les régions où les conditions climatiques ne permettent ni au sorgho, ni au maïs, ni au riz de se développer normalement.

Le millet a été introduit dans d'autres régions du globe comme les États-Unis (EU), l'Australie, etc. En 1857, le millet est introduit aux EU. Il y constitue vite une plante fourragère appréciée. Il est devenu dans les états du sud, en particulier en Géorgie, grâce aux excellents travaux de la station de Tifton, la plante fourragère annuelle d'été la plus cultivée (**Rude et al., 2003**). Sa culture occupe annuellement en Géorgie près de 40.000 ha. Au Nebraska, il est cultivé pour le grain destiné à l'alimentation des volailles et des porcs. Le millet est aussi cultivé dans les pays d'Afrique du Nord (Tunisie, Algérie, Libye et le Maroc) et en Espagne (**Vietmeyer, 1996**). En Algérie sa culture est surtout répandue au Sud-Ouest du pays. Dans la région d'Adrar, il est

anciennement cultivé partout dans les différentes régions de Touat, Gourara et Tidikelt (**Rahal-Bouziane, 2008**).

I.2. Le marché du millet

Les millets sont cultivés dans divers types tels que le sorgho, l'éléusine, le millet perlé, le millet de basse-cour, le millet commun et le petit millet à travers le monde. La consommation mondiale de millet a diminué à un taux de 0.9 % et devrait connaître une évolution positive au cours de la période de prévision. L'Inde, le Niger et la Chine sont les plus grands producteurs de mil au monde, représentant plus de 55% de la production mondiale. Pendant de nombreuses années, l'Inde a été le premier producteur mondial de mil. Cependant, ces dernières années, la production de mil a augmenté de façon spectaculaire en Afrique.

La teneur élevée en protéines de ces céréales les rend idéales pour la population végétarienne et végétalienne, principalement basée aux États-Unis, en Europe et en Asie-Pacifique. Par conséquent, la demande de produits à base de mil augmente rapidement dans ces régions (**Anonyme, 2022**).

I.2.1. Systèmes de production du mil

Dans la plupart des régions du monde, le mil est consommé localement et sert de culture vivrière de subsistance. La production commerciale du mil est risquée, surtout en Afrique, car l'absence de débouchés commerciaux importants signifie que les fluctuations de la production se répercutent de façon particulièrement sensible sur les prix, surtout dans les régions où le mil est la principale culture vivrière. Le mil n'est pas cultivé que pour son grain, on l'utilise aussi pour les pâturages, le fourrage vert ou l'ensilage. L'élevage est une composante importante de la plupart des systèmes de production du mil, les résidus de récolte étant une source importante de fourrage. En Inde, par exemple, quelques variétés locales qui atteignent plus de 3 m de hauteur sont appréciées pour la grande quantité de paille qu'elles procurent, même si leur rendement en grain est relativement faible.

Dans les pays en développement, la culture du mil est généralement extensive et les technologies améliorées sont peu répandues, sauf dans certaines régions de l'Inde où l'agriculture est plus commerciale. La culture est généralement pratiquée, sans irrigation ni apport d'engrais chimiques, sur des sols légers, bien drainés et pauvres en matière organique. Lorsqu'ils ont les moyens d'irriguer leurs champs, les paysans se tournent vers des cultures plus

rentables. Mais certaines régions font exception, comme l'état du Gujarat en Inde, où il y a une forte demande saisonnière pour les résidus de récolte du mil pénicillaire, lesquels servent à l'alimentation des animaux laitiers. Dans les régions où la campagne culturale est suffisamment longue pour permettre deux cultures successives, des cultivars du mil à cycle court sont cultivés sous irrigation avant ou après la culture de rente (FAO, 2021).

I.2.2. Principales tendances du marché

Selon la FAO (2021), la production mondiale de mil était estimée à 28.2 millions de tonnes métriques en 2019, qui était passée à 30.5 millions de tonnes métriques en 2020. L'Inde est le plus grand producteur mondial avec une part de marché mondiale de 33.3% en 2020. Au cours des deux dernières décennies, l'importance du millet comme aliment de base, en particulier en Inde, a diminué en raison de divers facteurs, notamment l'augmentation des revenus, l'urbanisation croissante et les politiques gouvernementales. Plus de 50% de la production de mil trouve actuellement son chemin vers des utilisations alternatives par opposition à sa consommation uniquement comme aliment de base. En 2018, le Conseil de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a approuvé la proposition de l'Inde d'observer une Année internationale du mil en 2023.

Les millets sont des superaliments riches en nutriments tels que le cuivre, le magnésium, le phosphore et le manganèse. Le riche contenu nutritionnel des millets aide à maintenir une vie saine.

Ce sont des aliments idéaux pour les personnes souffrant de maladies chroniques telles que le diabète, l'obésité et les maladies cardiaques. Les millets contiennent des fibres, qui aident à la digestion et luttent contre les problèmes intestinaux. La consommation régulière de millet aide à prévenir les problèmes gastro-intestinaux et autres maladies liées aux reins et au foie.

La plus grande part du segment des aliments pour petit-déjeuner est attribuée à la demande croissante de produits alimentaires riches en fibres et sans gluten parmi les consommateurs soucieux de leur santé. Ainsi, la demande croissante de millet parmi les consommateurs est susceptible de stimuler le marché (Anonyme, 2022).

Le millet a été l'un des nutriments de base des humains en Afrique. Les pays africains, principalement le Niger, le Mali, le Nigéria, le Burkina et le Soudan, détiennent plus de 40 % de la consommation mondiale de mil (figure 1).

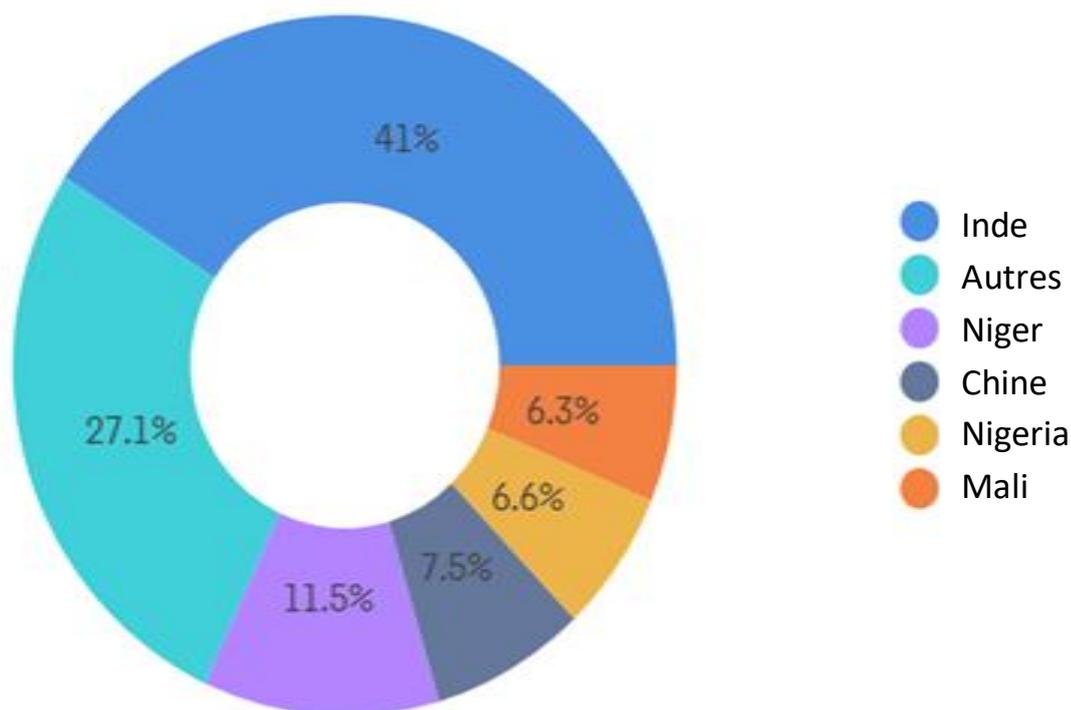


Figure 1 ; Production mondiale de millet (FAO, 2021).

Le millet a été l'un des nutriments de base des humains en Afrique. Les pays africains, principalement le Niger, le Mali, le Nigéria, le Burkina et le Soudan, détiennent plus de 40 % de la consommation mondiale de mil. Les millets sont populaires dans les régions en développement, comme l'Inde et l'Afrique, où la sécurité alimentaire et nutritionnelle sont les principaux défis. La grande capacité de tolérance à la sécheresse de la culture lui permet d'être cultivée dans les conditions environnementales défavorables des régions. L'Inde est le premier producteur mondial de millet indien.

En Afrique, des politiques gouvernementales (FAO, 2021) visant à soutenir la production et la consommation de mil via des banques de semences communautaires, des foires aux semences et des réseaux d'agriculteurs. Les investissements publics et privés sont limités au développement et à la production de semences de mil. Les prix internationaux du mil sont très volatils, déterminés en grande partie par les volumes d'approvisionnement et ne sont généralement pas liés à ceux des autres principales céréales secondaires, telles que le maïs, le sorgho ou l'orge. Ainsi, comme le mil joue un rôle important dans la sécurité alimentaire et l'économie de nombreux pays d'Afrique, la consommation devrait être élevée dans le pays.



Figure 2 : Distribution du marché de millet (FAO, 2021).

I.3. Aspect botanique

Le millet commun (*Panicum miliaceum* L.) est une graminée annuelle (**figure 3**); chaque année, il croît à partir de nouvelles graines. Le millet commun également connu sous le nom de panic millet, appartient à la tribu des Paniceae, sous-famille des Panicoideae, famille des Graminées. Le millet commun est une graminée annuelle de saison chaude. Sa plantule croît rapidement en une plante dressée qui, à faible densité de peuplement, peut former des talles. Ses feuilles, plus ou moins pubescentes sur les deux faces et en bordure, mesurent 1-2 cm de largeur et jusqu'à 30 cm de longueur. Leurs gaines foliaires, qui se recouvrent partiellement, sont pourvues de poils denses. La ligule, située au sommet de la gaine et embrassant la tige, consiste en une ligne de poils denses. La base des feuilles ne comporte aucune oreillette (lobe). La panicule très ramifiée, qui surmonte la tige et s'allonge entre 15 et 30 cm, peut être de type ouvert ou compact. Chaque rachis ne porte qu'un épillet, long de 5 mm, que composent une fleur fertile et une fleur stérile enveloppées par deux glumes. La « graine », de forme grossièrement ovée, est en fait la fleur fertile encapsulée dans le tégument rigide et brillant que composent le lemma et le paléa. La graine, longue de 3 mm et large de 2 mm, peut

prendre diverses couleurs : noir brunâtre, brun olive, rouge orange, or et crème (OMAFRA, 2016).



Figure 3 : Pennisetum glaucum L.

(https://img.freepik.com/photos-gratuite/vue-rapprochee-usine-millet-perle_488761-159.jpg?w=826)

Le mil perlé ou mil à chandelle, *Pennisetum glaucum*, représente 40% de la production mondiale des mils. C'est aussi, l'espèce la plus couramment cultivée pour la consommation humaine et qui produit les plus gros grains.

La section Pénicillariae comprend, en plus des mils céréaliers cultivés, un certain nombre de formes d'aspect plutôt fourrager que l'on ne trouve à l'état spontané qu'en Afrique (**tableau 1**).

Tableau 1 : Les différentes caractéristiques du millet (source : sites Google et Baidu).

