N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbes

Faculté des sciences de la nature et de la vie

Département des sciences de l'environnement

THESE DE DOCTORAT

En Sciences de l'environnement

Option : Gestion et valorisation des ressources naturelles et développement durable

Présenté Par : **Mr SENNOUS Kouider**

Intitulé :

Evaluation de l'activité biologique du son de blé dur de quelques variétés cultivées dans la région de Sidi Bel Abbés (ouest algérien)

Devant le jury composé de :

Président	**:**	Dr. Meliani Habib	MCA	UDL Sidi Bel Abbes
Directeur de thèse	**:**	Pr. Menadi Noureddine	Professeur	UDL Sidi Bel Abbes
Co-directeur de thèse	**:**	Pr. Toumi Fawzia	Professeur	UDL Sidi Bel Abbes
Examinatrice	**:**	Pr. Megherbi Aicha	Professeur	UDL Sidi Bel Abbes
Examinateur	**:**	Pr. Bensahla Talet Lotfi	Professeur	Université d'Oran 1

Année universitaire : 2021 -2022


بسم الله الرحمن الرحيم

Dédicace

Je dédie cet humble travail avec grand amour, sincérité et fierté :

À ma Mère,

« Pour votre tendresse et votre courage qui m'ont accompagné tout au long de ma vie pour réussir. Tout ce que je peux vous offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je vous porte. En témoignage, je vous offre ce modeste travail pour vous remercier pour vos sacrifices et pour l'affection dont vous m'avez toujours entouré. »

À mon Père,

« L'épaule solide, l'œil attentif compréhensif et la personne la plus digne de mon estime et de mon respect. Aucune dédicace ne saurait exprimer mes sentiments, que Dieu vous préserve et vous procure santé et longue vie. »

À mes frères **Khaled, Cheikh** et **Amine.** À ma sœur **Zolikha** et **Maatallah Mokhtar**.

À Yassamine, Aymen Abderrahmane, Mohammed Islem, Yasser, manel, mohammed amine, Mohammed Wassim et **Sid Ahmed Adam.**

« Je vous porte toujours dans mon cœur, je vous souhaite le bonheur, la santé, le succès et de la joie. »

À ma chère famille,

« Petit ou grand, proche soit-elle ou lointaine, pour leurs soutiens, amour et générosité »

À tous mes professeurs, et tous mes amis,

« Pour leur sincérité, sacrifice et soutiens. »

Aussi à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

A l'âme de mon frère Sid Ahmed,

Remerciements

Avant tout je remercie **DIEU « Tout Puissant »** qui m'a donné la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à **Mr Pr. Menadi Noureddine,** Enseignant à la faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Djilali Liabes Sidi Bel Abbes, d'avoir accepté la direction de cette thèse, et pour l'intérêt qu'il a donné pour accomplir ce travail. Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et ma gratitude pour sa disponibilité, sa patience, ses conseils, sa compréhension, ses qualités pédagogiques et scientifiques. Veuillez trouver ici Monsieur, ma reconnaissance et tout mon respect.

Je remercie **Mme Pr. Toumi Fawzia**, enseignante à la faculté SNV d'avoir accepté la codirection de la présente thèse, qui était toujours présente afin de m'orienter et me soutenir tout au long de mon parcours. Veuillez trouver ici Madame, ma reconnaissance et tout mon respect.

Mes remerciements s'adressent à tous les **membres du jury** : **Mr Dr. Meliani Habib, Mme Pr. Megharbi Aicha** et **Mr Pr. Bensahla Talet Lotfi,** pour l'honneur qu'ils nous ont fait pour l'évaluation de ce travail de recherche.

Je remercie **Dr Benyamina Abdelfettaf** et **Dr Bouazza Sofiane** qui m'ont beaucoup aidé pour réaliser ce travail avec leurs présences, ses orientations et ses encouragements.

Je remercie tous les ingénieurs des laboratoires, plus particulièrement, **Mr Benaissa Keddar Youcef** et **Mr Mekhfi Nabil**.

En fin, mes remerciements s'adressent à toutes les personnes ayant contribuer de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Résumé

Introduction. Le blé est une excellente source en fibres alimentaires de nature insolubles. Ces fibres sont principalement concentrées dans l'enveloppe du grain qui constitue le son de blé (sous-produit obtenu après le raffinage). **L'objectif.** Le but de cette étude est d'évaluer l'activité biologique du son de blé dur (Triticum durum) de trois variétés algériennes pour sa revalorisation dans la santé humaine. **Matériels et méthodes.** Une enquête sur l'utilisation du son de blé dur dans l'alimentation humaine a été réalisée dans la région de Sidi Bel Abbes auprès de 500 sujets. L'expérimentation a été porté sur trois variétés de blé dur (Triticum durum) : Siméto, Chen's et Vitron. La macération de la poudre du son de blé dur a été réalisée avec l'éthanol à 80%. La caractérisation chimique a été réalisée par des techniques spectrophotométriques pour les composées phénoliques, et de méthodes chimiques pour le dosage des fibres alimentaires. L'activité antioxydante a été testée par quatre méthodes : piégeage des radicaux libres avec DPPH, test de FRAP (Ferric Reducing Antioxydants Power), test de blanchissement du β-carotène et l'effet chélateur des ions ferreux (FIC), et l'effet antibactérien a été mesuré par la méthode des disques par diffusion sur milieu gélosé. **Résultats.** L'enquête a révélé que la grande proportion des sujets enquêtés (88%) n'utilise pas le son de blé dur dans l'alimentation, il est utilisé uniquement dans le traitement de quelque pathologies digestives et métaboliques sur recommandation des herboristes. Les échantillons de son de blé contiennent une quantité très importante de fibres alimentaires insolubles (39% MS) et la quantification des composés phénoliques a révélé que les extrais ont une concentration considérable de phénols totaux, flavonoïdes et des tanins condensée (1.678-1.817 mg EAG/g), (0.503-0.594 mg EC/g), (1.345-1.587 mg EC/g) respectivement, et possèdent une activité antioxydante très importante .Le pouvoir antioxydant avec le DPPH et le test de FRAP est moins important par rapport à celui du blanchissement du β-carotène et l'effet chélateur des ions ferreux (FIC), ces derniers donnent le même pourcentage d'activité que du standard. Les tests de l'activité antibactérienne ont révélé que les souches testées ne sont pas sensibles à nos extraits. **Conclusion.** Le son de blé dur est riche en fibres alimentaires et possède des activités antioxydantes très intéressantes et peut être revaloriser dans l'alimentation et la santé humaine.

Mots clés : son de blé, fibres alimentaires, composés phénoliques, activité biologique, revalorisation.

Abstract

Introduction. Wheat is an excellent source of insoluble dietary fiber. These fibers are mainly concentrated in the envelope of the grain which constitutes the wheat bran (by-product obtained after refining). **Objective.** The aim of this study is to evaluate the biological activity of the bran of durum wheat (*Triticum durum*) of three Algerian varieties for its revalorization in human health. **Methods**. A survey on the use of durum wheat bran in human food was conducted in the region of Sidi Bel Abbes with 500 subjects. The experimentation was carried out on three varieties of durum wheat (*Triticum durum*): Siméto, Chen's and Vitron. The maceration of the durum wheat bran powder was carried out with ethanol at 80%. Chemical characterization was performed by spectrophotometric techniques for phenolic compounds, and the use of methods for the determination of dietary fiber. Antioxidant activity was tested by four methods: free radical scavenging with DPPH, FRAP (Ferric Reducing Antioxidants Power) test, β-carotene bleaching test and ferrous ion chelating effect (FIC), and the antibacterial effect was measured by the agar medium diffusion disc method. **Results.** The survey revealed that a large proportion of the subjects surveyed (88%) do not use durum wheat bran in food, it is used only in the treatment of some digestive and metabolic pathologies on the recommendation of herbalists. The samples of wheat bran contain a very important quantity of insoluble dietary fiber (39% DM) and the quantification of phenolic compounds revealed that the extracts have a considerable concentration of total phenols, flavonoids and condensed tannins (1.678-1.817 mg GAE/g), (0.503-0.594 mg EC/g), (1.345-1.587 mg EC/g) respectively, and possess a very important antioxidant activity. The antioxidant power with DPPH and FRAP test is less important compared to that of β-carotene bleaching and ferrous ion chelating effect (FIC), these give the same percentage of activity as the standard. The antibacterial activity tests revealed that the tested strains are not sensitive to our extracts. **Conclusion.** Durum wheat bran is rich in dietary fiber and has very interesting antioxidant activities and can be revalorized in food and human health.

Key words: wheat bran, dietary fiber, phenolic compounds, biological activity, revalorization.

مُـلَّـخَـصْ

مقدمة. القمح مصدر ممتاز للألياف الغذائية غير القابلة للذوبان. تتركز هذه الألياف بشكل أساسي في غلاف الحبوب الذي يتكون من نخالة القمح (منتج ثانوي يتم الحصول عليه بعد التكرير). **الهدف.** الهدف من هذه الدراسة هو تقييم النشاط البيولوجي لنخالة القمح الصلب (*Triticum durum*) لثلاثة أصناف جزائرية لإعادة تثمينها في مجال صحة الإنسان. **المواد والأساليب.** تم إجراء تحقيق حول استخدام نخالة القمح الصلب في غذاء الإنسان في منطقة سيدي بلعباس على 500 شخص. أجريت التجارب على ثلاثة أصناف من نخالة القمح الصلب (*Triticum durum*) وهي Siméto ، Chen's وVitron. للحصول على مستخلص مسحوق نخالة القمح الصلب تم إجراء نقع باستخدام 80٪ إيثانول. تم إجراء التوصيف الكيميائي بواسطة تقنيات القياس الطيفي للمركبات الفينولية، واستخدام بعض الأساليب الكيميائية لتحديد كمية الألياف الغذائية. تم اختبار النشاط المضاد للأكسدة بأربع طرق: مسح الجذور الحرة باستخدام DPPH، اختبار FRAP (قوة مضادات الأكسدة الحديدية)، اختبار التبييض β كاروتين وتأثير مخلب الأيونات الحديدية (FIC)، وتم قياس التأثير المضاد للبكتيريا بطريقة قرص الانتشار في وسط أجار. **النتائج.** أظهر التحقيق أن نسبة كبيرة من الأشخاص الذين شملهم الاستطلاع لا يستخدمون نخالة القمح الصلب في النظام الغذائي (88%)، ولا يستخدم إلا في علاج بعض أمراض الجهاز الهضمي والإضطرابات الأيضية بناءً على توصية المعالجين بالأعشاب. تحتوي عينات نخالة القمح على كمية كبيرة جدًا من الألياف الغذائية غير القابلة للذوبان 39٪ وأظهر تقدير المركبات الفينولية أن المستخلصات تحتوي على تركيز كبير من إجمالي الفينولات والفلافونويد والعفص المكثف (1.678-1.817 ملغ ما يعادل حمض الغاليك/غ)، (0.503-0.594 ملغ ما يعادل الكاتيشين/غ) و (1.345-1.587 ملغ ما يعادل الكاتيشين/غ) على الترتيب، كما لها نشاط مضاد للأكسدة بحيث تعتبر القوة المضادة للأكسدة مع اختبار DPPH و FRAP أقل أهمية مقارنة مع بتبييض البيتا كاروتين وتأثير مخلب للأيونات الحديدية (FIC)، هذه الأخيرة تعطي تقريبا نفس النسبة المئوية من نشاط المعيار. وأخيرا كشفت اختبارات النشاط المضاد للبكتيريا أن السلالات المختبرة ليست حساسة لمستخلصاتنا. **الخاتمة.** نخالة القمح الصلب غنية بالألياف الغذائية ولها أنشطة مثيرة للاهتمام كمضادات الأكسدة ويمكن إعادة تثمينها في الغذاء وصحة الإنسان.

الكلمات المفتاحية: نخالة القمح، الألياف الغذائية، المركبات الفينولية، النشاط البيولوجي، إعادة التقييم.