Nom du millet	Nom scientifique	Couleur	Forme	Longueur	Pays d'origine	Grains	Photo de la plante
Millet des oiseaux	<i>Setaria italica</i>	Jaune pâle à orange	Ovoïde	2 mm de longueur	Chine		
Millet Eleusine	<i>Eleusine coracana</i>	Marron claire à noire, brune.	Sphérique	1–2 mm en diamètre	Uganda		
Millet perlé	<i>Pennisetum</i>	Blanche, grise, jaune pâle, brune ou pourpre.	Ovoïde	3–4 mm de longueur	Afrique du ...		
Millet commun	<i>Panicum miliaceum</i>	Blanche crème, jaune, orange	Sphérique à	3 mm de long et 2	Centre et l'Est		
Herbe à épiee	<i>Paspalum</i>	Marron noircie à noire	Elliptique à	1.2 à 9.5 µm de long	Inde		
Millet Barnyard	<i>Echinochloa crusgalli</i>	Blanche	Sphérique mince	2–3 mm de long	Japan et Inde		
Petit millet	<i>Panicum sumatrense</i>	Grise à blanche nacrée	Elliptique à ovale	1.8 à 1.9 mm de long	Sud d'Asie		

Le genre *Pennisetum* est constitué de 140 espèces et sous-espèces qui sont réparties dans les régions tropicale et subtropicale (**Upadhyaya et al., 2008**). Ce genre est composé de trois pools géniques, dont le pool primaire est monospécifique et qui rassemble les trois sous-espèces de *P. glaucum* qui s'interfécondent naturellement en donnant des descendances fertiles. Le pool secondaire est constitué de deux espèces *P. purpureum* et *P. squamulatum*, qui peuvent s'hybrider facilement avec *P. glaucum*. Le pool tertiaire regroupe les autres espèces du genre, soit une soixantaine. Il comprend les espèces de la section *Brevivalvula* parmi lesquelles on cite *P. polystachion*, *P. pedicellarum*, *P. subangustum*, *P. atrichum*, *P. hordeoides* et *P. setosum* qui s'étendent sur une large partie de l'Afrique, ainsi qu'au Proche-Orient et en Inde (**Kadri et al., 2019**).

En simplifiant la taxonomie du mil, **Brunken (1977)** a regroupé l'ensemble des mils pénicillaires en une seule espèce polymorphique *P. typhoideum* (L.) Rich avec trois sous-espèces correspondant au mil cultivé (*Pennisetum glaucum subsp. glaucum*), au mil sauvage (*P. glaucum subsp. monodii*) et aux formes intermédiaires (*P. glaucum subsp. sternostachyum*).

I.4. Croissance et développement

Le cycle de croissance du mil peut être subdivisé en trois phases : végétative, reproductive et maturation des grains.

- Phase végétative

La phase végétative a une durée de 30 à 50 jours, allant de l'émergence à la formation de la panicule. Elle commence par la germination de la graine et l'apparition des jeunes plantes, le tallage et continue jusqu'à l'initiation de la panicule (**Kadri et al., 2019**).

La germination est hypogée, c'est-à-dire qu'elle se fait entièrement sous terre. La graine germe au bout de 24 heures dans les bonnes conditions et la levée s'achève au bout de 2 à 5 jours après le semi (JAS). La radicule apparaît la première ensuite les tiges et les feuilles. Environ 8 JAS, la radicule ou la racine principale disparaît et est remplacée par des racines secondaires ou adventives.

Le tallage, émission des tiges secondaires à partir des tiges primaires, débute 15 jours après la levée et se poursuit pendant 10 à 20 jours. A ce stade, l'accumulation de biomasse concerne essentiellement les feuilles et les racines.

L'élongation de la tige se produit par l'élongation séquentielle des entre-nœuds en commençant à la base : c'est la montaison. Les talles suivent les mêmes phases que la tige principale mais avec un léger retard (**Loumerem, 2004**). L'accumulation de la biomasse concerne la tige en plus des racines et des feuilles. L'initiation de la panicule est marquée par la transformation du bourgeon végétatif apical en bourgeon floral, synonyme du début de la phase suivante.

- Phase de reproduction

Elle commence avec l'initiation de la panicule de la tige principale entre 22 et 30 jours après l'émergence. Cette phase comprend l'épiaison, la floraison et la fructification. Elle est marquée par le développement total des feuilles et par la sénescence des feuilles à la base de la tige principale et a une durée de 18 à 25 jours suivant les variétés (**Loumerem, 2004**).

Durant la montaison, la feuille paniculaire se renfle au niveau de la gaine 6 à 10 jours avant l'émergence de la panicule (= épi). Cette dernière subit une série de changements : différenciation des épillets, des glumes, des stigmates des fleurs et des anthères. Dès l'émergence de l'épi (épiaison), les parties femelles des fleurs s'épanouissent les premières par l'exposition des stigmates bifides blanchâtres. Les anthères ne s'épanouissent que trois à cinq jours après émergence de l'épi : c'est la floraison (**Loumerem, 2004**). En général, ce sont les pollens des anthères épanouies sur d'autres épis qui fécondent les ovaires de ceux qui émergent

à la faveur du vent, des insectes ou autre source de pollinisation.

La fécondation conduit à l'œuf qui donne la graine : c'est la fructification ou nouaison. Au terme de sa croissance, l'épi constitue une masse allongée à l'intérieur de la feuille paniculaire au sommet de la tige.

- ***Phase de maturation***

La maturation est le développement progressif du caryopse ou fruit du sommet vers la base de l'épi (**Moumouni, 2014**). Cette phase débute avec la fécondation des fleurs de la panicule principale et continue jusqu'à la maturité de toute la plante (tige principale et talles).

Les grains atteignent leurs maturités en général 22 à 30 jours après la fécondation suivant la variété. L'accumulation de biomasse se produit surtout dans les caryopses mais peut continuer dans d'autres parties car les talles sont en retard du développement. Il s'agit d'une phase d'élaboration de substances de réserves (amidon, protéines), la migration de celles-ci vers l'albumen du grain et parallèlement la formation de l'embryon (**Loumerem, 2004**). En passant par 3 stades (laiteux, cireux et vitreux), les grains arrivent à la maturité physiologique 20 à 50 jours après la floraison selon les variétés.

CHAPITRE II
QUALITES NUTRITIONNELLES
ET BIO-FONCTIONNELLES DU
MILLET

Chapitre II : Qualités nutritionnelles et bio-fonctionnelles du millet.

II.1. Le millet : un aliment nutritif alternatif

La production de céréales a atteint de nouveaux sommets dans le monde entier. Ces céréales ont un rôle important dans l'alimentation humaine en tant que principale source d'énergie. Globalement, la production de céréales en 2019 atteint un record de 2715 millions de tonnes (FAO, 2020). Cependant, de nos jours, le monde est confronté à de nombreux problèmes globaux tels que l'augmentation de la population, les variations climatiques, l'augmentation des prix des denrées alimentaires, la pénurie d'eau, la contamination environnementale et d'autres impacts socio-économiques. Ces facteurs défavorables pourraient affecter les développements agricoles régionaux et réduire la production céréalière, entraînant des prix alimentaires élevés et des problèmes majeurs de sécurité alimentaire dans le monde entier. De plus, ces conditions de vulnérabilité sont difficiles pour les agriculteurs locaux en raison des sources limitées de réalimentation. Par conséquent, les problèmes de production limitée sur le terrain doivent être repensés par des experts en nutrition et en technologie pour rechercher une culture céréalière appropriée qui devrait être considérée comme une source alimentaire potentielle. À cet égard, le millet pourrait être un aliment nutritif alternatif pour répondre aux besoins alimentaires d'une population croissante (Kumar et al., 2018).

II.2. Composition et interaction nutritionnelles de millet perlé

II.2.1. Composition biochimique

En raison de ces attributs nutritionnels supérieurs, les millets ont été utilisés pour la fabrication de produits alimentaires traditionnels/communes comme les pains plats, les porridges, les boissons alcoolisées et non alcoolisées, les sucreries, les pâtes, les gâteaux, les biscuits soufflés autres que les produits alimentaires fonctionnels (Adebiyi et al., 2017). Les grains de millet perlé peuvent être considérés comme un substitut potentiel pour la diversification alimentaire en raison de leurs attributs nutritionnels supérieurs à ceux des autres céréales comme le maïs, le blé et le riz (Taylor & Kruger, 2018).

La constitution chimique proximale des grains de millet perlé sur une base de poids sec comprend 11,80 g/100 g de protéines, 72,20 g/100 g de glucides, 7,80 g/100 g de fibres alimentaires, 6,4 g/100 g de lipides, 1,8 g/100 g de minéraux. En général, les millets contiennent environ 7-12% de protéines, 2-5% de matières grasses, 65-75% de glucides et 15-

20% de fibres alimentaires. Ils ont également une quantité notable de vitamines, de minéraux et de composés phénoliques (Srilekha et al., 2019). Le **tableau 2** représente un profil nutritionnel complet de différents types de millet. Ce tableau montre que le millet perlé a plus de protéines et de lipides libres, suivi du millet commun, du millet des oiseaux et du millet d'Eleusine, respectivement. Certains types de millet, tels que l'herbe à épée, millet Barnyard et le petit millet, ne contiennent pas beaucoup de protéines, mais ils sont riches en fibres alimentaires et en composés phénoliques.

Le millet perlé est l'une des cultures céréalières les plus importantes parmi le riz, le blé, le maïs, l'orge et le sorgho. Il s'agit d'une espèce C4 dont l'efficacité photosynthétique et la production de matière sèche sont très élevées. Elle joue un rôle très important en contribuant à la sécurité alimentaire et nutritionnelle des pauvres dans les zones de culture du millet perlé en Inde et en Afrique sub-saharienne. C'est une source riche en macro- et micronutriments et est considéré comme un "Nutri-céréales" en raison de son excellent profil nutritionnel par rapport aux autres céréales (Kumar et al., 2022).

Tableau 2 : Profil nutritionnel complet de différents types de millet (Kumar et al., 2022).

Type de Millet	Protéines	Cendres	Lipides libres	Fibres alimentaires solubles	Fibres alimentaires insolubles	Contenu phénolique libre	Contenu phénolique relié
	(%)	(%)	(mg/g)	(g/100 g)	(g/100 g)	(µg/g)	(µg/g)
Millet des oiseaux	10.5 ± 0.1	3.5 ±	46.8 ± 1.3	2.7 ± 0.7	23.0 ± 1.0	122 ± 4	2774 ± 40
Millet Eleusine	6.2 ± 0.1	8.0 ±	9.3 ± 1.0	3.7 ± 0.0	20.4 ± 0.1	2229 ± 82	2778 ± 87
Millet perlé	14.1 ± 0.0	2.1 ±	56.7 ± 1.9	2.6 ± 0.2	11.5 ± 0.4	228 ± 1	1949 ± 25
Millet commun	10.9 ± 0.1	3.6 ±	37.1 ± 0.0	2.4 ± 0.2	16.1 ± 0.1	87 ± 3	1414 ± 26
Herbe à épée	6.2 ± 0.0	3.6 ±	26.5 ± 0.9	2.2 ± 0.1	31.7 ± 0.2	2518 ± 36	7570 ± 50
Millet Barnyard	10.0 ± 0.1	4.3 ±	47.7 ± 0.1	2.0 ± 0.1	26.1 ± 0.0	127 ± 7	2324 ± 40
Petit millet	7.9 ± 0.0	4.2 ±	49.7 ± 0.1	3.5 ± 0.1	21.8 ± 0.3	187 ± 5	1107 ± 16

Le grain de millet perlé comprend 56 à 65% d'amidon et offre de meilleures valeurs caloriques (360 Kcal/ 100 g) que les autres céréales. Il est également riche en fibres (1,2 g/100 g). La teneur en protéines du grain de millet perlé est plus élevée que celle du grain de riz. La teneur en lipides (triacylglycérols) du grain de millet perlé est plus élevée (~6%), par rapport au blé et au riz. Il est riche en AGPI (75%) avec une forte teneur en acides gras oméga-3. C'est une source riche en vitamines hydrosolubles (comme la thiamine, la riboflavine et l'acide nicotinique) et de minéraux (comme le phosphore, le fer, le zinc, le cuivre, le potassium, etc).

II.2.2. Biodisponibilité nutritionnelle

Les millets étant considérés comme des aliments de base efficaces pour remédier à la carence nutritionnelle, il est essentiel d'élucider la bioaccessibilité et la biodisponibilité finale de leurs nutriments. La bioaccessibilité des aliments à base de millet (la partie du nutriment ingéré ou du composé bioactif libéré de la matrice alimentaire dans le tube digestif) et la biodisponibilité (la partie du nutriment ingéré ou du composé bioactif qui entre dans la circulation systémique) (**Motilva et al., 2015**) dépendent directement de leur composition nutritionnelle et des interactions moléculaires entre les composants de la matrice alimentaire et leurs interactions. La biodisponibilité des nutriments est l'indicateur ultime de la qualité et repose sur le type de matrice alimentaire, sa décharge à partir de la matrice, les modifications chimiques pendant la digestion, le mécanisme d'absorption, la biodistribution et le métabolisme. Les méthodes *in vitro* d'évaluation de la biodisponibilité/bio-accessibilité peuvent aider à déchiffrer les interactions moléculaires entre les composants alimentaires et les nutriments, l'influence de l'activité enzymatique, du pH, du traitement et de la préparation des aliments sur l'absorption des nutriments ou des biomolécules. La dialyse *in vitro*, les modèles gastro-intestinaux dynamiques ou statiques sont largement utilisés pour analyser la biodisponibilité/bioaccessibilité des phytonutriments (**Santos et al., 2019**). Différents processus physiologiques sont responsables de la diminution de la biodisponibilité des nutriments.

- Le millet comme matrice alimentaire à base d'amidon

Les aliments à base de millet contiennent une matrice dense où les granules d'amidon sont pris au piège dans une matrice protéique. Les lipides comme les monoglycérides, les lysophospholipides et les acides gras forment des complexes stables avec l'amylose tandis que l'amylopectine interagit rarement avec les lipides (**Wang et al., 2016**). L'amidon a la capacité inhérente de former une conformation hélicoïdale. Ces hélices peuvent contenir une seule

chaîne dont la stabilisation est obtenue par la présence d'un ligand invité dans la lumière de l'hélice. Ces structures sont communément appelées "complexes d'inclusion". Les polymères d'amidon (amylose et amylopectine) et les lipides provoquent la formation de complexes d'inclusion naturels dans l'amidon natif ou lors d'un protocole de chauffage-refroidissement, ce qui se produit généralement lors du traitement des aliments. Les acides gras libres et les lipides monoacylés saturés ont tendance à former des complexes d'inclusion hélicoïdaux avec l'amylose, tandis que les lipides di- ou tri-acylés ne forment pas de tels complexes. La création et la stabilisation de ces complexes incluent plusieurs interactions non covalentes comme les forces de van der Waals, les attractions hydrophobes, les liaisons hydrogène (**Putseys et al., 2009**). Les hélices de [1 → 4] glucane contiennent des groupes hydroxyle hydrophiles qui sont disposés sur leur surface externe tandis que les oxygènes et les groupes méthylène des liaisons glucosidiques s'alignent le long du noyau interne façonnant une cavité hydrophobe qui peut accueillir des ligands appropriés

- **Le millet comme matrice alimentaire à base de protéines**

Bien qu'une variété d'aliments fonctionnels soit préparée à partir de millets en raison de leur teneur élevée en fibres alimentaires et en amidon résistant, l'absence de gluten et de viscoélasticité limite leurs propriétés physico-chimiques. L'utilisation des farines de millet pour la préparation des plats nécessite un supplément pour atteindre les exigences rhéologiques et viscoélastiques souhaitées. L'ajout exogène de protéines dans les préparations alimentaires à base de millet peut améliorer leur qualité sensorielle, leur texture et leur stabilité au stockage et réduire davantage l'hydrolyse de l'amidon dans l'intestin grêle. Dans une étude, des farines de millet ont été supplémentées avec 12% de protéines de gluten. Les résultats ont indiqué le rôle certain de ces protéines exogènes dans la diminution de la rétrogradation de l'amidon, l'amélioration du développement et de la stabilité de la pâte (**Sharma & Gujral, 2019**). La rétrogradation plus faible était due aux interactions entre le gluten et l'amidon de millet par des liaisons hydrogène, diminuant la recristallisation de l'amidon en modifiant la redistribution moléculaire de l'eau (**Curti et al., 2014**). Les glutens et les fibres réduisent l'hydrolyse de l'amidon en raison de leurs effets de protection contre les enzymes hydrolytiques. De même, les farines de millet présentent un temps de développement de la pâte plus faible, par rapport à la farine de blé (**Sharma & Gujral, 2019**). Les auteurs ont expliqué que le taux d'hydratation lent du gluten de blé, augmentait le temps de développement de la pâte par rapport aux farines de millet, dépourvues de gluten.

Une étude de **Deshpande & Cheryan (1984)** suggère également que l'hydrolyse de la matrice protéique par les protéases pourrait libérer l'acide phytique et les composants phénoliques de la matrice du grain, inhibant l' α -amylase et réduisant la vitesse de digestion de l'amidon dans le tube digestif. La forme, la taille, le rapport surface/poids et la transformation influencent également la biodisponibilité des nutriments car ils déterminent l'accessibilité d'un nutriment à partir de la matrice du grain.

- **Le millet comme matrice alimentaire à base de polyphénols**

La biodisponibilité et la bioaccessibilité des polyphénols ne correspondent pas directement à leur abondance comparative dans la matrice alimentaire. L'intégrité structurelle du matériel végétal dans lequel ils sont intégrés ainsi que leurs interactions chimiques avec les divers composants alimentaires sont essentielles pour leur libération correcte et leur absorption ultérieure dans le système vivant à travers l'épithélium intestinal. Puisque les matrices alimentaires à base de millet ont une composition diversifiée en acides aminés, les acides phénoliques se lient aux poches hydrophobes d'une protéine, modifiant ainsi le repliement, la structure et la fonctionnalité de la protéine (**Guan et al., 2021**). Les interactions hydrophobes entre les acides phénoliques et les protéines ont lieu dans les domaines/régions de la protéine où un nombre élevé de résidus d'acides aminés comme la valine, l'isoleucine, la leucine, la phénylalanine, la proline, la méthionine, la glycine, la cystéine et l'alanine sont présents. Les chaînes latérales du tryptophane, de la tyrosine, de la thréonine, de la sérine, de l'acide glutamique, de la glutamine, de l'histidine, de la lysine, de la cystéine, de l'acide aspartique, de l'arginine et de l'asparagine ont une plus grande propension à interagir par des liaisons hydrogène (**Yu & Liang, 2021**). Cela peut bloquer davantage plusieurs acides aminés essentiels, influençant leur biodisponibilité. L'effet de l'interaction phénol-protéine sur la digestibilité des protéines était analysée sur des produits à base de millet (couscous et porridge) (**Bora et al., 2019**). Ces interactions ont diminué la digestibilité des protéines du couscous et de la bouillie de 52,0 % à 44,6 % et de 52,7 % à 44,3 %, respectivement, ce qui peut être expliqué sur la base de la formation de complexes entre les groupes hydroxyle des acides phénoliques et les chaînes latérales des acides aminés de protéines spécifiques. Une étude a été menée pour comprendre l'effet de l'étuvage sur la disponibilité des phénols dans le porridge de millet et le couscous. Ils ont indiqué une augmentation du contenu phénolique libre total de porridge de millet perlé et de couscous à base de grains étuvés par rapport à ceux préparés à partir de grains non étuvés (**Bora et al., 2019**). Cette augmentation pourrait être

due à la migration restreinte des phénols du péricarpe vers les couches internes du grain et à la libération ultérieure des phénols liés des matrices pendant le processus d'étuvage.

- **Le millet comme matrice alimentaire à base de micronutriments**

Les millets sont connus pour leur richesse en micronutriments ; leur biodisponibilité minérale est également une caractéristique essentielle influencée par d'autres composants de la matrice alimentaire. Ils sont soit intrinsèquement présents dans l'aliment, soit ajoutés au moment de la cuisson ou de la transformation. Les minéraux existent sous forme d'ions libres, de complexes et de composés dans les matrices alimentaires. Leurs formes ioniques libres sont très réactives en raison de leur grande solubilité et de leur tendance à interagir rapidement avec les composants de la matrice alimentaire par des liaisons de coordination, covalentes, électrostatiques, etc. De plus, la présence d'inhibiteurs d'absorption dans la matrice affecte à son tour la biodisponibilité des minéraux. Les polyphénols et les phytates sont deux composés prédominants présents dans les matrices alimentaires à base de céréales.

Les pains fortifiés au millet et au sésame ont été évalués pour leur teneur en minéraux et leur bio-accessibilité (**Agrahar-Murugkar, 2020**). Ces pains ont montré une bio-accessibilité élevée du calcium et du zinc. Les auteurs ont déclaré que la teneur en protéines dans la matrice alimentaire, améliore la biodisponibilité de divers minéraux, vraisemblablement en formant des complexes d'acides aminés, facilitant leur absorption (**Sandstrom et al., 1980**). Des bouillies ont été préparées à partir de millet perlé à grains entiers, mélangé à des poudres de carotte (provitamine A), de feuilles de *Moringa oleifera* et d'*Adansonia digitata* (Baobab). On a constaté une augmentation apparente de la stabilité et de la bioaccessibilité des caroténoïdes de la provitamine A à partir de ces mélanges. Les auteurs indiquent que l'utilisation du Baobab pourrait améliorer la miscibilité (bioaccessibilité) et la libération digestive dans le tube digestif. Le Baobab contient une grande quantité d'acide citrique et ascorbique qui aide à la stabilisation des caroténoïdes dans les micelles, tandis que le fer précipite les acides gras et les sels biliaries et réduit la formation des micelles de β -carotène (**Ndiaye et al., 2020**).

Partie II

La partie expérimentale

CHAPITRE III

MATERIELS ET METHODES

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES.

L'ensemble de ce travail a été réalisé au laboratoire des micro-organismes bénéfiques, des aliments fonctionnels et de la santé (LMBAFS, site II ex. INES de chimie) et au laboratoire pédagogique de biochimie 2, faculté des sciences de la nature et de la vie de l'université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem.

III.1. Matériels

III.1.1. Matériel biologique

Le matériel végétal est constitué des graines de millet perlé (**Figure 4**), procuré des herboristes de Mostaganem.



Figure 4 : Les grains de millet perlé utilisés dans cette étude.

III.1.2. Matériel non biologique

La réalisation des expériences a fait appel à un matériel classique composé de verreries, d'équipement, d'appareillages et de réactifs et produits chimiques.

- Les réactifs et produits chimiques utilisées :

La solution de DPPH : (1,1 Diphényl 2 Pycril Hydrazil) est un radical libre stable de couleur violette intense. Il est employé dans la mesure de l'efficacité d'un antioxydant à fixer des radicaux libres et donc d'arrêter la propagation de la réaction en chaîne.

La vanilline : Est un composé organique de formule moléculaire $C_8H_8O_3$. C'est un aldéhyde phénolique. Ses groupes fonctionnels comprennent l'aldéhyde, l'hydroxyle et l'éther. C'est le composant principal de l'extrait de gousse de vanille.

Le HCL : Le chlorure d'hydrogène est un gaz légèrement jaunâtre, corrosif, non inflammable.

Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) : Est aussi appelée eau oxygénée. Elle est incolore et légèrement plus visqueuse que l'eau.

Chlorure ferrique ($FeCl_3$) (à 0,1%) : Le chlorure de fer (III), également appelé chlorure ferrique ou perchlorure de fer, est un sel de fer de formule chimique $FeCl_3$. C'est un composé très hygroscopique, qui émet des vapeurs dans l'air humide sous l'effet de l'hydrolyse.

L'hydroxyde de sodium (NaOH) : également appelé soude caustique, est une base forte qui se présente, à température ambiante, sous forme solide. Elle est constituée de cations sodium (Na^+) et d'anions hydroxyde (OH^-) et est très soluble dans l'eau.

Le chloroforme : est un composé chimique organochloré, fréquemment utilisé comme solvant, Le chloroforme tend à être remplacé actuellement par le dichlorométhane, aux propriétés similaires mais moins toxique.

L'acide sulfurique (H_2SO_4) : C'est un acide minéral dont la force est seulement dépassée par quelques superacides. Il est miscible à l'eau en toutes proportions, où il se dissocie en libérant des cations H^+ .

Trichloroéthane ($C_2H_3Cl_3$) : est un solvant organochloré. Il est incolore et il a une odeur douceâtre. Il est utilisé comme solvant et comme un intermédiaire dans la synthèse du dichloroéthane.

III.2. Méthodes

III.2.1. Analyse physico-chimique de la farine de millet perlé

La farine de millet perlé a été analysée pour sa teneur en eau, en protéines brutes, en matières grasses totales, en cendres totales et en fibres brutes conformément aux méthodes officielles de l'Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 2010).

III.2.1.1. Teneur en eau

Principe

Déterminer la teneur en eau des échantillons par la méthode de dessiccation.