Table des matières

DEDICACE

REMERCIEMENTS

RESUME

ABSTRACT

مُلَّخَصْ

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION 18

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CEREALES

I.1. Les céréales 22

I.2. Les grains des céréales 23

I.3. Fractions technologiques 24

I.4. Le blé : 25

I.4.1. Relation phylogénétique entre le blé et les autres graminées appartenant à la famille des Poaceae 25

I.4.2. Variétés et catégories de blé 25

I.4.2.1. Les blés tendres 26

I.4.2.2. Les blés durs 26

I.4.3. Variétés en Algérie 26

I.4.4. Valeur nutritionnelle de blé 27

I.5. Le blé dur 27

I.5.1. Classification botanique 29

I.5.2. Description de la plante du blé dur 29

I.5.3. Structure histologique du grain de blé dur 31

I.5.3.1. Les enveloppes 32

I.5.3.2. L'endosperme (amande ou albumen) 33

I.5.3.3. Le germe (embryon)..... 33
I.5.4. Caractéristiques qualitatives du blé dur 34
I.5.5. Stockage 35
I.5.6. Mouture et Broyage du blé..... 36
I.5.7. Importance du blé..... 37

CHAPITRE II : GENERALITES SUR LE SON DE BLE DUR

II.1. Définition..... 39
II.2. Composition chimique..... 40
II.2.1. Glucides 42
II.2.2. Lipides 43
II.2.3. Les fibres alimentaires 43
II.2.3.1. Introduction 43
II.2.3.2. Historique 44
II.2.3.3. Définition des fibres alimentaires..... 46
II.2.3.4. Distribution des fibres alimentaires dans le blé..... 47
II.2.3.5. Sources de fibres alimentaires 49
II.2.3.6. Structure..... 50
II.2.3.7. Composition..... 52
II.2.3.8. Classification 53
II.2.3.9. Fibres alimentaires solubles..... 54
a) Gommes 55
b) Pectine..... 55
c) β-glucane..... 55
c) L'inuline..... 56
II.2.3.10. Fibres alimentaires insolubles 56
a) Cellulose..... 56
b) Hémicellulose 56
c) Oligosaccharides 57
d) Amidon résistant 57
e) Arabinoxylane..... 57
f) Lignine..... 58
II.2.4. Substances phytochimiques..... 59
II.2.4.1. L'acide phytique..... 60
II.2.4.2. Les vitamines..... 61

II.2.4.3. Alkylrésorcinols 61
II.2.4.4. Férules de stérol 61
II.2.4.5. Les tocophérols 62
II.2.4.6. Les composés phénoliques 62
II.2.4.7. Les Caroténoïdes 64
II.2.4.8. Autres substances 65

CHAPITRE III : ACTIVITES BIOLOGIQUES ET EFFET DES FIBRES ALIMENTAIRES DU SON DE BLE DUR SUR LA SANTE HUMAINE

III.1. Le son de blé dur et activité biologiques 67
III.1.1. L'activité antioxydante 68
III.1.2. Les effets mécaniques 69
III.1.3. Son de blé et prébiotiques 69
III.1.4. Santé digestive 69
III.2. Propriétés physicochimiques des fibres alimentaires 70
III.2.1. Solubilité 70
III.2.2. Viscosité 71
III.2.3. La gélation 71
III.2.4. Capacité de rétention d'eau et de liaison 72
III.2.5. Fermentescibilité 72
III.2.6. La capacité de liaison des minéraux et des acides biliaires 74
III.2.7. Capacité à fixer l'huile 74
III.2.8. Taille des particules et porosité 74
III.3. Activités biologiques et effet des fibres alimentaires du son de blé dur sur la santé humaine 75
III.3.1. Syndrome du côlon irritable (SCI) 77
III.3.2. Diabète de type 2 77
III.3.3. Maladies cardiovasculaires (MCV) 78
III.3.4. Maladie coronarienne (CHD) 79
III.3.5. Pression artérielle 80
III.3.6. Accident vasculaire cérébral (AVC) 80
III.3.7. Cancer 81
III.3.7.1. Le cancer colorectal 81
III.3.7.2. Cancer du sein 82

III.3.7.3. Autres cancers 83
III.3.8. Effet des fibres alimentaires gestion du poids corporelle 84
III.3.9. Vieillir en bonne santé 85
III.3.10. Une espérance de vie plus longue 85
III.4. Apports suffisants en fibres 85
III.5. Utilisation des sons en alimentation humaine 87
III.5.1. La boulangerie 87
III.5.2. Biscuiterie 87
III.5.3. Extrusion 87

CHAPITRE IV : MATERIELS ET METHODES

IV.1. Objectif du travail 90
IV.2. Enquête sur l'utilisation du son de blé dur dans la région de sidi bel abbés 90
IV.2.1. La population d'étude 90
IV.2.2. Indices calculés 90
IV.2.3. Expression des résultats 91
IV.3. Détermination des paramètres physicochimiques 91
IV.3.1. Sélection des échantillons 91
IV.4. Méthodes analytiques 93
IV.5. Méthode d'extraction du matériel végétal 93
IV.6. Détermination des caractéristiques physico-chimiques 93
IV.6.1. Détermination du taux d'humidité (NA : 1333/1990) 93
IV.6.2. Capacité de rétention de l'eau 93
IV.6.3. Dosage des fibres alimentaires 94
IV.6.3.1. Fibres totales « NDF » Van Soest 1967 94
IV.6.3.2. Lignine +cellulose « ADF » Van Soest 1963 94
IV.6.3.3. Lignine : « ADL » Van Soest 1963 94
IV.6.3.4. Hémicelluloses 94
IV.6.4. Dosage des composés phénoliques 95
IV.6.4.1. Dosage des phénols totaux 95
IV.6.4.2. Dosage des flavonoïdes 95
IV.6.4.3. Dosage des tanins condensée 95
IV.7. Tests biologiques in vitro 96
IV.7.1. Activité antioxydante 96
IV.7.1.1. Test de l'effet scavenger du radical DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazil) 96

IV.7.1.2. Test de FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) 96
IV.7.1.3. Test de blanchissement du β-carotène 96
IV.7.1.4. Effet chélateur des ions ferreux (FIC) 96
IV.7.2. Activité antibactérienne (méthode de diffusion sur milieu gélosé) 97
IV.8. Étude statistique 97

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1. Résultats de l'enquête sur l'utilisation du son de blé dur 99
V.1.1. Description de l'échantillon de la population interrogé 99
V.1.2. Utilisation du son de blé dur 101
V.1.3. Maladie traitée par la consommation du son de blé dur 104
V.2. Résultats de dosages des paramètres biochimiques 106
V.2.1. Teneur en eau et rendement d'extraction 106
V.2.2. Capacité de rétention de l'eau 107
V.2.3. Résultat de dosage des fibres alimentaires : 109
V.2.4. Détermination des composés phénoliques 113
V.3. Résultats des Activités biologiques in vitro : 116
V.3.1. Le test de balayage du radical DPPH : 116
V.3.2. Essai FRAP : 116
V.3.3. Méthode de blanchiment du β-carotène : 117
V.3.4. Effet chélateur des ions ferreux (FIC) : 118
V.3.5. L'activité antibactérienne 124
CONCLUSION 127
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 128
ANNEXES 153
PUBLICATION INTERNATIONALE 174

Liste des abréviations

ADF : acid detergent fiber

ADL : acid detergent lignin

AGCC : acides gras à chaîne courte

AR : Alkylrésorcinols

AVC : Accident vasculaire cérébral

AX : Arabinoxylanes

CFT : concentrations totales en flavonoides

CHD : Maladie coronarienne

CPT : concentrations totales en phénols

CTC : concentration en tanins condensés

DASH : Approches diététiques pour arrêter l'hypertension

DMSO : DiMéthylSulfOxide

DPPH : 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazil

EDTA : Ethylenediaminetetraacetic acid

FA : fibres alimentaires

FIC : Ferrous Ion Chelating

FL: Fidelity level

FOS: fructooligosaccharides

FRAP: Ferric Reducing Antioxidant Power

GOS : galactooligosaccharides

HDL : lipoprotéines à haute densité

IC_{50} : Concentration inhibitrice de 50 %

LDL : lipoprotéines à faible densité

MCV : maladies cardiovasculaires

mg EAG : milligramme équivalent d'acide gallique

mg EC : milligramme équivalent catéchine

MT : millions de tonnes

NDF : neutral detergent fiber

SBD : Son de blé dur

FAT : fibre alimentaire totale

TPTZ : tripyridyltriazine

UV: Use value

Liste des figures

Figure 1: Morphologie de différents grains de céréales. D'après (Gassner., 1973)..... 24
Figure 2: Relation phylogénétique entre le blé et les autres graminées appartenant à la famille des Poaceae (Bhalla and Singh., 2017) 25
Figure 3: Spécimen de blé dur dans le Jardin botanique Missouri (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris (France). Collection : Plantes vasculaires (P). Spécimen P00662178. 28
Figure 4: Structure et morphologie de la plante de blé dur. 30
Figure 5 : La graine de blé dur. 31
Figure 6: Coupe d'un grain de blé (Feillet., 2000). 32
Figure 7: Répartition des macros et micros nutriments dans les tissus du grain de blé. D'après (Hemery et al., 2009 ; Fardet., 2010). 34
Figure 8: Le son de blé dur..... 39
Figure 9: Structure microscopique du son et de farine de blé dur (Saunders., 1980). 40
Figure 10: Coupe transversale de son de blé coloré avec de la fuchsine acide et du calcofluor (Vermeulen., 2017). 41
Figure 11: Composants des fibres dans le blé complet et le son. 48
Figure 12: Formation de fibres à partir de chaînes de cellulose et structure de la cellulose (Kersten., 2016). 51
Figure 13: Les caractéristiques physicochimiques des fibres alimentaires et leur localisation dans la cellule végétale (Gill et al., 2021). 51
Figure 14: Différentes sortes de fibres obtenues à partir de plantes (Kersten., 2016) 52
Figure 15: Différentes classifications des fibres alimentaires d'après (Ben Ahmed., 2018)... 54
Figure 16: Illustrations schématiques de la lignine polysaccharide (Tsubaki et Azum., 2011) 59
Figure 17: Structure de la molécule de la lignine (Tsubaki et Azum., 2011). 59
Figure 18: Teneur en acide phytique dans le blé complet et le son (Fardet., 2010)..... 60
Figure 19: Structure chimique de la phytate (Serna-Saldivar., 2010). 60
Figure 20: Structures moléculaires de base de quelques acides phénoliques (Sang et Zhu., 2014). 63
Figure 21: Les acides phénoliques présentent dans le blé complet et le son. 63
Figure 22: Effets postprandiaux potentiels de la consommation de fibres de blé. 67
Figure 23: Degré de fermentescibilité des fibres alimentaires dans le colon d'après (Wang et al., 2009)..... 73
Figure 24: Chaîne trophique de dégradation des fibres alimentaires d'après (Mosoni., 2014) 75

Figure 25: Mécanisme d'action des fibres alimentaires sur la prévention des maladies chroniques d'après (Champ., 2018). 76
Figure 26: Apport journalier adéquat en fibres totales en fonction de l'âge et du sexe (Institute of Medicine., 2002) 86
Figure 27: Diagramme de transformation des grains. 92
Figure 28: Tranches d'âges de la population d'étude. 99
Figure 29: Répartition de la population d'étude selon le sexe. 100
Figure 30: Pourcentage des informateurs selon le type de l'interroger. 100
Figure 31: Pourcentage des informateurs selon le niveau de l'interroger. 101
Figure 32: Domaine d'usage du son de blé dur. 101
Figure 33: Taux du son de blé dur selon le sexe. 102
Figure 34 : Fréquence d'utilisation alimentaire et thérapeutique du son de blé dur. 102
Figure 35: Fréquences des maladies et de symptômes traités par le son de blé dur selon les informateurs. 104
Figure 36: Teneur en eau des échantillons du son de blé dur. 106
Figure 37: Rendement d'extraction des échantillons par solvant (Éthanol 80 %) 107
Figure 38: Capacité de rétention de l'eau selon les trois variétés. 108
Figure 39: Résultats de dosages des fibres alimentaires dans les échantillons. 109
Figure 40: Les concentrations de Fe++ dans les mélanges en (mmol/g d'extrait). 117
Figure 41: Cinétique de blanchiment du β-carotène en fonction du temps pour les trois variétés de SBD, extrait et normes de référence. 118
Figure 42: Pourcentage de chélation des ions ferrique dans les échantillons et les standards. 119
Figure 43: Photos des boites de Pétri après incubation. 125
Figure 44: Procédure d'extraction par macération. 155
Figure 45: Appareil réflecteur pour le dosage des fibres alimentaires (ref : fiwe 6). 158
Figure 46: Dosage des fibres avec un détergent neutre (NDF SELON VAN SOEST). 159
Figure 47: Résidus fibreux dans les creusets après extraction. 162
Figure 48: courbe d'étalonnage des phénols totaux. 164
Figure 49: Courbe d'étalonnage des flavonoïdes. 165
Figure 50: Courbe d'étalonnage des tanins condensées. 166
Figure 51: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'acide gallique. 167
Figure 52: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'acide ascorbique. 168
Figure 53: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'extrait Chen's. 168
Figure 54: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'extrait Siméto. 169
Figure 55: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'extrait Vitron. 169

Figure 56: Courbe d'étalonnage de FeSO4. 170
Figure 57: ensemencement et dépôt des disques. 173
Figure 58: boites de pétries après une nuit d'incubation. 173

Liste des tableaux

Tableau 1: Quantités annuelles mondiales de production et de consommation des principales cultures céréalières (Silventoinen., 2021). 23
Tableau 2: Composition proximale de divers composants du blé. 34
Tableau 3: Principaux aspects de la qualité pour les différentes utilisateurs concernées par le blé dur (Hassan., 2016). 35
Tableau 4: Principaux constituants du son de blé % par rapport à la matière sèche..... 41
Tableau 5: Composés bioactifs pour 100g de son de blé (Babu et al., 2018). 42
Tableau 6: Évolution des composés pris en compte dans le terme fibres alimentaires (Galanakis., 2019). 45
Tableau 7: Différentes sources de fibre alimentaires (Galanakis., 2019). 49
Tableau 8: Principales sources des fibres alimentaires exprimées en g/100 g (Schlienger., 2008) 50
Tableau 9: Classification des fibres alimentaires (Galanakis., 2019). 53
Tableau 10: Effets des fibres alimentaires solubles et insolubles sur la santé d'après (Eswaran et al., 2013). 54
Tableau 11: Propriétés antioxydantes des antioxydants non enzymatiques du son de blé dur (Sang et Zhu., 2014) 68
Tableau 12: Taux des fibres selon les variations des taux d'extractions. 87
Tableau 13: Les caractéristiques des variétés de blé dur. 91
Tableau 14: Pourcentage globale des différentes tranches d'âge. 99
Tableau 15: Fréquence et pourcentage d'utilisation du son de blé dur 103
Tableau 16: Facteurs associés à l'utilisation du son de blé dur. 103
Tableau 17: niveaux de fidélité (FL) du son de blé dur. 104
Tableau 18: Capacité de rétention de l'eau dans les échantillons. 107
Tableau 19: Résultats de dosages des fibres alimentaires du son de blé dur selon les trois variétés. 109
Tableau 20: Concentration des composés phénoliques dans les extraits de son de blé dur. . 113
Tableau 21: Valeurs IC_{50} pour les extraits de son de blé et les standards de référence. 116
Tableau 22: Concentrations de Fe++ en mmol/g d'extraits. 116
Tableau 23: Pourcentages d'activité antioxydante des extraits de son de blé dur 118
Tableau 24: Pourcentage (%) de chélation des ions ferriques dans les extraits et les standards 118
Tableau 25: Diamètres d'inhibition des souches bactérienne. 124

Introduction

Les aliments à base de céréales sont de loin la principale source de nourriture, d'énergie, de protéines, de vitamines B et de minéraux pour la population mondiale actuelle (Saldivar., 2015). L'utilisation des céréales a considérablement évoluée et se répartit entre l'alimentation humaine, l'alimentation animale et les applications non alimentaires (Saulnier., 2012). Le blé est la plus grande et la plus importante culture vivrière du monde pour la consommation humaine directe (Carver., 2009), il est largement cultivé dans les pays méditerranéens, dans certaines parties de l'Europe de l'Est, aux États-Unis, au Mexique et dans certaines régions de la Saskatchewan et des environs au Canada. 45% du blé dur est cultivé en Asie occidentale et en Afrique du Nord (Grant et al., 2012). En Algérie, les céréales en général et le blé dur et tendre en particulier, constituent la principale base de l'alimentation des consommateurs. Elles fournissent plus de 60% de l'apport calorique et 75-80% de l'apport protéique de la ration alimentaire (Khennaoui., 2018). Les propriétés fonctionnelles de santé du blé complet vont bien au-delà de ses propriétés nutritionnelles et proviennent principalement des composés bioactifs de la fraction de l'enveloppe externe de la graine qui représente le son de blé (sous-produit obtenu après le raffinage) destiné principalement à l'alimentation animale. De nombreuses études ont montré que la consommation humaine du son de blé sous différentes formes présente un effet bénéfique pour la santé , notamment sur la prévention et la réduction du risque de maladies chroniques telles que l'athérosclérose, l'obésité, le diabète de type 2, le cancer et certaines maladies gastro-intestinales, à savoir le syndrome du côlon irritable et la maladie diverticulaire (Sapirstein., 2015; Babu et al., 2018) . Ces effets sont dus principalement aux rôles physiologiques et nutritionnels des composants du son de blé , il s'agit des effets mécaniques dans le tractus gastro-intestinal en raison de sa teneur en fibres et des effets antioxydants découlant de ses constituants phytochimiques (Higuchi., 2014). Le son de blé est considéré comme étant une excellente source de fibres alimentaires insolubles environ (50 % MS) et d'acides phénoliques (4.5 μg/g) , tels que l'acide férulique en majeur partie ainsi que l'acide vanillique, l'acide p-coumarique, l'acide syringique, l'acide caféique, l'acide p-hydroxybenzoïque (Singh et al., 2012 ; Giet et al., 2010). Les plantes et les produits végétaux sont utilisés comme source de médicaments depuis longtemps. Les propriétés médicinales des plantes ont été étudiées dans le cadre des récents développements scientifiques dans le monde entier, en raison de leurs richesses en fibres alimentaires et leurs puissantes activités antioxydantes, de l'absence d'effets secondaires et de leur viabilité économique (Singh

et al., 2012). Les acides phénoliques et autres antioxydants, qui sont abondants dans les céréales, peuvent être utilisés plus efficacement comme piégeurs de radicaux libres ainsi que comme agents réducteurs et chélateurs des ions métalliques. Cependant, jusqu'à présent, la majorité des études se sont concentrées sur les substances phytochimiques provenant de sources végétales telles que les légumes, les fruits et les épices, alors que les céréales accumulent également des constituants précieux, qui pourraient être utilisés dans le développement et la production d'ingrédients alimentaires sains (Povilaitis et al., 2015).

Le son de blé est considéré comme étant une bonne source de divers nutriments et matériaux à activité antioxydante tels que les tocophérols, les caroténoïdes, les acides phénoliques et d'autre substances phytochimiques (Jung et al., 2012).

Le présent travail de recherche se fixe comme objectif la recherche du potentiel thérapeutique du son de blé dur de quelques variétés Algériennes, et ce, par la détermination de quelques paramètres physicochimiques, des fibres alimentaires et de quelques composés phénoliques, ainsi que l'évaluation de ses activités biologiques notamment l'activité antioxydante et antibactérienne.

Partie bibliographique

Chapitre I : Généralités sur les céréales

I.1. Les céréales

La culture des céréales a permis l'essor des grandes civilisations, car elle a constitué l'une des premières activités agricoles. En effet, Il y a plus de trois millions d'années, l'homme préhistorique était nomade, pratiquait la chasse et la cueillette des fruits pour assurer sa nourriture. Le nomadisme a progressivement laissé la place à la sédentarité qui permit la culture des céréales (Nedjah., 2015).

Les céréales constituent la principale composante du régime alimentaire de l'homme depuis des milliers d'années et ont joué un rôle majeur dans le façonnement de la civilisation humaine. Dans le monde entier, le riz, le blé et le maïs, et dans une moindre mesure, le sorgho et le millet, sont des aliments de base essentiels à la survie quotidienne de milliards de personnes. Plus de 50% de l'apport calorique mondial quotidien provient directement de la consommation de céréales (Awika., 2011).

La production globale de céréales au début des années 1990 montre bien la nature des changements intervenus. La Chine vient au premier rang avec 14,6% de la production mondiale, devant l'Inde (11,7%), les États-Unis (9,4%), la Russie (7%), la France (5%) et le Canada (4%). Parmi les pays d'Asie, seule l'Inde équilibre bien entre la production et la consommation (Hacini., 2014).

À l'échelle mondiale, le maïs a le plus grand volume de production annuelle parmi les grains céréaliers. En 2018, la production était de 1147,6 millions de tonnes (MT) **(tableau 1)**. Le riz occupe la deuxième place avec une production annuelle de 782 MT de riz et le blé est la troisième céréale la plus abondamment produite avec 734 MT produites annuellement, tandis que diverses céréales secondaires (par exemple, l'orge, le sorgho, le millet, l'avoine et le seigle) sont produites en quantités moindres (Silventoinen., 2021). Outre la consommation alimentaire, l'utilisation pour l'alimentation animale et la production de biocarburants sont des domaines importants de la consommation de céréales. Le riz est principalement utilisé pour l'alimentation humaine (81%) alors que seulement 70% environ du blé est utilisé pour la consommation humaine (Shiferaw et al., 2013). Des quantités encore plus faibles de maïs (12,4%) et d'autres céréales secondaires (27,9%) sont consommées à des fins alimentaires (Silventoinen., 2021).

Dans le **tableau 1**, la consommation est divisée en consommation alimentaire, alimentation animale et biocarburant et les valeurs entre parenthèses représentent la part de la consommation totale de chaque catégorie de consommation. En outre, les quantités de son sont indiquées pour les principales cultures qui contribuent de manière significative à la production mondiale de flux secondaires agricoles.

Tableau 1: Quantités annuelles mondiales de production et de consommation des principales cultures céréalières (Silventoinen., 2021).

	Production**	Consommation**				Production de son**
		Total	Nourriture	Aliments pour animaux	Biocarburant	
Maïs	1147.6	1141.5	141.8 (12.4%)	675.1 (59.1%)	181.4 (15.9%)	20-23
Blé	734	747.4	511.5 (68.4%)	149.4 (20.0%)	9.2 (1.2%)	56-92
Riz	782	511.7	414.2 (81%)	17.8 (3.5%)	0.0 (0.0%)	63-76
Autres*	266.1	282.6	78.9 (27.9%)	144.9 (51.3%)	9.1 (3.2%)	-
Orge	141.4	-	-	-	-	-
Sorgho	59.3	-	-	-	-	-
Millet	31	-	-	-	-	-
Avoine	23.1	-	-	-	-	-
Seigle	11.3	-	-	-	-	-

*autres gros grain, **million de tonne (MT)

La plupart des céréales, herbacée, annuelle, monocotylédone, appartiennent à la famille des Graminées et/ou Poacées. Ce sont : le blé, l'orge, l'avoine, le seigle, le maïs, le riz, le millet, le sorgho. Les unes appartiennent à la sous-famille des Festucoïdées : blé, orge, avoine, seigle; les autres à la sous-famille des Panicoïdées: maïs, riz, sorgho, millet (Nedjah., 2015).

I.2. Les grains des céréales

Le grain des céréales est un fruit sec indéhiscent (caryopse), dans lequel les enveloppes du fruit sont intimement soudées à celles de la graine. Cette graine est caractérisée par la présence d'un tissu de réserve ou « albumen » indépendant de l'embryon. Les grains des différentes espèces de céréales montrent une certaine diversité de forme et de taille et, à l'exception du maïs et du riz, sont caractérisés par un sillon plus ou moins prononcé (blé, orge, avoine, seigle, etc.) **(Figure 1)**. En général, ils sont débarrassés des parties florales ou « glumelles » à la récolte sauf dans le cas de l'orge et de l'avoine où les grains sont « nus » ou « vêtus » selon les variétés (Saulnier., 2012).