Mode opératoire

- 1- Broyer les grains de millet perlé finement.
- 2- Peser et placer 1g d'échantillons dans des coupelles.
- 3- Maintenir les échantillons dans un four à air chaud à 105°C pendant une heure.
- 4- Retirer la coupelle et placer dans un dessiccateur pour refroidir.

Expression des résultats

Le poids de la coupelle après dessiccation est ensuite enregistré. L'opération a été répétée chaque 1 heure jusqu'à ce qu'un poids constant soit atteint. La perte de poids représente la teneur en eau de l'échantillon :

$$\text{Teneur en eau (\%)} = (\text{Perte de poids (g)}/\text{Poids de l'échantillon (g)}) \times 100.$$

III.2.1.2. Teneur en matière grasse

Principe

L'estimation de la matière grasse a été effectuée en utilisant la méthode d'extraction au Soxhlet.

Mode d'opératoire

- 1- Peser l'échantillon exempt d'humidité dans un ballon pour l'extraction de la matière grasse.
- 2- Maintenir le ballon contenant l'éther de pétrole dans un appareil à Soxhlet pendant 16-18h.
- 3- Filtrer l'extrait en le passant à travers un entonnoir à verre fritté.
- 4- Évaporer l'éther de pétrole.

Expression des résultats

$$\text{Teneur en matière grasse (\%)} = (\text{teneur en extrait éther (g)}/\text{poids de l'échantillon (g)}) \times 100$$

III.2.1.3. Teneur en cendres

Principe

Les cendres ont été analysées par incinération dans un four à moufle.

Mode opératoire

- 1-Peser les échantillons et les placer dans des creusets de silice pour brûler la matière organique.
- 2-Placer les creusets dans un four à moufle à 600°C pendant 4h.
- 3-Placer les creusets dans le dessiccateur et les laisser refroidir.

Expression des résultats

Le pourcentage de cendres a été calculé comme suit :

$$\text{Teneur en cendres (\%)} = (\text{poids des cendres (g)} / \text{poids de l'échantillon (g)}) \times 100$$

III.2.1.4. Teneur en protéines totales

Principe

La teneur en protéines totales a été déterminée en utilisant un appareil micro-Kjeldhal et le résultat est corrigé par un facteur de 6.25 pour convertir la teneur en azote en protéines brutes.

Mode opératoire

- 1-Dans un matras de digestion Kjeldahl, digérer les échantillons en mélangeant 2 g de mélange de digestion (10 parts de sulfate de potassium et 1 part de sulfate de cuivre) et 25 ml d'acide sulfurique.
- 2-Maintenir le matras de digestion dans un minéralisateur pendant l'ébullition pour une digestion complète.
- 3-Refroidir le contenu et filtrer, puis transférer dans une fiole jaugée de 100ml et compléter le volume avec l'eau distillée.
- 4- Dans un ballon de distillation, prélever 5ml d'échantillon et 40% d'hydroxyde de sodium et piéger le borate d'ammonium dans une solution d'acide borique à 4% contenant un indicateur mixte (rouge de méthyle et vert de bromocrésol). Chauffer légèrement la fiole afin de faire virer le pH en milieu basique
- 5-Doser l'ammoniac par une solution titrée d'acide chlorhydrique. L'équivalence est marquée par une coloration rose due au rouge de méthyle.

Expression des résultats

$$\text{Teneur en azote (\%)} = \text{valeur du Titre} \times \text{Normalité de l'HCL} \times 14 \times 100 / \text{poids de l'échantillon (g)} \times 100$$
$$\text{protéines totales (\%)} = \text{teneur en azote (\%)} \times 6.25$$

III.2.1.5. Teneur en fibres brutes

Principe

Les fibres brutes ont été déterminées dans les échantillons dégraissés par la méthode de digestion acide-alcaline.

Mode opératoire

1-Peser les échantillons dégraissés broyés après une digestion acide en les faisant bouillir avec 200 ml d'acide sulfurique à 1.25% pendant une demi-heure.

2-Continuer une digestion alcaline avec 200 ml d'hydroxyde de sodium à 1.25% pendant une demi-heure.

3-Sécher le résidu obtenu dans un four à air chaud.

4-Enregistrer le poids initial et placer le creuset contenant l'échantillon dans le four à moufle à $600 \pm 5^\circ\text{C}$ pendant 4h.

5-Refroidir le creuset puis enregistrer le poids final de l'échantillon.

Expression des résultats

Le teneur en fibres brutes a été calculée comme suit :

$$\text{Fibres totales (\%)} = \frac{\text{poids de l'échantillon avant incinération} - \text{poids de l'échantillon après incinération}}{\text{poids de l'échantillon (g)}} \times 100$$

III.2.1.6. Teneur en glucides totaux

Principe

Les oses totaux sont dosés selon Dubois et al. (1956) modifiée par Masuko et al. (2005).

Mode opératoire

1 ml de la solution à doser (digestat) est mis dans un tube à essai avec 1 ml de phénol (à 5% dans l'eau). 5 ml H_2SO_4 (96%) sont ajoutés rapidement sans les faire couler le long des parois et le mélange est agité immédiatement. Une coloration jaune se développe, stable durant

plusieurs heures. Les tubes (+ témoin) sont placés au Bain-Marie à 25/30°C pendant 20 minutes puis refroidis sous eau à 20°C. L'absorbance est mesurée à 490 nm.

Expression des résultats

La densité optique de chaque échantillon a été mesurée à 490 nm. Les teneurs sont déterminées en référence à une gamme étalon de glucose.

III.2.1.7. Analyse des micronutriments de la farine de millet perlé

La farine de millet perlé a été analysée pour sa teneur en minéraux conformément aux méthodes officielles de l'Association of Official Analytical Chemists (**AOAC, 2010**).

Mode opératoire

La teneur en minéraux (Ca, Na, Mg, K, P, Zn, Fe, Cu) a été déterminée par spectroscopie d'absorption atomique après solubilisation des cendres de 1g de farine en milieu acide. Les cendres sont traitées avec 10mL d'acide chlorhydrique puis complétées avec 100 mL d'eau. L'appareil utilisé est un spectromètre d'absorption atomique AAS 1100 (PerkinElmer, USA) alimenté par une flamme airacétylène.

Pour l'extraction du Ca et du Mg, on ajoute 10mL de chlorure de lanthane (18g d'oxyde de lanthane + 250 mL d'HCl concentré dans 100 mL d'eau distillée) avant de compléter la fiole jusqu'au trait de jauge avec de l'eau distillée.

III.2.2. Préparation de l'extrait

- Extrait hydro-éthanolique

L'extraction a été réalisée suivant la méthode de **Xiang et al. (2019)** légèrement modifiée par nous-mêmes (**figure 5**). Brièvement, 1g de grains de millet perlé broyés ont été mis dans 20 ml de mélange hydro-alcoolique (80% éthanol et 20% eau distillée). Le mélange est agité pendant 48h à l'obscurité. Ensuite, il subit une filtration sous-vide donnant à la fin un précipité. Par la suite, ce précipité est soumis à une évaporation rotative à 40 °C donnant l'extrait hydro-éthanolique.

- Extrait hydrolique

L'eau distillée sert à 100% comme solvant et le même protocole de **Xiang et al. (2019)** est suivi.

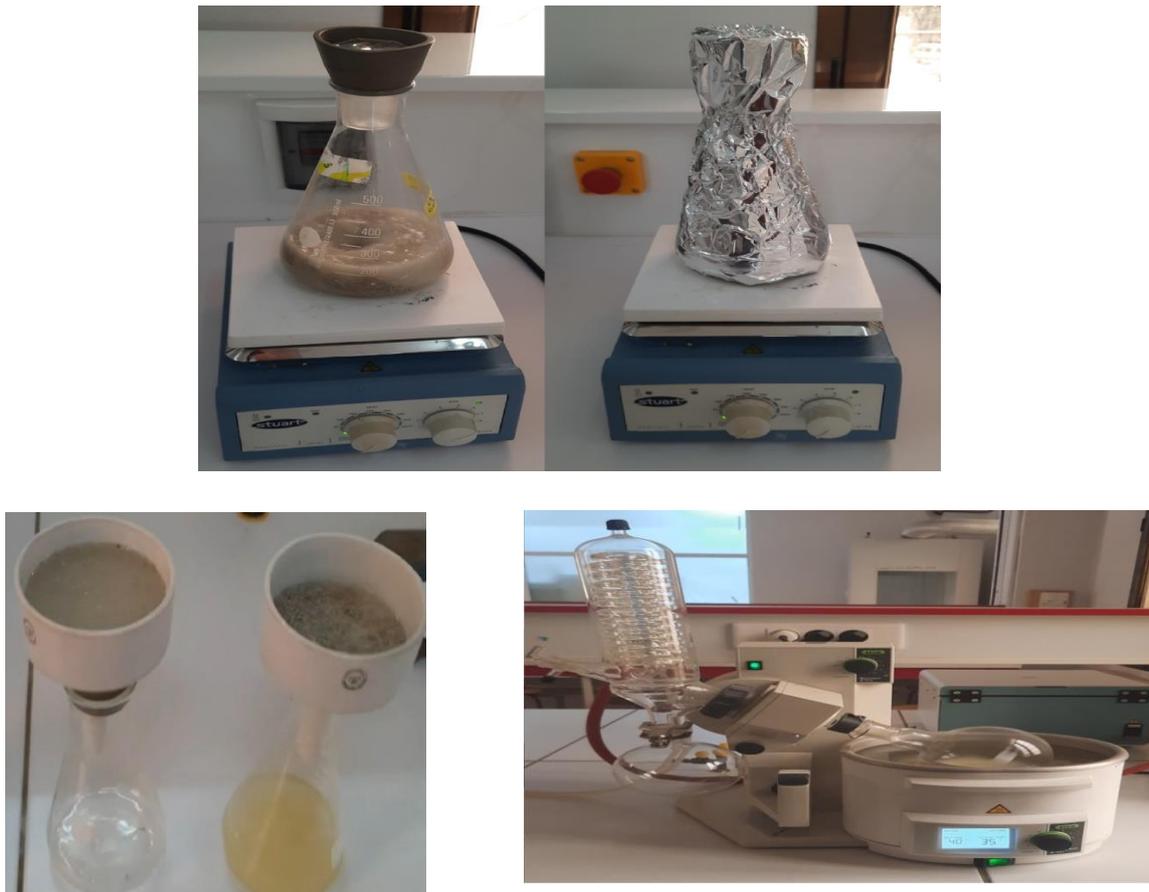


Figure 5 : Les différentes étapes de l'extraction des composants actifs de millet perlé.

III.2.3. Analyses phyto-chimique de la farine de millet perlé

Le test phyto-chimique consiste à la détection des différentes familles de métabolites secondaires existant dans la partie étudiée de la plante par des réactions qualitatives de caractérisation. La phytochimie qualitative est basée sur des réactions colorées ou la visualisation de précipitations résultant de l'ajout de réactifs chimiques spécifiques sur les extraits (**Ghedadba et al., 2015**).

- Les flavonoïdes

1-Prendre une goutte de HCL et une goutte de magnésium.

2-Ajouter les à 1ml de l'extrait de grains de millet perlé.

3- La présence de couleur jaune indique la présence de flavonoïdes dans l'extrait.

- **Les Tannins**

1-Prendre une goutte de FeCl₃ 1%.

2-Ajouter 2 ml d'extrait.

3-L'aspect bleu foncé, noir ou vert foncé confirme la présence de tannins dans l'extrait.

- **Les Saponines**

1-Mettre 10 ml d'eau distillée dans un bécher.

2-Ajouter 5 ml d'extrait, puis agiter pendant 15 secondes.

3-Laisser reposer dans une burette pendant 15 minutes.

4-Une hauteur de mousse persistante, supérieure à 1 cm indique la présence de saponosides.

- **Les quinones libres**

1-Prendre une goutte de NaOH.

2-Ajouter un volume d'extrait.

3-Une couleur violette indique la présence des quinones.

- **Les terpénoïdes libres**

1-Prendre 5ml d'extrait.

2-Ajouter 2 ml de chloroforme et 3 ml d'acide sulfurique, puis laisser réagir quelques secondes.

3-Remarquer la formation de deux phases. Celle de couleur marron indique la présence de terpénoïdes dans l'extrait de plante.

- **Les alcaloïdes**

1-Ajouter 1ml de HCl à 1ml d'extrait.

2-Chauffer le contenu dans un bain-Marie pendant 15 min.

3-L'apparition d'un précipité blanc confirme la présence d'alcaloïdes dans l'extrait.

III.2.4. Dosage des composés phénoliques

III.2.4.1. Dosage des Polyphénols totaux

La méthode décrite par **Bhatt et al. (2020)** a été suivie.

Mode opératoire

1-Prendre une prise de l'extrait et la diluer 10 fois (1 mg/ml), puis mélanger avec 500 µl du réactif de Folin-Ciocalteu. Agiter le mélange, puis laisser reposer de 4 min.

2-Additionner une prise de 100 µl de bicarbonate de Na sursaturée à 7%. Compléter à 25 ml à l'eau distillée

3-Après incubation 30 min/25°C à l'obscurité, la lecture de l'absorbance est effectuée à une longueur d'onde de 730 nm.

4-Préparer une gamme étalon avec l'acide gallique à des concentrations allant de 30 à 500 mg. Suivre les mêmes étapes.

La teneur en polyphénols est exprimée en mg d'équivalent acide gallique par gramme de matière sèche (mg EAG/g MS).

III.2.4.2. Dosage des Flavonoïdes

La méthode décrite par **Bhatt et al. (2020)** a été suivie.

Mode opératoire

1-Diluer 1 ml de chaque extrait 5 fois (1 mg/ml) puis 60 µl nitrite de sodium (5%) et 60 µl de chlorure d'aluminium ($AlCl_3 \cdot 6H_2O$, 10%).

2-Laisser le mélange reposer 5 min à une température ambiante. Puis ajoutez 400 µl de NaOH (1M).

3-Ajuster avec l'eau distillée à un volume final de 10 ml.

4-Faire la lecture de l'absorbance à 730 nm.

5-Préparer la gamme étalon avec la catéchine à des concentrations croissantes allant de 0 à 20 mg.

Expression des résultats

Le teneur en flavonoïdes est exprimée en mg d'équivalent catéchine par gramme de matière sèche (mg EC/g MS).

III.2.4.3. Dosage des Tanin condensés

Principe

Cette méthode dépend de la réaction de la vanilline avec le groupement flavonoïde terminal des tanins condensés et la formation de complexes rouges, cela s'explique par la propriété des tanins à se transformer en anthocyanidols de couleur rouge par réaction avec la vanilline. La teneur en tanins condensés a été déterminée par la méthode de vanilline décrite par (Julkunen-Titto, 1985).

Mode opératoire

1-Ajouter 50 µl de chaque extrait à 1500 µl de la solution vanilline/éthanol à 4%, puis mélanger vigoureusement.

2-Additionner un volume de 750 µl d'acide chlorhydrique concentré (HCl). Laisser réagir à température ambiante pendant 20 min.

3-Mesurer l'absorbance à 550 nm contre un blanc.

Expression des résultats

Différentes concentrations comprises entre 0 et 1000 µg/ml préparées à partir d'une solution mère de la catéchine, permettront de tracer la courbe d'étalonnage.

III.2.5. Activité antioxydante

III.2.5.1. Essai de piégeage des radicaux libres par le 2,2-diphényl-1-picrylhydrazil (DPPH)

Principe

Le DPPH est l'un des principaux tests utilisés pour évaluer l'activité antioxydante du matériel végétal employé dans cette étude. Le test a été réalisé selon la méthode décrite par **Abdelfatah (2019)**.

Mode opératoire

1-Une gamme de concentrations (0-200 µg/ml) d'extrait ou de la Quercétine (antioxydant de référence) est préparée dans le méthanol.

2-Un volume de 2.5 ml de cette solution, est mélangé à 2.5 ml de DPPH (100 µM) préparé également dans le méthanol.

3-Après homogénéisation, le mélange est incubé à la température ambiante (25 °C) à l'abri de la lumière.

4-Après 15 minutes d'incubation, l'absorbance est lue à 517 nm contre un « blanc » qui ne contient que du méthanol.

Le pourcentage d'inhibition du radical DPPH est calculé selon l'équation suivante :

$$\text{Inhibition du DPPH (\%)} = (1 - (\text{DO essai} / \text{DO blanc})) \times 100$$

III.2.5.2 Activité de piégeage du peroxyde d'hydrogène

Principe

Test FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) ou le pouvoir réducteur des radicaux libres est déterminé par la méthode de FRAP (Bassène, 2012).

Mode opératoire

1-Mélanger 0.4 ml d'échantillon à différentes concentrations avec 1 ml de tampon phosphate (0.2M, pH= 6,6) et 1 ml d'hexacyanoferrate de potassium $[\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6]$ à 1 %, puis incuber le mélange à 50°C pendant 30 minutes.

2-Ajouter 1ml d'acide trichloracétique 10% puis centrifuger les tubes à 3000 tours/mn pendant 10 minutes.

3-Mélanger 1ml du surnageant de chaque tube avec 0.2 ml de solution de FeCl_3 à 0.1% et laisser au repos à l'abri de la lumière pendant 30 minutes avant de mesurer les absorbances à 700 nm.

Expression des résultats

L'activité antioxydante liée au pouvoir réducteur des extraits est exprimée en Pouvoir Réducteur (PR) qui est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$PR = 100 (Aa - Ab) / Aa$$

Aa : absorbance de l'extrait

Ab : absorbance du blanc

III.2.6. Evaluation de l'activité anti-inflammatoire *in vitro*

Afin d'évaluer l'activité anti inflammatoire d'extraits de millet perlé, nous avons utilisé le test d'inhibition de la dénaturation thermique des protéines, décrit par **Kandikattu (2013)**. Le principe consiste à estimer l'action inhibitrice des constituants bioactifs de millet perlé sur le phénomène de dénaturation de la protéine sérum albumine bovine (BSA) provoquée par la chaleur.

Mode opératoire

L'activité anti-inflammatoire *in vitro* des extraits de plantes a été étudiée en utilisant le test de dénaturation des protéines de l'albumine de sérum bovin (BSA) selon **Kandikattu et al. (2013)** avec de légères modifications. Pour 0.5 ml de chaque concentration d'extrait ou standard (voltarène 75 mg), 0.5 ml de solution de BSA (0,2%) préparée dans du Tris tampon (pH 6,8) a été ajouté. Les échantillons ont été incubés à l'étuve à 37 °C pendant 15 min, puis plongés dans un bain-marie à 72 °C pendant 5 min. Après refroidissement des tubes, la turbidité (niveau de précipitation des protéines) a été mesurée à 660 nm par un spectrophotomètre.

Expression des résultats

Le pourcentage d'inhibition de la dénaturation des protéines a été calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$\%I = (\text{témoin} - (\text{échantillon} - \text{blanc})) / \text{témoin} \times 100$$

- Echantillon : 0.5 ml d'extrait + 0.5 ml de BSA

- Blanc : 0.5 ml d'extrait + 0.5 ml de Tris-phosphate (pH : 6,8).

- Témoin : 0.5 H₂O + 0.5 ml BSA

Le contrôle représente 100% des protéines dénaturées ; et les résultats sont comparés avec 75 mg de voltarène. Les résultats seront rapportés sous forme de valeurs IC50 (concentration requise pour une inhibition de 50 %).

CHAPITRE IV

RESULTATS ET DISCUSSION

Chapitre IV: Résultats et discussion.

IV.1. Extraction

La préparation d'extrait à partir des grains de millet perlé broyés a permis d'obtenir deux types d'extraits éthanolique et aqueux. Après extraction et récupération de l'extrait, le rendement, la couleur et l'aspect physique étaient déterminés et représentés dans le tableau 3 suivant :

Tableau 3 : Caractéristiques des deux extraits de Millet perlé.

Extrait	Aspect	Couleur	Rendement
Éthanolique	Pâteux	Blanchâtre	13.8%
Aqueux	Poudreux	Blanchâtre	2.4%

Il s'avère que l'éthanol associé à l'eau dans un rapport 80/20 permet d'extraire plus de composants bioactifs comparé à l'eau seule comme solvant.

IV.2. Screening phyto-chimique

Le screening phyto-chimique a permis de mettre en évidence la présence de composés bioactifs dans la farine issue de grains de Millet perlé. La détection de ces composés chimiques est basée sur des essais de solubilités des constituants, des réactions de précipitation, de turbidité et d'observation visuelle d'un changement de couleur spécifique. Selon leur intensité, les réactions qui peuvent se produire sont classées de : négative (-) jusqu'à franchement positive (+++).

Ainsi :

- ✓ Une réaction franchement positive est représentée par : +++
- ✓ Une réaction moyennement positive est représentée par : ++
- ✓ Une réaction faiblement positive est représentée par : +
- ✓ L'absence de la substance est représentée par : -

Tableau 4 : Résultats des réactions de caractérisation des principaux métabolites secondaires contenus dans les grains de millet perlé.

Métabolites secondaires	Extrait éthanolique	Extrait aqueux
Flavonoïdes	+++	+
Tannins	+++	++
Saponines	+++	+
Quinones libres	+++	++
Terpénoïdes libres	+++	+
Alcaloïdes	+++	+++
Oses et holosides	+	-
Composés réducteurs	+	-

Les résultats obtenus (tableau 4) dévoilent la richesse des grains de Millet perlé d'un point de vue qualitatif en métabolites secondaires. Ceci a été aussi souligné par **Kumar et al. (2022)** et **Xin Ren et al. (2018)**.

Les métabolites secondaires décelées au niveau des différentes plantes sont liés à la différence de l'origine, à la période de la récolte, à la nature du sol ou aux facteurs climatiques (**Daddona et al., 1976 ; Manolaraki, 2011**).

Les millets ont un potentiel de protection contre les maladies dégénératives liées à l'âge. La consommation de millet réduit le risque de maladies cardiaques, protège du diabète, améliore le système digestif, diminue le risque de cancer, détoxifie l'organisme, renforce l'immunité et la santé respiratoire, augmente les niveaux d'énergie et améliore les systèmes musculaire et nerveux (**Manach et al., 2005 ; Scalbert et al., 2005 ; Chandrasekara et Shahidi, 2012**). Les nutriments importants présents dans les millets comprennent l'amidon résistant, les oligosaccharides, les lipides, les antioxydants tels que les acides phénoliques, les flavonoïdes, les lignanes et les phytostérols, qui seraient responsables de nombreux avantages pour la santé (**Miller, 2001 ; Edge et al., 2005**). Les tanins permettent de lutter contre les infections et de

drainer les sécrétions excessives comme les diarrhées. Certains alcaloïdes renforcent l'activité cardiaque, excitent le système nerveux central, les nerfs sympathiques et stimulent la circulation sanguine (**Lazurevskii et al., 1966**). D'autres effets pharmacologiques sont attribués également aux alcaloïdes telles que l'effet analgésique (cocaïne), anti-cholinergique (atropine), anti-malaria (quinine), antihypertensive (réserpine), antitussive (codéine), stimulant centrale (caféine), dépressant cardiaque et diurétique narcotique (morphine), anti-tumeur et sympathomimétique (éphédrine) (**Nowitz et Bottet, 2000 ; Badiaga, 2011**). Les polyphénols possèdent un effet de rétention du potassium ; ils manifestent donc une activité diurétique (**N'guessan et al., 2009**). Les saponosides ont un effet cicatrisant, antifongique, antimycosique, anti-inflammatoire et antihelminthiques (**Kansole, 2009 ; N'guessan et al., 2009**). Quant aux stéroïdes et polyterpènes, ils ont des propriétés bactéricides (**N'guessan et al., 2009**), et permettent de lutter contre les inflammations. Tandis que, les holosides peuvent avoir des effets hémostatiques.

IV.3. Composition de grains de millet perlé

Sur le plan nutritionnel, la valeur énergétique, la teneur en protéines et en macronutriments des millets est comparable à celle des autres céréales. Les protéines des millets sont en concentration comparable et parfois supérieure à celles des céréales conventionnelles. Les millets contribuent de manière significative à l'alimentation humaine et animale en raison de leurs niveaux élevés d'énergie, de calcium, de fer, de zinc, de lipides et de protéines, d'énergie, de calcium, de fer, de zinc, de lipides et de protéines de haute qualité. En outre, ils sont également riches en fibres alimentaires et de micronutriments.

Tableau 5: Analyse de la composition en macronutriments de grains de millet perlé (g/100 g).