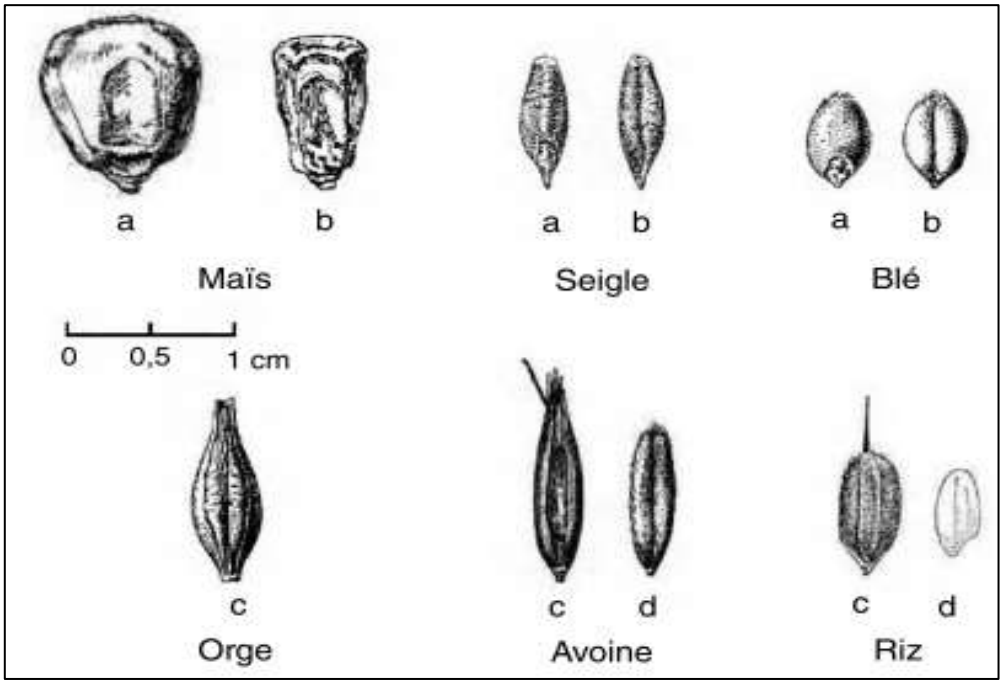


Figure 1: Morphologie de différents grains de céréales. D'après (Gassner, 1973).

a : vue dorsale, **b :** vue ventrale ; **c :** grain vêtu, **d :** grain nu.

Ces différences morphologiques ont une grande importance pour l'utilisation des grains. Le riz est généralement utilisé entier ou après élimination par « polissage » des enveloppes externes, tandis que la plupart des autres céréales sont broyées pour obtenir des farines contenant tout ou une partie des tissus du grain. Les proportions des différents tissus du grain peuvent légèrement varier entre les différentes céréales, mais c'est essentiellement entre ces tissus qu'existent des différences de composition (Saulnier., 2012).

I.3. Fractions technologiques

Pour l'alimentation humaine, les grains de céréales sont généralement consommés après une première transformation destinée à fragmenter le grain en particules plus ou moins fines (farine, semoules, etc.) et à se débarrasser partiellement ou en totalité des tissus les plus externes. En conséquence, les farines et semoules obtenues seront en général enrichies en amidon et en protéines mais appauvries en fibres, vitamines et minéraux par rapport aux grains entiers (Saulnier., 2012).

I.4. Le blé :

I.4.1. Relation phylogénétique entre le blé et les autres graminées appartenant à la famille des Poaceae

La famille des Poaceae comprend des cultures céréalières importantes sur le plan économique, comme le maïs, le riz, l'orge, l'avoine et les graminées fourragères. Les graminées sont classées en fonction du type de caryopse ou de grain (un fruit riche en amidon à une seule graine) que ces plantes produisent (Bhalla et Singh., 2017).

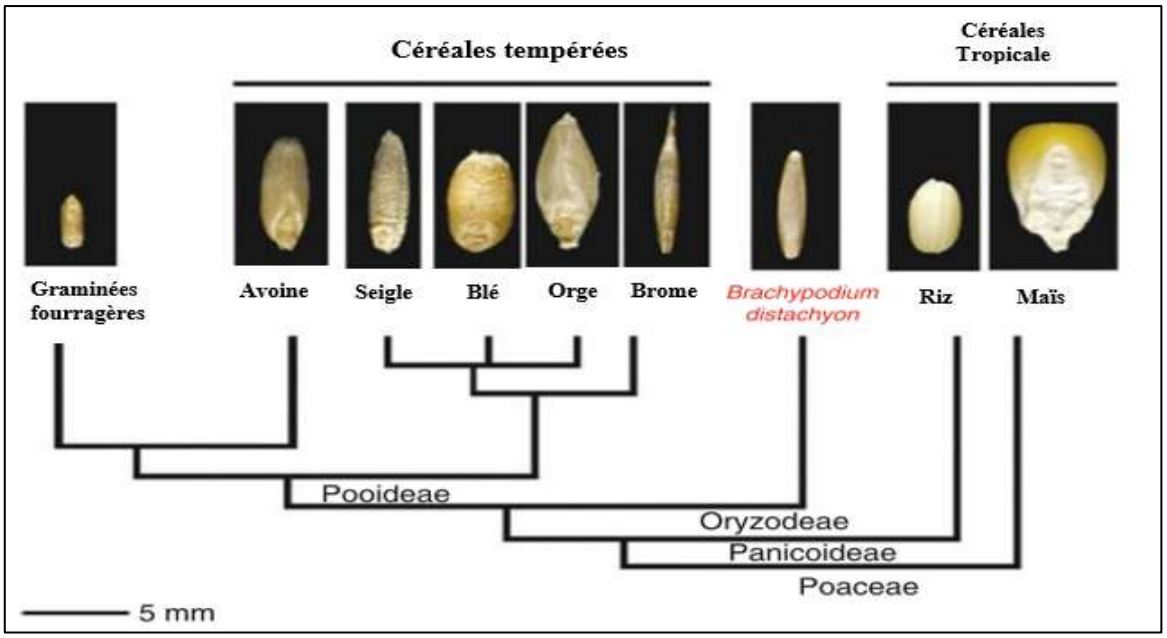


Figure 2: Relation phylogénétique entre le blé et les autres graminées appartenant à la famille des Poaceae (Bhalla et Singh., 2017)

Le blé C'est une plante annuelle de la classe des monocotylédones, famille des Graminées, genre *Triticum*. En fonction du degré de diploïdie, on différencie les blés diploïdes *Triticum monococcum* (presque plus cultivés) (2n = 14), les blés durs tétraploïdes *Triticum durum* (2n = 28) et enfin les blés tendres hexaploïdes *Triticum aestivum* (2n = 48) (Beaugrand., 2004).

I.4.2. Variétés et catégories de blé

Il existe un très grand nombre de variétés de blé. Ce sont les cultivateurs et les producteurs qui essaient d'adapter au mieux ces variétés en fonction de la nature du sol et du climat de la région, afin d'obtenir le meilleur rendement possible (Ait-Kaki., 2008). Toutes les différentes variétés de blé sont classées en trois grandes catégories :

I.4.2.1. Les blés tendres

Les grains des blés sont arrondis, les enveloppes sont épaisses, sans transparence. Ils se prêtent particulièrement bien à la mouture ; en effet, lors de la transformation technologique du blé notamment au niveau du passage entre les appareils à cylindres, les enveloppes s'aplatissent et s'ouvrent sans se broyer, libérant l'amande et donnant une très forte proportion de son. Les blés tendres permettent d'obtenir une farine de bonne qualité, contenant environ 8 à 10 % de gluten, ayant de bonnes aptitudes pour la panification (Ait-Kaki., 2008).

I.4.2.2. Les blés durs

Cette catégorie de blé est cultivée dans les pays de climat chaud et sec. Les grains de blés durs sont allongés, souvent même pointus, les enveloppes sont assez minces et légèrement translucides. Ils donnent moins de son que les blés tendres et la farine obtenue, bien que contenant plus de gluten (12 à 14 %), se prêtent moins bien à la pastification (production des pâtes alimentaires) (Ait-Kaki., 2008).

I.4.3. Variétés en Algérie

Malgré la grande richesse des ressources génétiques, les variétés connues actuellement présentent un spectre assez réduit au regard de la diversité des conditions agro climatiques de l'Algérie pour plusieurs raisons, dont quelques-unes sont liées à une méthodologie d'amélioration empirique, d'autres à l'introduction précipitée de matériel végétal présentant des caractéristiques d'adaptation spécifique (Ait kaki., 2007).

I.4.4. Valeur nutritionnelle de blé

Après le riz, le blé est la deuxième céréale la plus consommée par l'homme. Le blé est une céréale nutritive, composée de différents composants nutritionnels, notamment des protéines, des minéraux (par exemple, le magnésium et le sélénium), des vitamines (par exemple, A, B, E, la bétaïne et la choline) et des fibres alimentaires (Galanakis., 2019).

Il est composé d'environ 11 % de fibres insolubles et 2 % de fibres solubles, dont la plupart sont localisées dans les couches de son et de germe Ainsi que certain nombre d'autres composés qui peuvent être importants pour la santé humaine, notamment des antioxydants tels que les acides phénoliques (par ex., l'acide férulique), les flavonoïdes, les lignanes et les caroténoïdes (Watson et al., 2014).

I.5. Le blé dur

Le blé est la céréale la plus cultivée et la plus consommée aujourd'hui dans le monde. Domestiqué au Proche-Orient à partir d'une graminée sauvage il y a environ 10.000 ans, il compte actuellement quelque 30.000 formes cultivées. La production mondiale, en progression constante, et les échanges qui se multiplient entre les régions du monde font de cette céréale l'un des principaux acteurs de l'économie mondiale. Le mot blé a longtemps désigné toute une série de céréales, dont le seigle, le sorgho et le mil. Le latin, plus précis, identifie sous le genre *Triticum* les espèces céréalières auxquelles il est légitime de donner le nom de blé (Hacini., 2014).

Le blé est également planté sous irrigation dans les régions semi-désertiques du monde, bien que les blés de meilleure qualité soient généralement plantés au-dessus et au-dessous du tropique du Cancer et du tropique du Capricorne, respectivement (Serna-Saldivar., 2010). Le blé est un aliment de base important dans de nombreux régimes alimentaires. Bien que le blé soit souvent considéré comme une source de calories, il apporte également des minéraux et des vitamines, des composés phytochimiques bénéfiques et des fibres alimentaires, qui sont tous des éléments essentiels de l'alimentation humaine (Kuo et al., 2012). Dans le cadre d'une alimentation équilibrée, le blé représente une source saine de multiples nutriments, de fibres alimentaires et de composés bioactifs, en particulier s'il est consommé sous forme de céréales complètes (Wang et Sun., 2019).



Figure 3: Spécimen de blé dur dans le Jardin botanique Missouri (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris (France). Collection : Plantes vasculaires (P). Spécimen P00662178.

I.5.1. Classification botanique

Le blé dur est une sous-espèce de *T. turgidum* et est désigné ici par *T. turgidum subsp. durum*. C'est actuellement le blé tétraploïde le plus cultivé (formule génomique AABB) du genre Triticum. Les chercheurs ont analysé la structure de ses génomes afin de clarifier les mécanismes génétiques qui sous-tendent son évolution et ses croisements (Singh., 2011).

Le blé dur est une plante herbacée, appartenant au groupe des céréales à paille. D'après la classification de Bonjean et Picard (1990), le blé dur est une monocotylédone, c'est une céréale autogame appartenant à l'ordre des Graminnales et/ou Poales, famille des Graminae et/ou Poaceae (Nedjah., 2015).

La classification détaillée se présente comme suit :

Embranchement : Spermaphytes

Sous embranchement : Angiospermes

Classe : Monocotylédones

Super ordre : Commiliniflorales.

Ordre : Commélimiflorales

Sous ordre : Poales

Famille : Graminae ou Poaceae

Genre : Triticum L

Espèce : Triticum turgidum

Sous espèce : Triticum durum desf.

Différentes classifications sont basées sur des critères morphologiques ont été proposées par de nombreux auteurs qui ont fait intervenir pour la première fois dans la classification l'origine géographique des espèces (Ait-Kaki., 2008).

I.5.2. Description de la plante du blé dur

La plante du blé **(figure 4)** est une graminée de hauteur moyenne pouvant atteindre jusqu'à 1.5 m selon les variétés et dont le limbe des feuilles est aplati. L'inflorescence d'un épi terminal se compose de fleurs parfaites (Bozzini et al., 1988). Il existe des variétés de blé dur semi-naines. Le système racinaire comprend des racines séminales produites par la plantule durant la levée, ainsi que des racines adventives (latérales) qui se forment plus tard à partir des nœuds à la base de la plante et constituent le système racinaire permanant. Le blé dur possède une tige cylindrique, dressé habituellement creuse et subdivisée en entrenœuds. Certaines variétés possèdent toutefois des tiges pleines (Clarke et al., 2002). Le chaume (talle) se forme à partie de bourgeons axillaires aux nœuds à la base de la tige principale. Le nombre de brin dépend de la variété, des conditions de croissances et de la densité de plantation.

Dans des conditions normales une plante peut produire trois brins en plus de la tige principale (Bozzini et al., 1988).

Comme pour d'autres graminées, les feuilles de blé dur se composent d'une base (gaine) entourant la tige, d'une partie terminale qui s'aligne avec les nervures parallèles et d'une extrémité pointue. Au point d'attache de la gaine de la feuille se trouve une membrane mince et transparente la ligule, comportant deux petits appendices latéraux, les oreillettes. La tige principale et chaque brin portent une inflorescence en épi terminal.

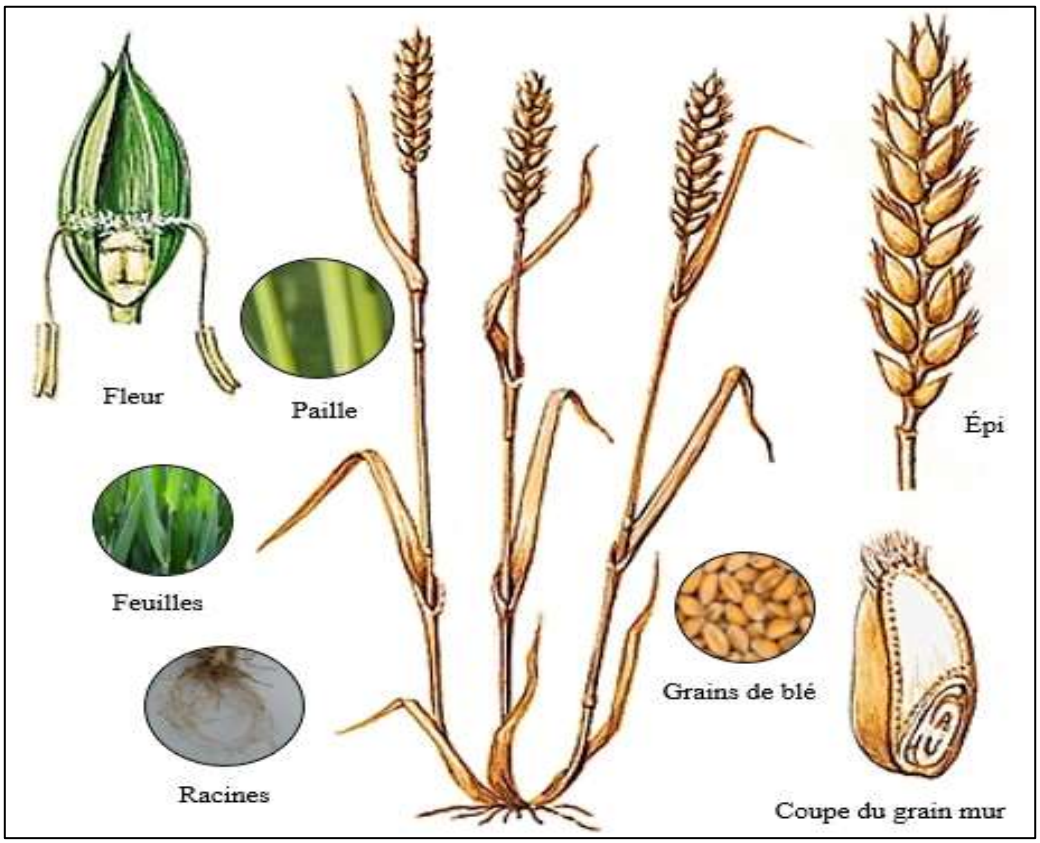


Figure 4: Structure et morphologie de la plante de blé dur.

L'inflorescence du blé dur est un épi muni d'un rachis portant des épillets séparés par de courts entrenœuds (Bozzini et al., 1988). Chaque épillet compte deux glumes (bractées) renfermant de deux à cinq fleurs distiques sur une rachéole. Chaque fleur parfaite est enfermée dans des structures semblables à des bractées, soit la glumelle inferieure (lemme) et la glumelle supérieure (paléa). A maturité, le grain de pollen fusiforme contient habituellement trois noyaux. Chaque fleur peut produire un fruit à une seule graine, soit le caryopse. Chaque graine contient un large endosperme et un embryon aplati situé à l'apex de la graine et à proximité de la base de la fleur (Nedjah., 2015).

I.5.3. Structure histologique du grain de blé dur

Les graines de blé dur sont des fruits appelées caryopses. Elles ont une forme ovoïde, possèdent sur l'une de leur faces une cavité longitudinale (le sillon) et à l'extrémité opposée de l'embryon des touffes de poils (la brosse) **(figure 5)**.



Figure 5 : La graine de blé dur.

On distingue plusieurs tissus différents dans le grain de blé (*Triticum durum L.*) **(Figure 6)**, du centre à la périphérie, à savoir l'embryon, l'endosperme (composé de l'endosperme amylacé et de la couche d'aleurone monocellulaire), les téguments (composés de l'épiderme nucellaire et du testa) et le péricarpe (composé des cellules tubulaires, des cellules transversales, de l'hypoderme et de l'épiderme). Le son de blé est composé du péricarpe, des enveloppes de la graine et de la couche d'aleurone, ainsi que de quantités variables de restes d'endosperme et de germe amylacés, en fonction de l'efficacité de séparation du processus de mouture (Santala., 2014)

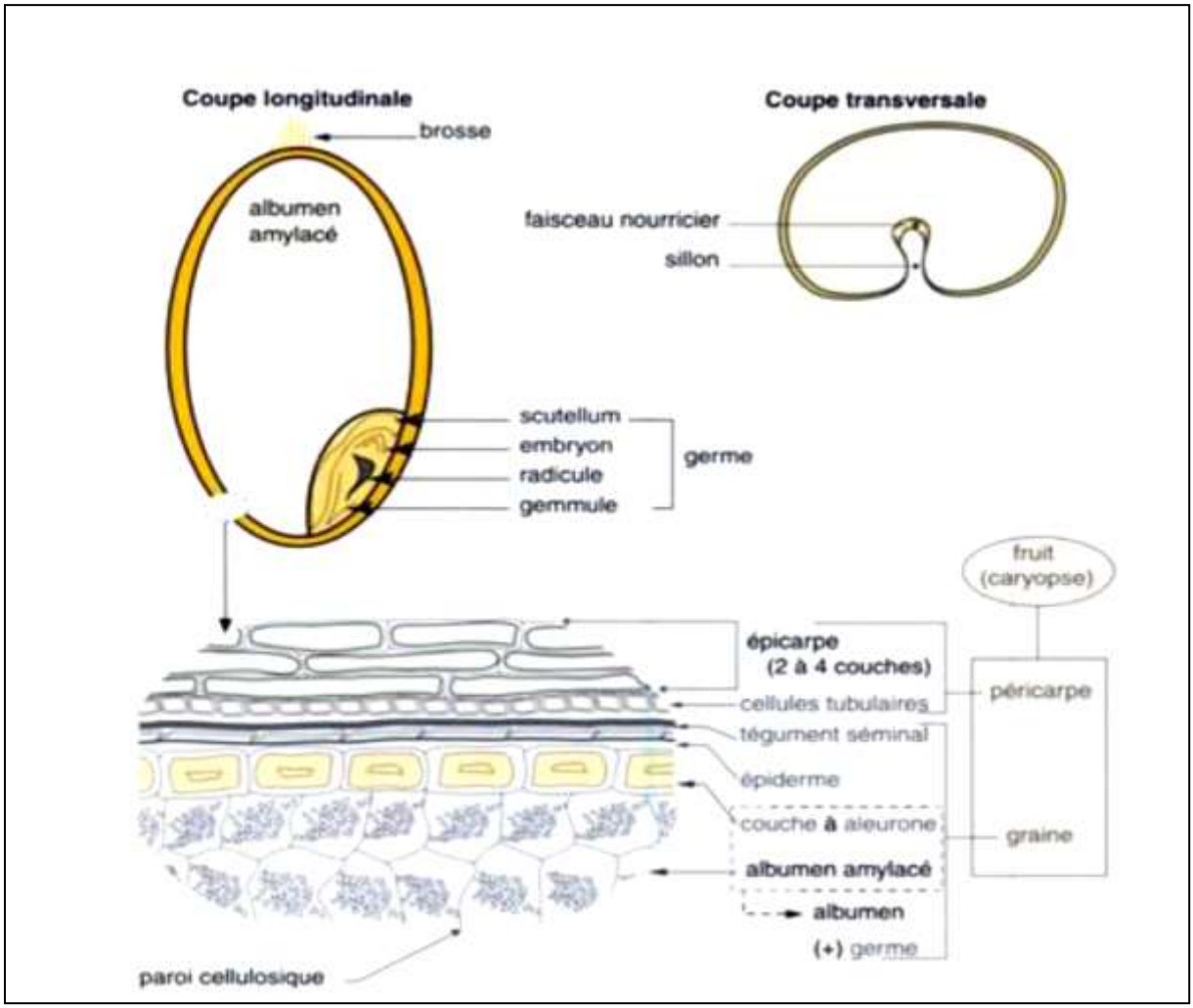


Figure 6: Coupe d'un grain de blé (Feillet., 2000).

Le grain de blé dur se compose de trois parties principales :

I.5.3.1. Les enveloppes

Les enveloppes sont de nature cellulosique qui protège le grain et représentent 14 à 16% de la masse du grain. Elles renferment une teneur importante en protéines, en matières minérales et en vitamine du complexe B ; elles contiennent en outre les pigments qui donnent la couleur des grains. Les enveloppes ont une épaisseur variable et sont formées de trois groupes de téguments soudés :

Le péricarpe ou tégument du fruit constitué de trois assises cellulaires :

-Epicarpe, protégé par la cuticule et les poils.

-Mésocarpe, formé de cellules transversales

-Endocarpe, constitué par des cellules tubulaires.

Il est riche en celluloses, hémicelluloses et pentosanes ainsi qu'en éléments minéraux (Godon et William., 1991).

I.5.3.2. L'endosperme (amande ou albumen)

Constitue presque tout l'intérieur du grain et se compose principalement de minuscules grains d'amidon. On y trouve l'essentiel des réserves énergétiques qui nourrissent la plantule au moment de la germination. Il forme environ 80% du poids d'un grain et est constitué de granules d'amidon enchâssés dans le réseau protéique (gluten).

I.5.3.3. Le germe (embryon)

Il constitue un organe de réserve, riche en protéines et en lipides pour la jeune plantule et forme environ 2,5 à 3% du grain de blé. Le germe comprend deux parties : la plantule (future plante) et le cotylédon (réserve de nourriture très facilement assimilable, destinée à la plantule) qui contient l'essentiel des matières grasses du grain. Enfin, le germe est riche en vitamine B1, B6 (Surget et Barron., 2005).

Le grain de blé est principalement constitué d'amidon (environ 70%), de protéines (10 à 15% selon les variétés et les conditions de culture) et de pentosanes (8 à 10%). Les autres constituants, pondéralement sont mineurs (quelques % seulement), sont les lipides, la cellulose, les sucres libres, les minéraux et les vitamines **(Tableau 2)** (Feillet., 2000).

Ces constituants se répartissent de manière inégale au sein des différentes fractions histologiques du grain. L'amidon se retrouve en totalité dans l'albumen amylacé, les teneurs en protéines du germe et de la couche à aleurone sont particulièrement élevées ; les matières minérales abondent dans la couche à aleurone. Les pentosanes sont les constituants dominants de cette dernière et du péricarpe. La cellulose représente près de la moitié de celui-ci, les lipides voisinent ou dépassent les 10% dans le germe et dans la couche à aleurone (Nedjah., 2015).

Le grain entier est défini par l'AACC (American Association for Cereal Chemists) comme un caryopse (grain de céréale nu) intact, moulu, fendu, concassée ou floconnée, dont les principaux composants anatomiques sont l'endosperme amylacé, le germe et le son dans les mêmes proportions que dans le caryopse intact (Wang et Sun., 2019).