Nutriment	Poids en g/100g
- Humidité	14.05
- Protéines	9.85
- Matière grasse	3.6
- Glucide	75.49
- Fibres	15.5
- Energie brute (MJ/kg)	14.4

Les millets ne sont pas seulement comparables aux principales céréales en ce qui concerne leurs caractéristiques nutritionnelles mais sont de très bonnes sources de glucides, de micronutriments et de substances phytochimiques ayant des propriétés nutraceutiques.

L'analyse des macronutriments (tableau 5) du millet perlé étudié dans ce travail a révélé qu'il contient 9.8% de protéines, 3.6% de lipides, 75% de glucides et 15.5% de fibres alimentaires. Parmi les différents types de millet, le millet perlé contient les proportions considérablement élevées de protéines (12-16%) ainsi que de lipides (4-6%).

Les profils d'acides aminés essentiels des protéines du millet sont meilleurs que ceux du maïs. La teneur en niacine du millet perlé est supérieure à celle de toutes les autres céréales. autres céréales, tandis que les protéines du millet sont uniques en raison de leur teneur en acides aminés riches en soufre (**Hadimani et Malleshi, 1993; Hegde et Chandra, 2005**).

Comme toutes les protéines des céréales, les protéines de millet sont des sources pauvres de lysine, mais elles se complètent bien avec les protéines végétales des légumineuses et celles animales riches en lysine pour former des composites nutritionnellement équilibrés.

Le millet perlé contenait de bonnes concentrations en électrolytes indispensables et est considéré plus nutritif que les céréales fines. Notre millet perlé analysé (tableau 6) était surtout riche en calcium (222 mg/100 g), en phosphore (272 mg/100 g) et magnésium (158 mg/100 g).

Tableau 6 : Analyse de la composition en micronutriments de grains de millet perlé (g/100 g)

Nutriment	Poids en mg/100g
- Zinc	2.4
- Fer	9.98
- Cuivre	0.56
- Phosphore	272
- Potassium	399
- Magnésium	158
- Calcium	221.9
- Sodium	26.12

IV.4. Teneur en polyphénols totaux

Le dosage des phénols totaux a été effectué par la méthode spectrophotométrique d'Abdeelfatah (2019) avec le réactif de Folin-Ciocalteu.

Afin de caractériser l'extrait préparé à partir des grains de millets, la quantification des composés phénoliques a été faite en fonction d'une courbe d'étalonnage linéaire ($y= ax+b$) réalisée par une solution étalon d'acide gallique à différentes concentrations (Figure 4). La quantité des polyphénols correspondante à l'extrait étudié a été rapportée en milligramme équivalent d'acide gallique par milligramme d'extrait.

Le résultat obtenu indique que la quantité des composés phénoliques est de 2.69 mg EQ d'acide gallique/mg d'extrait (figure 5). La teneur en polyphénols est relativement élevée dans notre extrait

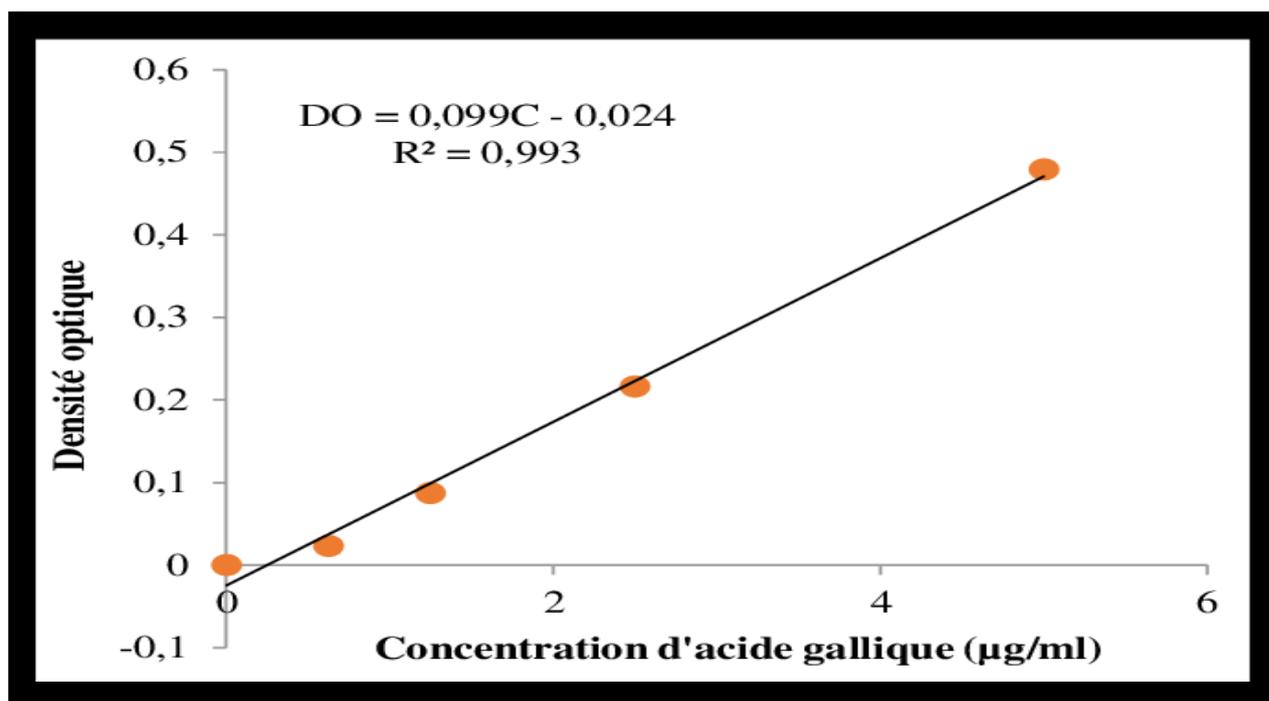


Figure 6 : Courbe d'étalonnage à l'acide gallique.

Le résultat que nous avons obtenu est presque identique à celui obtenu par **Meng Zhang et al. (2021)** qui ont trouvé un teneur égale à 2.98 mg GAE/mg d'extrait.

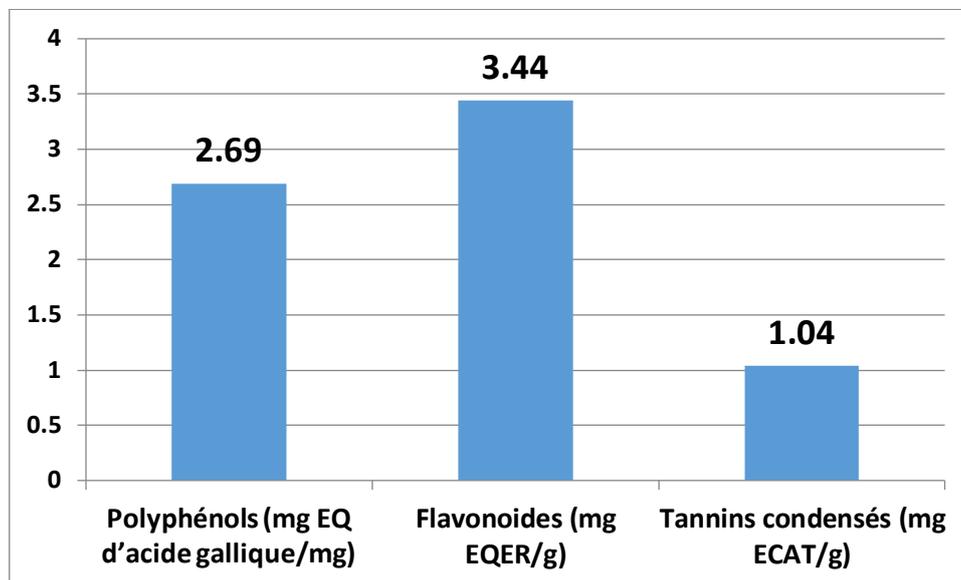


Figure 7 : Les teneurs en différents composé phénolique du millet perlé analysé.

IV.5. Teneur en flavonoïdes

Le dosage des flavonoïdes a été réalisé selon la méthode au trichlorure d'aluminium ($AlCl_3$). La quercétine a été utilisée comme étalon (figure 6). L'absorbance a été lue dans une longueur d'onde de 430 nm. Les résultats obtenus sont représentés dans une courbe d'étalonnage dont on a calculé la teneur en flavonoïdes de l'extrait éthanolique qui est exprimée en mg équivalent quercétine (EQ) par gramme d'extrait.

La teneur en flavonoïdes de l'extrait de millet perlé étudié est égale à 3.44 mg EQER/g d'extrait (figure 5). Les résultats obtenus (3.3 mg EQER/g d'extrait) par **Nadiah et al. (2022)** sont identiques à la valeur trouvée et nous permettent de confirmer la richesse de millet perlé en flavonoïdes.

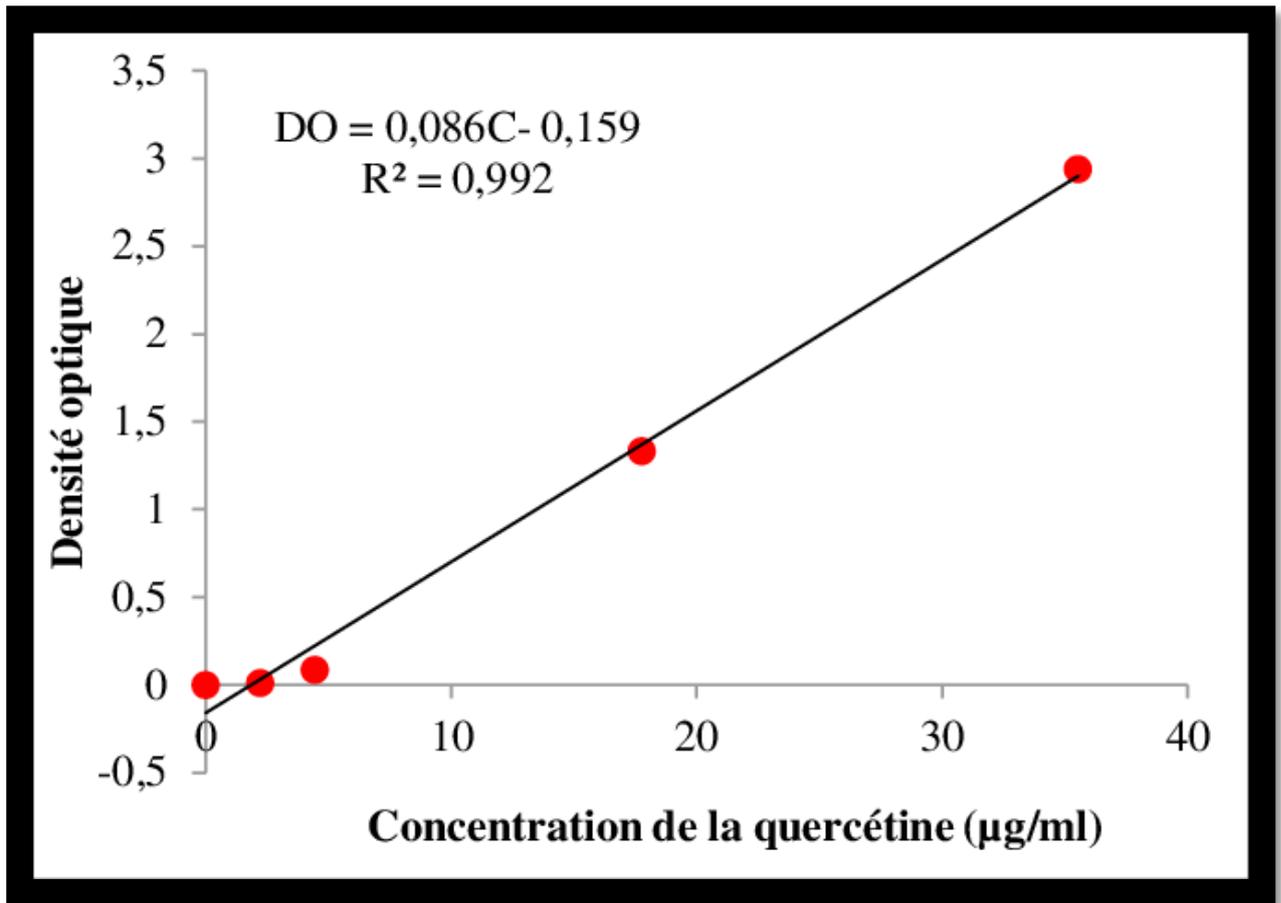


Figure 8 : Courbe d'étalonnage à la quercétine.