La fraction de son comprend l'aleurone, l'épiderme nucellaire (ou couche hyaline), le tégument, le péricarpe interne et les couches du péricarpe externe.

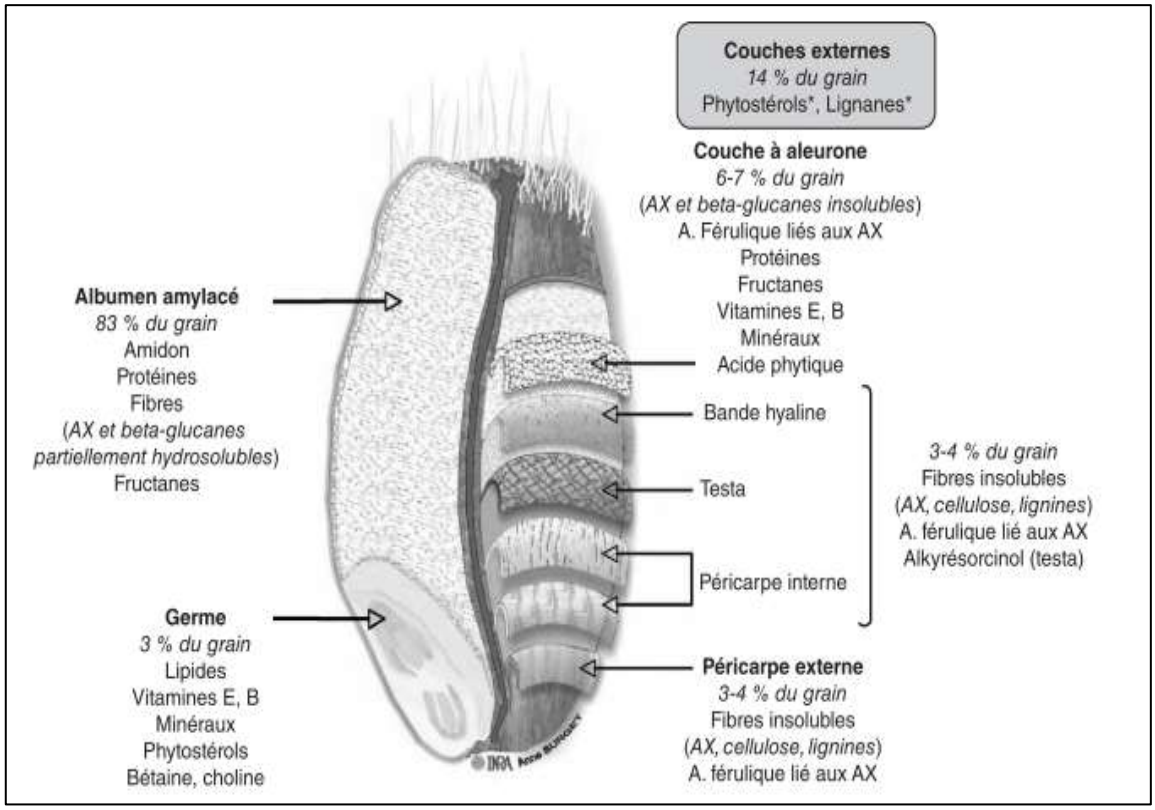


Figure 7: Répartition des macros et micros nutriments dans les tissus du grain de blé. D'après (Hemery et al., 2009 ; Fardet., 2010).

*Localisation non déterminée précisément dans les couches externes.

Tableau 2: Composition proximale de divers composants du blé.

Composant	Grain	Son	Germe	Endosperme
Protéines (%)	11-16	15-18	34	10-15
Matières grasses %	2.3-3.5	4.5-5.7	12	< 1.0
Cendres %	1.7-2.3	6.2-7.4	4.5	0.2-0.3
Fibre alimentaire %	13-15	40-45	15-18	1.1-2.3
Glucides disponibles %	70-76	15-18	35	80-85
Proportion de céréales complètes %	100	12-16	2.0-3.0	80-85

I.5.4. Caractéristiques qualitatives du blé dur

En règle générale, la qualité du blé désigne son aptitude à une utilisation finale particulière, en fonction des propriétés physiques, chimiques et nutritionnelles du grain de blé. Ainsi, les produits préparés à partir de grains de blé exigent des caractéristiques de qualité différentes. Les facteurs de qualité du blé sont essentiels pour déterminer l'aptitude du blé à l'utilisation finale et la valeur économique, et ils constituent des cibles de choix pour la sélection assistée par marqueurs (Sun et al., 2010).

Tableau 3: Principaux aspects de la qualité pour les différents utilisateurs concernées par le blé dur (Hassan., 2016).

Qualité du blé dur					
Entreprise de semences	**Marchand de grains**	**Agriculteur**	**Industrie meunière**	**Industrie des pâtes**	**Consommateur**
Pureté variétale	Approvisionnement/standard et sécurité sanitaire	Rendement	Rendement de la semoule	Teneur en protéines	Qualité de cuisson
Germination	Teneur en protéines	Rendement des grains/ qualité et stabilité	Teneur en cendres	Qualité du gluten	Aspect visuel
	Poids spécifique		Uniformité du grain	Granulation et taille des particules de semoule	Standard qualité des produits de pâtes
	Humidité du grain		Poids de test	Indice de jaune	Bon prix/Rapport qualité
			Impureté de l'humidité du grain		

La qualité des produits finis du blé dur est liée à la qualité du grain, qui, à son tour, est principalement déterminée par le génotype, mais aussi par l'environnement (climat et nutrition) et la gestion des cultures. Il n'a pas été possible de proposer une définition simple et exhaustive de la qualité du blé dur car elle change selon l'utilisateur. Donc, la qualité est définie par rapport à son utilisateur. Ainsi, chaque utilisateur dispose un critère différent pour établir son propre concept de qualité. Compte tenu de ces aspects, Troccoli et al., (2000) ont présenté certains des principaux aspects de la qualité pour ceux qui s'intéressent au blé dur (Hassan., 2016).

I.5.5. Stockage

Il existe de nombreux types et modèles d'installations de stockage des céréales. Quel que soit le type d'installation, elle doit fournir un endroit sûr jusqu'à ce que le grain soit vendu ou traité. Les installations doivent protéger le grain contre les intempéries, les insectes, les moisissures, les rongeurs et les oiseaux. Les installations de stockage doivent être conçues pour faciliter la gestion du grain et contenir des équipements de nettoyage, de séchage et d'aération d'aspiration des poussières.

Les installations vont d'un simple tas de grains non protégés sur le sol à des silos. Ces dernières installations de stockage sont d'élévateurs car le grain entrant est généralement déversé dans des fosses souterraines, puis élevé à l'aide de godets attachés à une courroie et déchargé dans des silos. Les élévateurs à grains les mieux conçus offrent des installations de

triage, de nettoyage, de séchage et de fumigation, ainsi que les moyens de transférer le grain vers des camions, des wagons, des barges et des navires (Serna-Saldivar., 2010).

I.5.6. Mouture et Broyage du blé

La plupart des céréales utilisées pour l'alimentation humaine sont moulues pour en retirer le son (péricarpe) et le germe, principalement pour répondre aux attentes sensorielles des consommateurs (Awika., 2011).

Le terme "mouture des céréales secondaires" est très large et fait référence à la mouture des grains de blé, d'orge et d'autres céréales secondaires. Interpréter le terme "mouture" comme la transformation de la matière première en un produit primaire destiné à une transformation secondaire. Cette définition englobe tous les aspects de la transformation, de l'achat des matières premières à l'assurance qualité et aux tests sur les produits (Silventoinen., 2021).

La mouture à sec des grains de céréales comprend différentes approches visant à détacher physiquement la structure du grain. En général, le terme de mouture à sec désigne toutes les opérations unitaires qui interviennent dans la transformation des grains natifs non transformés en ingrédients alimentaires dérivés des céréales. Ces opérations ont pour but de séparer les différentes parties botaniques des grains, telles que l'endosperme amylacé, les couches externes du grain et le germe, afin de produire des ingrédients raffinés. Selon le type de grain, les procédures de mouture varient et peuvent aboutir, par exemple, à des grains décortiqués, perlés ou polis, des gruaux, de la semoule grossière ou de la farine fine (Delcour et Hoseney., 2010).

La plupart des blés sont moulus en farine ou en semoule à l'aide du procédé de mouture. L'objectif de l'industrie est d'obtenir le rendement maximal en farine, ou en semoule. Les sous-produits de ces industries sont le son et parfois le germe. La mouture conventionnelle consiste en un nettoyage, un broyage réalisé par des cylindres et une séparation des particules pour obtenir des produits raffinés et des sous-produits (Serna-Saldivar., 2010).

Dans de nombreux cas, le broyage est un processus très simple, impliquant l'utilisation d'un simple broyeur pour créer une distribution granulométrique spécifique à partir de la matière première en vrac. À l'opposé, on trouve le processus complexe utilisé pour produire de la farine blanche destinée à l'industrie boulangère. Entre ces deux extrêmes, on trouve toute la gamme des procédés de mouture. Il s'agit notamment de la mouture pour l'industrie brassicole et la mouture pour l'industrie des céréales pour le petit déjeuner (Silventoinen., 2021).

Lors du traitement de la farine, le son de blé présente un faible intérêt économique. Cependant, le son contient de nombreux composants nutritionnels et phytochimiques, notamment des protéines, des fibres alimentaires, des composés phénoliques, des vitamines et des minéraux, le processus de mouture prive les céréales de ces importants nutriments bénéfiques pour la santé (Awika., 2011).

I.5.7. Importance du blé

Le blé est la culture céréalière la plus répandue dans le monde. Il constitue la principale matière de l'aliment de base de nombreux régimes alimentaires, fournissant une grande partie de l'apport énergétique quotidien (Yang et al., 2008). La demande de blé pour la consommation humaine augmente également dans le monde entier, y compris dans des pays dont le climat ne se prête pas à la production de blé, en raison de l'adoption de régimes alimentaires de type occidental. Après avoir été moulue, la farine de blé peut être utilisée pour la préparation du pain, du pain cuit à la vapeur, des biscuits, des nouilles et d'autres aliments ; la farine de blé peut également être fermentée pour donner des combustibles de biomasse (Wang et Sun., 2019).

Chapitre II : Généralités sur le son de blé dur

II.1. Définition

Le son est la fraction des couches externes d'un grain qui est retirée lors du processus de mouture pendant la production de semoule raffinée. C'est un sous-produit généré en grande quantité pendant la transformation du blé (Zhu et al., 2010). La production mondiale annuelle de blé est actuellement d'environ 650 à 690 millions de tonnes (Earth Policy Institute., 2013) et la fraction de son représente 11 à 15 % du poids du grain (Hemery et al., 2007). La majeure partie du son est utilisée pour l'alimentation animale. Le son est également utilisé dans les produits alimentaires pour augmenter la teneur en fibre alimentaires du produit final ou comme matière de remplissage pour réduire sa densité énergétique. Le son de blé contient également des quantités substantielles de protéines et de substances phytochimiques, ce qui motive encore plus son utilisation dans les produits alimentaires. Cependant, il est généralement connu que l'utilisation de son non transformé est généralement préjudiciable à la qualité du produit, et qu'il peut également contenir des contaminants qui doivent être pris en considération lors de son utilisation dans les aliments. De nombreuses méthodes de traitement ont été développées et sont actuellement étudiées comme moyens potentiels de faciliter l'utilisation des fractions de son dans différents types de produits alimentaires (Santala., 2014).



Figure 8: Le son de blé dur.

Le son **(figure 9)** représente les parties extérieures des grains, y compris le péricarpe, le testa et la couche d'aleurone, ce sont toutes des couches fibreuses contenant de la cellulose, de l'hémicellulose, des matériaux lignifiés et une large gamme de composés bioactifs.

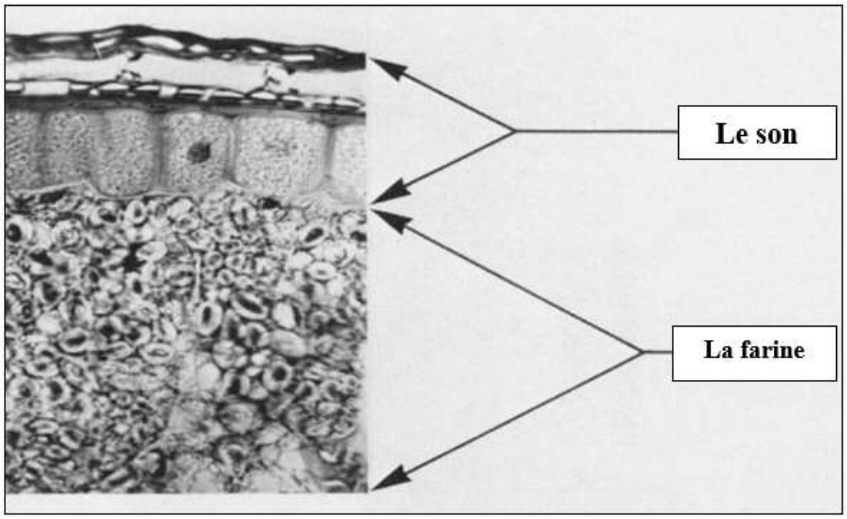


Figure 9: Structure microscopique du son et de farine de blé dur (Saunders., 1980).

II.2. Composition chimique

Le son de blé est une source importante de composés bioactifs, qui sont liés aux mécanismes de protection de la santé humaine des céréales complètes en général (Rebolleda et al., 2020). Certains de ces composés bioactifs, tels que les Alkylrésorcinols (AR), les férules de stérol et les tocophérols, sont des antioxydants lipophiles ou amphiphiles bien connus. Tous ces composés, et dans une moindre mesure les composés phénoliques, peuvent être extraits par certain procédé d'extraction, ce qui permet d'obtenir des extraits enrichis en ces composés (Rebolleda et al., 2013 ; Rebolleda et al., 2014). Il est bien connu que le système de solvant utilisé dans le processus d'extraction influence notamment la composition et la qualité des extraits (Zhou et Yu., 2004).

La structure et la composition chimique des parois cellulaires varient dans les différentes couches de son. Par exemple, les parois cellulaires de la couche d'aleurone sont principalement constituées d'Arabinoxylanes et de β-glucanes faiblement substitués, alors que le péricarpe du son contient de la cellulose, de la lignine et des Arabinoxylanes hautement substitués (Antoine et al., 2003). La plupart des protéines, des lipides et des substances phytochimiques du son sont concentrés dans la fraction aleurone (Hemery et al., 2007). Les propriétés chimiques, structurelles et physiques affectent considérablement la fonctionnalité nutritionnelle et technologique des différentes couches de son, qui peuvent être séparées à l'aide de techniques de fractionnement modernes (Santala., 2014).

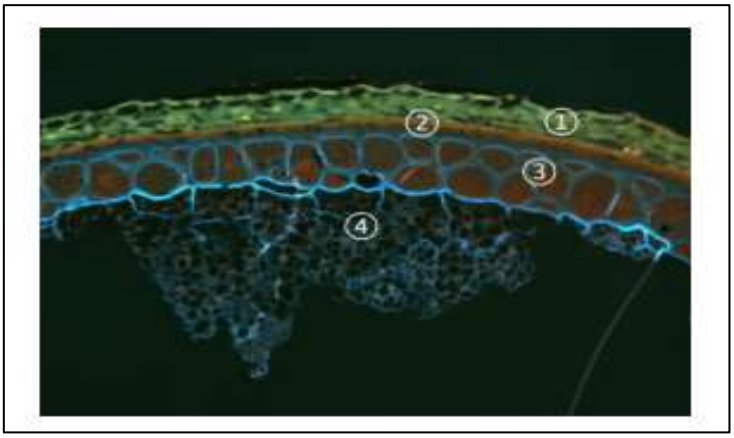


Figure 10: Coupe transversale de son de blé coloré avec de la fuchsine acide et du calcofluor (Vermeulen., 2017).

La fuchsine acide colore les protéines en rouge et le calcofluore colore le β-glucan en bleu en lumière épifluorescente (excitation 400 à 410nm, émission >-55nm). Le péricarpe n'est pas coloré, mais peut être détecté grâce à l'autofluorescence (Vermeulen., 2017).

Les parois cellulaires de l'aleurone, riches en β-glucanes, apparaissent en bleu, le brin de pigment (entre le péricarpe et la couche d'aleurone) en orange, la couche du péricarpe en vert clair et jaunâtre, et les protéines en rouge (Santala., 2014).

① péricarpe, ② tégument et épiderme nucellaire, ③ couche d'aleurone, ④ endosperme amylacé.

Les principaux constituants chimiques du son de blé sont les glucides de la paroi cellulaire (Arabinoxylane, β-glucane, cellulose), l'amidon, le fructane, la lignine, les protéines, les graisses et les minéraux (Santala., 2014).

Une grande partie (40-50%) du son de blé est constituée de fibres alimentaires (FA), c'est-à-dire les composants des plantes comestibles qui ne sont pas digérés par l'intestin grêle humain. Les principaux polymères de fibres alimentaires présents dans le son de blé sont les Arabinoxylanes (AX), la cellulose, la lignine, les fructanes et les β-glucanes **(tableau 4).**

Tableau 4: Principaux constituants du son de blé (%) par rapport à la matière sèche.

Composant	Teneur
Arabinoxylane	19–30
Cellulose	9.3–12
Lignine de Klason	3.0–4.9
Fructane	2.8-3.7
β-glucane	1.2–2.6
Amidon	8.8–29
Protéine	14–17
Graisse	5.6–6
Cendres	4–6.6

Les composés bioactifs présents dans le son de blé sont passés en revue en relation avec leurs activités antioxydantes et anti-inflammatoires (Babu et al., 2018). La teneur en composés bioactifs du grain et du son de blé est indiquée dans **le tableau 5**.

Tableau 5: Composés bioactifs pour 100g de son de blé (Babu et al., 2018).

Bioactif Composant	Quantité pour 100g de son de blé
Acide phytique (mg)	2180-5220
Acide férulique (mg)	500-1500
Alkylrésorcinols (mg)	220-400
Lutéine (µg)	97-140
Fer (mg)	11
Manganèse (mg)	12
Zinc (mg)	7.3
Sélénium (µg)	78
Vitamine E (mg)	1.4
Bétaïne (mg)	1000-1300
Choline (mg)	47-100
Niacine (mg)	14-18
Acide panthothénique (mg)	2.2-3.9
Riboflavine (mg)	0.39-0.75
Biotine (mg)	0.048
Thiamine (mg)	0.54
Pyridoxine (mg)	1-1.3
Folate (µg)	79-200

II.2.1. Glucides

Les principaux composants du son de blé sont les hydrates de carbone, en particulier l'Arabinoxylane. Environ 55 % des fibres alimentaires du son de blé étaient constituées d'Arabinoxylanes, le reste étant constitué de cellulose (9-12 %), de lignine (3-5 %), de fructane (3-4 %) et de β-glucane à liaison mixte (2.2-2.6 %). Le son de blé contient également environ 4-6 % de di- et trisaccharides tels que le saccharose et la raffinose. La cellulose constitue 30 % de la paroi cellulaire du son de blé, et correspond à environ 9.3-12.1 % du poids sec du son de blé. La cellulose est insoluble et résistante à de nombreux micro-organismes et enzymes. Les celluloses sont souvent associées à la lignine et à d'autres polysaccharides non amylacés. Avec la lignine et d'autres fibres, la cellulose forme une lignocellulose, qui est très résistante à la dégradation (Babu et al., 2018).

II.2.2. Lipides

Le son de blé contient 5.5-5.6 % de lipides et le germe de blé contient environ 28.5 % de lipides : 10.0-16.3 % dans l'axe embryonnaire et 12.6-32.1 % dans le scutellum. La plupart de ces lipides sont des phospholipides, mais il y a quelques glycolipides. Dans le son, 50 % des lipides sont des lipides insaturés avec 18 carbones et deux doubles liaisons (Babu et al., 2018).

II.2.3. Les fibres alimentaires

II.2.3.1. Introduction

Depuis le milieu des années 1970, les fibres alimentaires ont été un domaine de recherche extrêmement actif en raison de leur complexité et de leurs effets biomédicaux très variés. Pendant cette période, des centaines de documents de recherche, d'articles de synthèse, de bulletins et des dizaines de livres ont été publiés sur le sujet ; en outre, des dizaines de séminaires et de conférences ont été organisés. Les activités de recherche actives menées au cours des deux ou trois dernières décennies ayant démontré les avantages des fibres alimentaires pour la santé, la FDA (Food and Drug Administration) a rendu obligatoire la déclaration de la teneur en fibres alimentaires sur les étiquettes des aliments. En 1984, la société Kellogg et l'Institut national du cancer (NCI) ont mené une campagne conjointe pour informer les consommateurs que les fibres de son de blé pouvaient réduire l'incidence de certains types de cancers, comme le cancer du côlon. Cela a ouvert une nouvelle voie pour les nutraceutiques et les aliments fonctionnels, permettant aux consommateurs du monde entier de réduire leur risque de maladies chroniques en consommant des aliments formulés avec des ingrédients fonctionnels (Mongeau et Brooks., 2001).

Les fibres alimentaires sont principalement formées à partir des constituants de la paroi cellulaire et comprennent des polymères de carbohydrates avec des ≥3 ou ≥ 10 unités monomères, selon la définition, présents naturellement dans les aliments ou dérivés par modification et par des moyens synthétiques (Santala., 2014).

Les fibres alimentaires sont les composants des cellules végétales qui résistent à la digestion par les enzymes humaines, y compris les fibres hydrosolubles et insolubles. La teneur en fibres des grains de blé varie de 11.6 % à 12.7 % en poids sec, tandis que le son de blé est l'une des sources les plus riches en fibres avec un taux de 36.5 % à 52.4 % (Stevenson et al., 2012). Dans le son de blé, environ 1 % est constitué de fibres solubles et la majorité de fibres insolubles, dont 46 % de polysaccharides non amylacés tels que l'Arabinixylane, la cellulose et le β-glucane (Xu et al., 2019).

II.2.3.2. Historique

Les fibres alimentaires sont des composants importants de la structure des plantes. Elles font donc souvent partie de ce que nous consommons lorsque nous mangeons des aliments d'origine végétale. Cependant, ce n'est que récemment que les fibres en tant que composant alimentaire ont été considérées comme importantes. Il est généralement admis que le terme "fibre alimentaire" a été utilisé pour la première fois en 1953 par le chercheur Hipsley pour décrire les composants des parois cellulaires des plantes qui n'étaient pas digestibles par l'homme (Devries et al., 1999). Dans les années 1970, les scientifiques ont émis l'hypothèse que le régime alimentaire riche en fibres des Africains était responsable de leur faible incidence de maladies telles que le diabète, les maladies cardiaques et le cancer du côlon, qui étaient courantes dans les pays occidentaux (Devries et al., 1999). Depuis lors, le terme "fibres alimentaires" a été utilisé pour décrire les fibres consommées dans les aliments qui sont importantes pour la santé humaine, et les résultats des recherches sur les fibres alimentaires ont rempli des volumes de textes, de journaux scientifiques et d'autres publications (Kennedy et Knill., 2002).

Les résultats des recherches ont permis de mieux comprendre comment les fibres présentes dans les plantes et d'autres matières sont digérées et comment elles influencent la santé humaine, et des méthodologies ont été développées pour isoler les composants considérés comme des fibres alimentaires (Kennedy et Knill., 2002).

Au fil des années, les définitions de fibres alimentaires se sont multipliées et se sont étoffées aussi bien sur le plan scientifique que réglementaire, avec comme base les méthodes analytiques **(tableau 6)**.

Tableau 6: Évolution des composés pris en compte dans le terme fibres alimentaires (Galanakis., 2019).