VI.6. Teneur en tannins condensés

Le dosage des tannins condensés a été réalisé selon la méthode à la vanilline. La teneur en tannins de l'extrait de millet perlé étudiée est égale à 1.04 mg ECAT/g d'extrait (figure 5), calculée à partir de la courbe d'étalonnage à la catéchine (figure 7). Les résultats obtenus par Nadiah et al. (2022) sont comparables (0.98 mg ECAT/g) à notre résultat et confirment la richesse de la plante étudiée en tannins condensés.

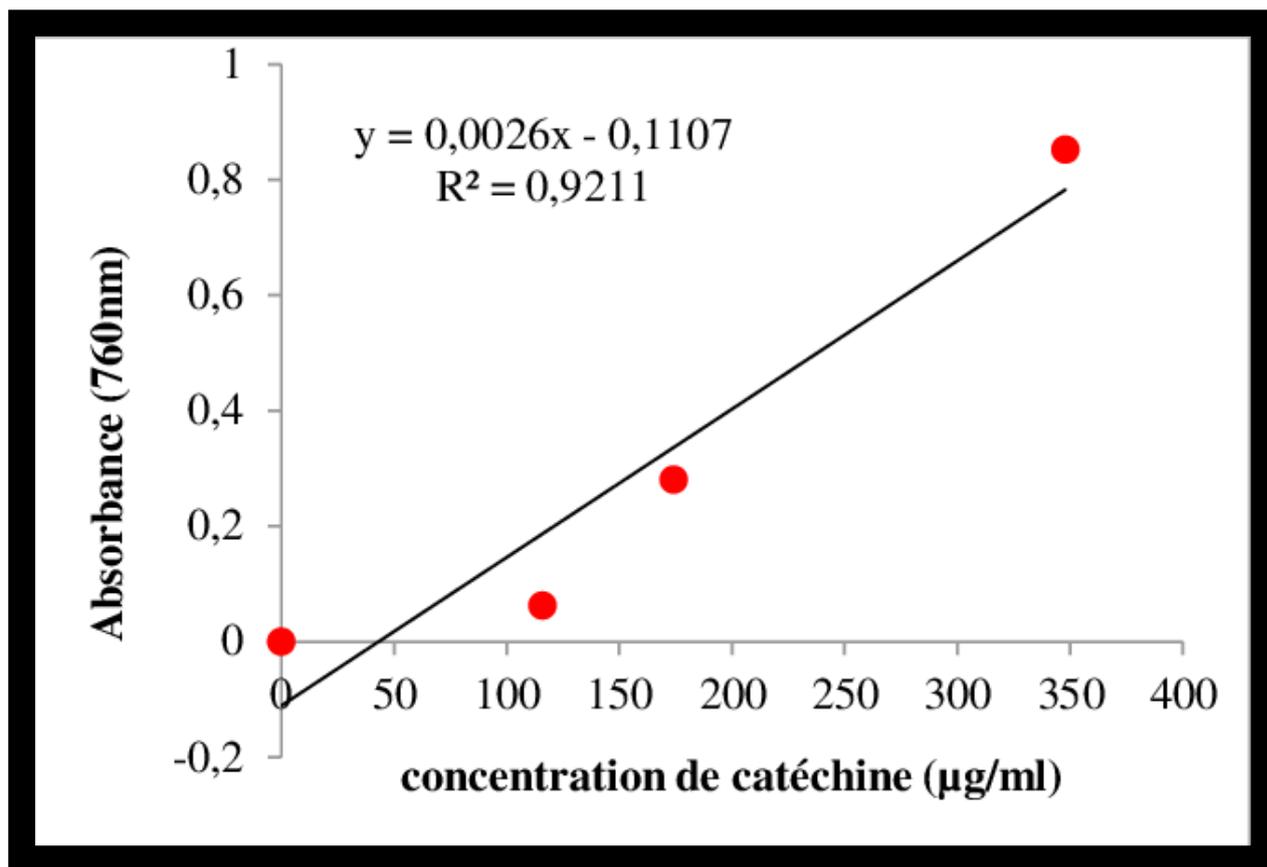


Figure 9: Courbe d'étalonnage à la catéchine.

IV.7. Etude de l'activité antioxydante

IV.7.1. Test de piégeage du radical libre DPPH

L'activité antioxydante de l'extrait éthanolique de grains de millet perlé et de l'antioxydant standard (acide ascorbique) vis-à-vis du radical DPPH a été évaluée à l'aide d'un spectrophotomètre en suivant la réduction de ce radical qui s'accompagne par son passage de la couleur violette (DPPH*) à la couleur jaune (DPPH-H) mesurable à 717 nm. Cette capacité de réduction est déterminée par une diminution de l'absorbance induite par des substances anti-radicalaires. Les résultats obtenus sont exprimés dans la figure 8.

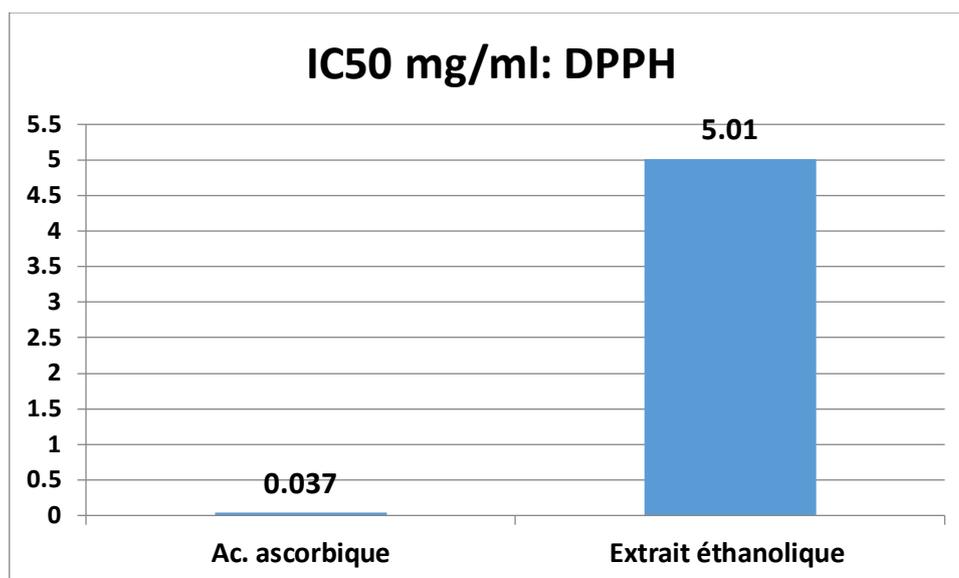


Figure 10 : Pourcentage d'inhibition du radicale libre IC50% de l'extrait éthanolique de millet perlé comparé à l'ac. ascorbique selon la méthode DPPH.

Les résultats présentés dans la figure 7 ci-dessus, montrent que l'extrait de millet perlé testé possède une activité anti-radicalaire DPPH avec un IC50% de l'ordre de 5.01 mg/ml. En comparaison avec l'antioxydant standard (l'Acide ascorbique) qui démontre un IC50%=0,037 mg/ml. Nous constatons que notre extrait possède une activité antioxydante de 135% de moins par rapport au standard.

Les grains de millets ont fait l'objet de nombreux travaux dont les résultats sont variables. Dans les travaux de **Meng et al. (2021)** sur le millet, une valeur d'IC50% à raison de 4.63mg/ml a été enregistrée. Cette variabilité de valeurs entre notre résultat et la littérature pourrait être due aux impacts des facteurs environnementaux sur la composition chimique de l'extrait ainsi que sur leurs activités biologiques.

IV.7.1. Test de la réduction du fer (FRAP)

La présence des réducteurs dans les extraits de plantes provoque la réduction de Fe³⁺/complexe ferricyanide à la forme ferreux. Par conséquent, le Fe²⁺ peut être évalué en mesurant et en surveillant l'augmentation de la densité de la couleur bleu dans le milieu réactionnel à 700 nm. Les résultats obtenus dans la figure 9 montrent que la capacité de la réduction est proportionnelle à l'augmentation de la concentration des échantillons. L'extrait de la plante présente une activité antioxydante nettement inférieure à celle du produit de référence l'ascorbique. Nos résultats sont en accord avec ceux trouvés par **Meng et al. (2021)**.

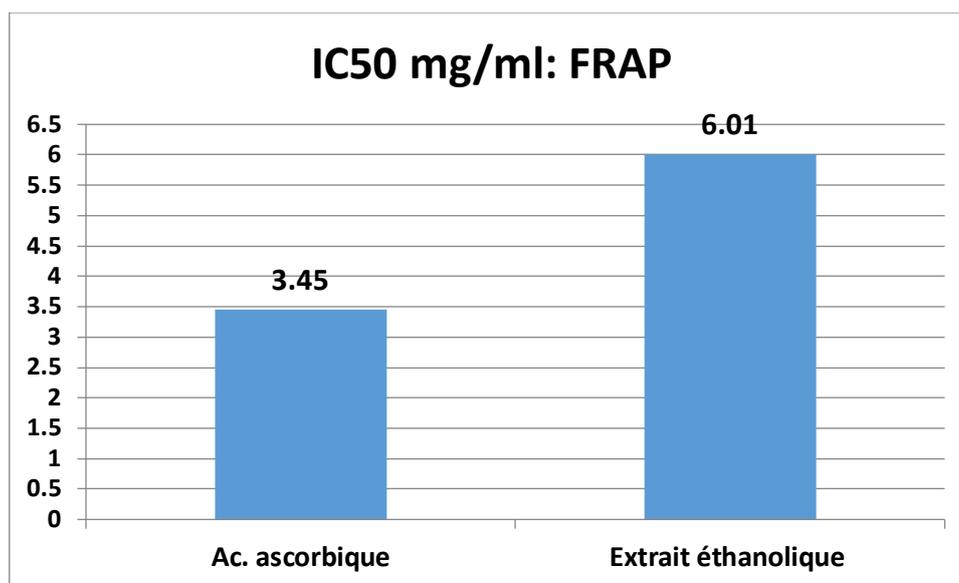


Figure 11 : Pourcentage d'inhibition du radicale libre IC50% de l'extrait éthanologique de millet perlé comparé à l'ac. ascorbique selon la méthode FRAP.

IV.8. Etude de l'activité anti-inflammatoire (in vitro)

Le test de dénaturation des protéines in vitro a donné les résultats résumés dans le tableau 7. Cette activité anti-inflammatoire in vitro de l'extrait éthanologique de grains de millet perlé consiste à évaluer les pourcentages d'inhibition de la dénaturation de la sérum albumine bovine (BSA).

Tableau 7: Effet anti-inflammatoire de l'extrait éthanologique de Millet perlé in vitro comparé à la diclofénac.

	Extrait éthanologique	Diclofenac
Concentration (µg/ml)	1000	1000
% d'inhibition	32.5	120.9
IC50	866	478

Le pourcentage d'inhibition de la dénaturation de la SBA par l'extrait éthanologique de millet perlé était jugé satisfaisant avec une inhibition égale à 32,5%.

Les résultats obtenus de l'IC50 pour cet extrait sont 1/2 fois plus faibles comparés à ceux obtenus pour le diclofenac, un médicament anti-inflammatoire utilisé comme standard.

La dénaturation des protéines est parmi les causes de l'inflammation (**Bagad et al., 2011**). La production d'auto-antigènes dans les maladies inflammatoires peut être due à la dénaturation des protéines *in vivo*. Le mécanisme possible de la dénaturation consiste à l'altération des liaisons électrostatique, hydrogène, hydrophobe et disulfure qui maintient la structure tridimensionnelle des protéines (**Barros et al., 2008**).

Beaucoup de plantes possèdent une activité anti-inflammatoire satisfaisante à cause de certaines de leurs molécules bioactives comme les polysaccharides, l'ergostérol et les polyphénols qui inhibent la production de l'oxyde nitrique (NO) (**Gunawardena et al., 2014**).

D'après les résultats, on constate que notre extrait est capable de contrôler la production d'auto-antigène par l'inhibition de la dénaturation des protéines.

CONCLUSION

Conclusion

La présente étude s'intéresse à étudier les qualités nutritionnelles du millet perlé en explorant sa composition physico-chimique et en réalisant une étude préliminaire des vertus antioxydante et antiinflammatoire de ses composants actifs. Une telle exploration a été faite suivant une extraction avec l'éthanol (80v éthanol/ 20v eau)

Tout d'abord, nous avons réalisé un screening phytochimique de sa farine. Cette analyse nous a permis d'avoir un aperçu général de la nature des différents constituants que l'on peut rencontrer dans ces grains de millet en mettant en évidence quelques classes de molécules notamment : les polyphénols, les flavonoides, les tannins et des molécules anti-oxydantes qui ont été révélés par des réactifs spécifiques.

L'analyse des macronutriments du millet perlé étudié dans ce travail a révélé qu'il contient 9.8% de protéines, 3.6% de lipides, 75% de glucides et 15.5% de fibres alimentaires. Le millet perlé contenait de bonnes concentrations en électrolytes indispensables et est considéré plus nutritif que les céréales fines. Notre millet perlé analysé était surtout riche en calcium (222 mg/100 g), en phosphore (272 mg/100 g) et magnésium (158 mg/100 g).

Le résultat obtenu indique que la quantité des composés phénoliques est de 2.69 mg Eq d'acide gallique/mg d'extrait en termes de polyphénols totaux, en flavonoïdes était égale à 3.44 mg Eq QER/g d'extrait et celle des tannins condensés à 1.04 mg Eq CAT/g d'extrait.

L'extraction éthanolique a été comparée à celle à l'eau dans le but de choisir le bon solvant permettant d'évaluer les activités antioxydantes et antiinflammatoires.

L'évaluation du pouvoir anti-radicalaire de l'extrait par les méthodes de DPPH et FRAP a montré que dans l'ensemble, l'extrait avait une activité antioxydante modérée, mais plus prononcée en termes de l'IC50%. Ceci donne l'impression que cet extrait renferme de puissants composés actifs capables de réduire les radicaux libres, puisqu'ils agissent à des plus ou moins faibles concentrations.

Des travaux supplémentaires utilisant d'autres approches in vivo, permettraient d'examiner en profondeur le potentiel des extraits à réduire les radicaux libres impliqués dans le stress oxydatif.

L'activité antiinflammatoire de l'extrait éthanolique du millet perlé a révélé un pourcentage d'inhibition de la dénaturation de la SBA jugé satisfaisant avec une inhibition égale à 32,5%.

CONCLUSION

Les résultats obtenus de l'IC50 pour cet extrait était en fait, 1/2 fois plus faibles comparés à ceux obtenus pour le diclofenac, un médicament anti-inflammatoire utilisé comme standard.

Le millet perlé est un grain largement utilisé dans la cuisine algérienne traditionnelle. Le consommer seul ou à côté d'un régime alimentaire sain, pourrait aider à lutter contre les carences nutritionnelles vue sa riche composition en macro et micronutriments, mais aussi contribuer à gérer naturellement les phénomènes oxydants grâce à ses composants bioactifs antioxydants et antiinflammatoires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A

Adebiyi, Janet Adeyinka, Obadina, A. O., Adebo, O. A., & Kayitesi, E. (2017). Comparison of nutritional quality and sensory acceptability of biscuits obtained from native, fermented, and malted pearl millet (*Pennisetum glaucum*) flour. *Food Chemistry*, 232, 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.020>.

Agrahar-Murugkar, D. (2020). Food to food fortification of breads and biscuits with herbs, spices, millets and oilseeds on bio-accessibility of calcium, iron and zinc and impact of proteins, fat and phenolics. *LWT*, 130, Article 109703. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109703>

Anonyme (2022). Analyse de la chaîne de valeur du millet - Croissance, tendances, impact du COVID-19 et prévisions (2021 - 2026). <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/millets-trade-analysis>. Accès le 24/5/2022.

B

Bhatt, S., B. Singh, M. Gupta. Antioxidant and prebiotic potential of *Murraya koenigii* and *Brassica oleracea* var. botrytis leaves as food ingredient. *Journal of Agriculture and Food Research*, (2) (2020), <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2020.100069>

Bora, P., Ragaee, S., & Marcone, M. (2019). Effect of parboiling on decortication yield of millet grains and phenolic acids and in vitro digestibility of selected millet products. *Food Chemistry*, 274, 718–725. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.010>.

C

Curti, E., Carini, E., Tribuzio, G., & Vittadini, E. (2014). Bread staling: Effect of gluten on physico-chemical properties and molecular mobility. *LWT - Food Science and Technology*, 59(1), 418–425. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.04.057>.

D

Deshpande, S. S., & Cheryan, M. (1984). Effects of Phytic Acid, Divalent Cations, and Their Interactions on α -Amylase Activity. *Journal of Food Science*, 49(2), 516–519. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1984.tb12456.x>.

F

FAO (2021). Rapport spécial de SMIAR - Système mondial d'information et d'alerte rapide sur l'alimentation et l'agriculture. <https://www.fao.org/giews/reports/special-reports/fr/>. Accès le 24/5/2022

FAO Cereal Supply and Demand Brief World Food Situation Food and Agriculture Organization of the United Nations. (n.d.). Retrieved March 26, 2020, from <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/en/>.

G

Ghedadba, N., Hambaba, L., Ayachi, A., Aberkane, M. C., Bousselsela, H., & Oued-Mokhtar, S. M. (2015). Polyphénols totaux, activités antioxydante et antimicrobienne des extraits des feuilles de Marrubium deserti de Noé. *Phytothérapie*, 13(2), 118-129.

Govindan A. & C. Russell 2003. India Grain and Feed Annual 2003. USDA, Global Agriculture Information Network, Foreign Agricultural Service, GAIN Report # IN 3012: 23 pp.

Guan, H., Zhang, W., Sun-Waterhouse, D., Jiang, Y., Li, F., Waterhouse, G. I. N., & Li, D. (2021). Phenolic-protein interactions in foods and post ingestion: Switches empowering health outcomes. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.033>

Gunawardena D, Shanmugam K, Govindaraghavan S, Low M, Bennett L, Head R, Ooi L, Munch G. Determination of anti-inflammatory activities of standardised preparations of plant- and mushroom-based foods. *European Journal of Nutrition*. 2014;53(1):335—343.

H

Hunt HV, Campana MG, Lawes MC, Park Y-J, Bower MA, Howe CJ, Jones MK. 2011. Genetic diversity and phylogeography of broomcorn millet (*Panicum miliaceum* L.) across Eurasia. *Molecular Ecology* 20, 4756–4771.

J

Jalaja, N., Maheshwari, P., Naidu, K.R., Kavi Kishor, P.B., 2016. In vitro regeneration and optimization of conditions for transformation methods in Pearl millet, *Pennisetum glaucum* (L.). *Int. J. Clin. Biol. Sci.* 1, 34–52.

K

Kandikattu, K., Bharath Rathna Kumar, P., Venu Priya, R., Sunil Kumar, K., Ranjith Singh, B., Rathore, 2013. Evaluation of anti-inflammatory activity of canthium parviflorum by in-vitro method. *Indian J. Res. Pharm. Biotechnol.* 1 (5), 729–730.

Kumar, A., Tomer, V., Kaur, A., Kumar, V., & Gupta, K. (2018). Millets: A solution to agrarian and nutritional challenges. *Agriculture and Food Security*, 7(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0183-3>.

Kumar, R.R., Singh, N., Singh, S., et al., 2022. Nutritional supremacy of pearl- and foxtail millets: assessing the nutrient density, protein stability and shelf-life of flours in millets and cereals for developing nutri-stable foods. *J. Plant Biochem. Biotechnol.* <https://doi.org/10.1007/s13562-021-00761-2>.

L

Lu H, Zhang J, Liu K, et al. 2009. Earliest domestication of common millet (*Panicum miliaceum*) in East Asia extended to 10,000 years ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 106, 7367–7372.

M

Motilva, M.-J., Serra, A., & Rubi´o, L. (2015). Nutrikinetic studies of food bioactive compounds: From in vitro to in vivo approaches. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 66(sup1), S41–S52. <https://doi.org/10.3109/09637486.2015.1025721>.

N

Ndiaye, C., Martinez, M. M., Hamaker, B. R., Campanella, O. H., & Ferruzzi, M. G. (2020). Effect of edible plant materials on provitamin A stability and bioaccessibility from extruded whole pearl millet (*P. typhoides*) composite blends. *LWT*, 123, Article 109109. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109109>.

O

OMAFRA (2016). Ontario Ministère De L'agriculture, De L'alimentation Et Des Affaires Rurales. <http://omafra.gov.on.ca/french/crops/facts/96-128.htm>. Accès le 25/5/2022.

Oumar, I., Mariac, C., Pham, J.L., et al., 2008. Phylogeny and origin of pearl millet (*Pennisetum glaucum* [L.] R. Br) as revealed by microsatellite loci. *Theor. Appl. Genet.* 117, 489–497. <https://doi.org/10.1007/s00122-008-0793-4>.

P

Putseys, J. A., Derde, L. J., Lamberts, L., Goesaert, H., & Delcour, J. A. (2009). Production of tailor made short chain amylose–lipid complexes using varying reaction conditions. *Carbohydrate Polymers*, 78(4), 854–861. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.07.002>.

R

Rahal-Bouziane, H. (2008). Evaluation de la variabilité génétique chez quelques mils penicillaires (*Pennisetum glaucum* LR Br) cultivés dans les oasis de la région d'Adrar (Algérie). *Journal algérien des régions arides, Revue scientifique annuelle*, (7), 35-43.

Rude B.J., B.S. Baldwin, K.C. Hanson & D.L. Trammel 2003. Performance and nutrient utilization of steers consuming Kenaf, Pearl millet, or Bermudagrass. *Animal and Dairy Sciences*, Mississippi State University, <http://archive.msstate.edu/dept/ads/research/kenaf.html>: 3pp.

S

Sandström, B., Arvidsson, B., Cederblad, A., & Björn-Rasmussen, E. (1980). Zinc absorption from composite meals I. The significance of wheat extraction rate, zinc, calcium,

and protein content in meals based on bread. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 33(4), 739–745. <https://doi.org/10.1093/ajcn/33.4.739>

Santos, D. I., Saraiva, J. M. A., Vicente, A. A., & Moldão-Martins, M. (2019). 2—Methods for determining bioavailability and bioaccessibility of bioactive compounds and nutrients. In F. J. Barba, J. M. A. Saraiva, G. Cravotto, & J. M. Lorenzo (Eds.), *Innovative Thermal and Non-Thermal Processing, Bioaccessibility and Bioavailability of Nutrients and Bioactive Compounds* (pp. 23–54). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814174-8.00002-0>.

Sharma, B., & Gujral, H. S. (2019). Characterization of thermo-mechanical behavior of dough and starch digestibility profile of minor millet flat breads. *Journal of Cereal Science*, 90, Article 102842. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102842>

Srilekha, K., Uma Maheswari, K., Professor, M., Kamalaja, T., & Neela Rani, R. (2019). Evaluation of physical, functional and nutritional quality parameters of kodo millet flour. ~ 192 ~ *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8(4), 192–195.

T

Taylor, J. R. N., & Kruger, J. (2018). Sorghum and millets: Food and beverage nutritional attributes. In *Sorghum and Millets: AACC International Press. AACCI*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811527-5.00007-1>.

V

Vietmeyer N.D. 1996. Lost crops of Africa. National academy press Washington, D.C. volume 1, Grains: 329pp.

W

Wang, S., Wang, J., Yu, J., & Wang, S. (2016). Effect of fatty acids on functional properties of normal wheat and waxy wheat starches: A structural basis. *Food Chemistry*, 190, 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.05.086>.

Y

Yu, Y., & Liang, G. (2021). Interaction mechanism of phenolic acids and zein: A spectrofluorometric and molecular dynamics investigation. *Journal of Molecular Liquids*, 118032. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.118032>.

Z

Zhang, M., Xu, Y., Xiang, J., Zheng, B., Yuan, Y., Luo, D., & Fan, J. (2021). Comparative evaluation on phenolic profiles, antioxidant properties and α -glucosidase inhibitory effects of different milling fractions of foxtail millet. *Journal of Cereal Science*, 99, 103217.