Année	Composants déterminés comme FA
1929	Cellulose, hémicelluloses, pectine, produits de condensation du fructose (inuline)
1935	Lignine, celluloses et hémicelluloses non hydrosolubles
1953	Lignine, cellulose et hémicelluloses.
1969	Polysaccharides hydrosolubles (gommes, mucilages, substances pectiques), hémicellulose, cellulose et lignine.
1972	Matière non digestible de la paroi cellulaire végétale (cellulose, lignine, pentosane, acides uroniques)
1976	Polysaccharides végétaux non digestibles (celluloses, hémicelluloses, gomme de guar, mucilages, polysaccharides de stockage et polysaccharides d'algues) et lignine.
1982	Polysaccharides non amylacés (cellulose, hémicelluloses, pectine, arabinogalactanes, arabinoxylanes et autres matériaux de la paroi cellulaire végétale) et lignine de Klason.
1992	Fibres alimentaires insolubles (cellulose, amidon résistant, certains xylanes, lignine) et polysaccharides hydrosolubles de haut poids moléculaire (β-glucane, gomme de guar, certains xylanes).
2004	FAI : (cellulose, amidon résistant, certains xylanes, lignine), HMWSDF : fibres alimentaires solubles à haut poids moléculaires (β-glucan, gomme de guar, certains xylanes), maltodextrine résistante, fructanes, fructooligosaccharides, galactooligosaccharides, polydextrose, maltodextrine résistante.
2015	FAI : (cellulose, amidon résistant et certains xylanes), SDFP (β-glucane, gomme de guar et certains xylanes), SDFS (fructooligosaccharides, galactooligosaccharides, polydextrose, inuline, maltodextrine résistante) et substances associées aux polysaccharides et oligosaccharides (lignine, fractions protéiques, composés phénoliques, cires, saponines, phytates, cutine, phytostérols et autres).

SDFS : fibre alimentaire soluble dans l'eau et soluble dans l'éthanol à 78% ; SDFP : fibre alimentaire soluble dans l'eau et insoluble dans l'éthanol à 78%

II.2.3.3. Définition des fibres alimentaires

Plusieurs institutions comme l'CAC (Commission du Codex Alimentarius), l'AACCI (Cereals & Grains Association), l'AOAC International (Association of Analytical Communities), l'EFSA (Autorité européenne de sécurité des aliments), la FDA (Food and Drug Administration), l'ILSI (International Life Sciences Institute), l'IOM (Institute of Medicine), le FNB (Food and Nutrition Standards) et le FSANZ (Food Standards Australia and New Zealand) ont tenté de standardiser la définition des fibres alimentaires en se basant sur la composition chimique et le rôle physiologique dans la santé humaine (Jones., 2014).

En général, les fibres alimentaires sont considérées comme un groupe de glucides et de composés résistants à la digestion par les enzymes dans l'intestin grêle et qu'ils sont partiellement ou totalement fermentés par le microbiote intestinal avec des effets favorables sur la santé (Fuller et al., 2016).

Les principales différences dans les définitions se répartissent en trois domaines différents :

1. Composition chimique

dont la définition est fortement liée au type d'analyse permettant de la quantifier (Cruz-Requena et al., 2019).

2. Les effets physiologiques

Plusieurs recherches font état de nouvelles sources de FA dont la fonctionnalité est évaluée in vitro en fonction de son degré de solubilité, de sa capacité d'hydratation, de sa capacité d'échange cationique (liée à l'absorption des minéraux), de son degré de fermentation, de sa capacité de rétention des graisses, entre autres fonctionnalités (Mora et al., 2013 ; Slavin., 2013). En même temps, les différents mécanismes de régulation du surpoids et de l'obésité, de l'indice glycémique et du diabète de type II, du cancer du côlon et de la constipation, tous connus sous le nom de MNT (maladies non transmissibles) ont été identifiés (Cruz-Requena et al., 2019).

3. L'alimentation et la transformation des aliments

Un autre sujet de discussion est de savoir si les glucides contenus dans les fibres doivent être intrinsèques ou extrinsèques à l'aliment. Les glucides qui peuvent être extraits des FA en tant que matière comestible sont connus comme intrinsèques et les glucides modifiés ou qui peuvent être ajoutés aux aliments sont les extrinsèques (Mudgil et Barak., 2013).

Définition 1

Les fibres alimentaires sont les parties comestibles des plantes ou les hydrates de carbone analogues qui résistent à la digestion et à l'absorption dans l'intestin grêle humain, avec une fermentation complète ou partielle dans le gros intestin. Les fibres alimentaires comprennent les polysaccharides, les oligosaccharides, la lignine et les substances végétales associées. Les fibres alimentaires favorisent des effets physiologiques bénéfiques et ayant un effet positif sur les fonctions du gros intestin (Cruz-Requena et al., 2019) et aussi laxation, et/ou l'atténuation du cholestérol sanguin, et/ou l'atténuation de la glycémie (Zhu et al., 2010).

Définition 2

Les fibres alimentaires sont des polymères glucidiques de deux à dix unités monomériques, qui ne sont pas hydrolysés par les enzymes endogènes de l'intestin grêle humains et qui appartiennent aux catégories suivantes : les polymères glucidiques comestibles, présents naturellement dans l'aliment tel qu'il est consommé ; les polymères qui ont été obtenus à partir de matières alimentaires brutes, par des moyens physiques, enzymatiques ou chimiques ayant un effet physiologique et un impact positif sur la santé et les polymères glucidiques synthétiques ayant un effet physiologique et un impact positif sur la santé (démontré par les autorités compétentes en fonction des critères scientifiques généralement acceptés) (Marine., 2016).

II.2.3.4. Distribution des fibres alimentaires dans le blé

11.5-15.5 % de la fibre alimentaire totale (FAT) ont été trouvés dans le grain de blé entier ; les polysaccharides arabinoxylanes (5.5-7.4 %), la cellulose (1.67-3.05 %) et le β-glucane (0.51-0.96 %), et la lignine Klason (0.74-2.03 %) étaient les principaux composants de la paroi cellulaire et de la FAT (Andersson *et al.*, 2013). Divers composants ont montré des distributions différentes dans les tissus du grain. Dans le péricarpe et le testa, les couches extérieures sont constituées des matériaux de la paroi cellulaire (Barron *et al.*, 2007), qui sont riches en lignine (12%), en cellulose (30%) et en une forme complexe d'AR appelée glucuronoarabinoxylane (DuPont et Selvendran., 1987). Les cellules aleurones qui forment la couche externe de l'endosperme sont également enrichies en fibres (35-40 %) (Barron et al., 2007). Les cellules aleurones sont principalement composées de 29 % de β-glucane, 65 % d'Arabinoxylane et ~2 % de cellulose et de glucomannane (Bacic et Stone., 1981). En comparaison, les cellules de l'endosperme de l'amidon ne contiennent que 2 à 3 % de polysaccharides de la paroi cellulaire, les principaux composants étant l'AR (70 %) et le β-glucane (20 %) avec 7 % de glucomannane et 2 % de cellulose (Mares et Stone., 1973).

En plus des polysaccharides de la paroi cellulaire, deux autres glucides (fructanes et amidon) constituent la fraction de fibres alimentaires du blé. Environ 0.84-1.85 % de fructanes (fructo-oligosaccharides) existent dans le grain entier (Andersson et al., 2013), et 3.4-4 % d'amidon ont été détectés dans le son de blé (Haskå et al., 2008). En outre, une petite proportion de l'amidon est également présente dans les cellules de l'endosperme amidonné qui a été considéré comme un amidon résistant et ne peut pas être digéré dans le tractus gastro-intestinal supérieur et être fermenté dans le côlon (Wang et Sun., 2019).

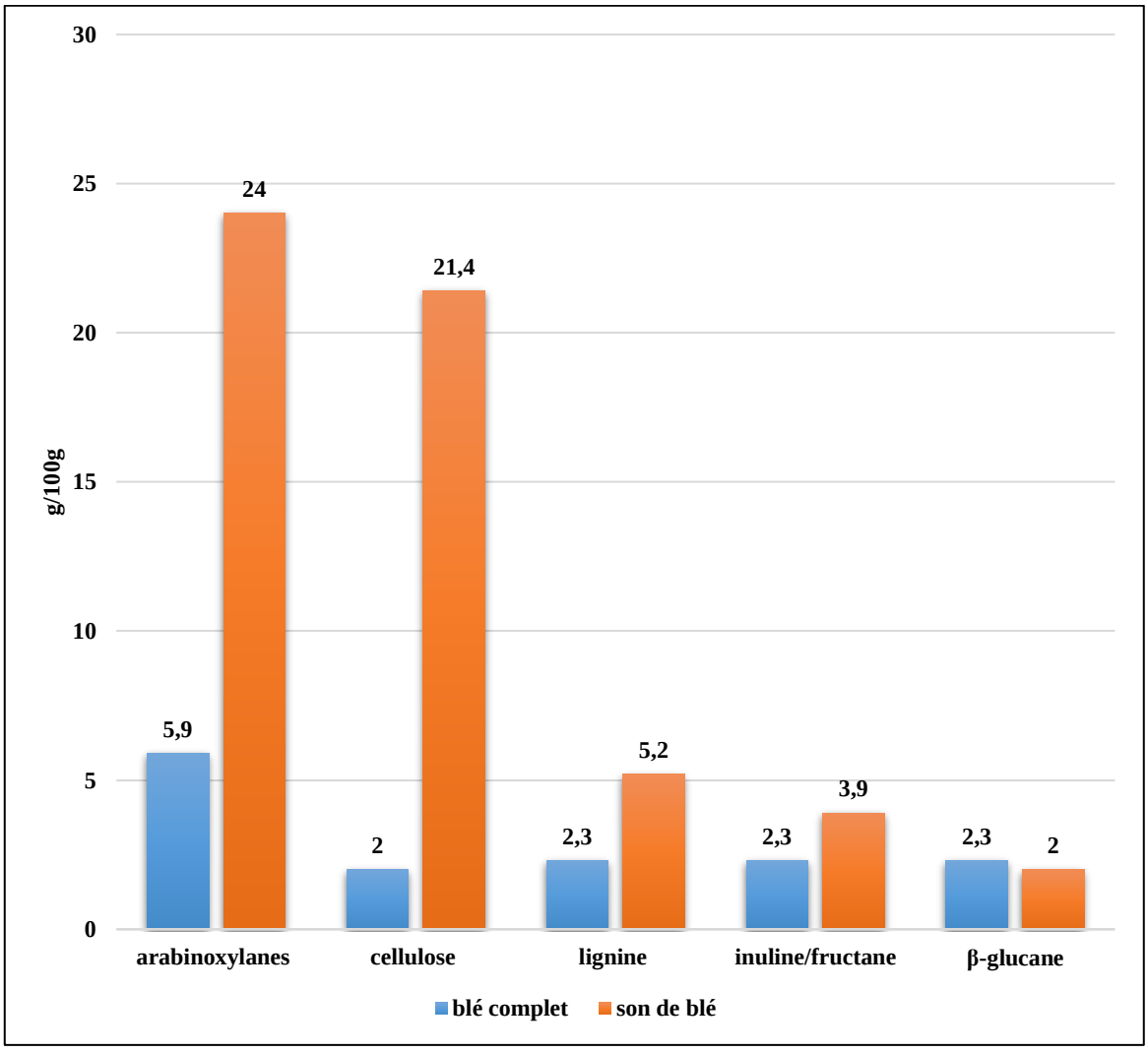


Figure 11: Composants des fibres dans le blé complet et le son.

II.2.3.5. Sources de fibres alimentaires

Les céréales complètes, les fruits et légumes constituent la plupart des sources de fibres alimentaires **(tableau 7)**.

Tableau 7: Différentes sources de fibre alimentaires (Galanakis., 2019).

Source alimentaire	Exemples
Céréales	Blé Riz Orge Avoine Seigle Pseudocéréales
Légumineuses	Haricots en grappe Fèves larges Pois chiches, Lentilles Soja Lupins Haricots mungo Haricot lotus Germes Haricots secs Haricots verts Pois
Fruits	Oranges Kiwis Pommes Agrumes Pruneaux
Légumes	Tomates Choux Luzerne Carottes Pommes de terre Doigts de dame

La cellulose est présente avec les hémicelluloses dans les céréales notamment le blé dur et le blé tendre. Les couches extérieures dures constituent la principale source de fibres dans les produits à base de céréales complètes. L'avoine et l'orge contiennent de fortes concentrations d'une sorte de sucre soluble et visqueux, le β-glucane. Les pectines, une source principale de fibres alimentaires dans les fruits et les légumes, ont des propriétés similaires (Rodney et Samaan., 2017).

Tableau 8: Principales sources des fibres alimentaires exprimées en g/100 g (Schlienger., 2008)

Sources des fibres alimentaires	Teneur en fibres (g/100 g)
Son de blé	40–45
Son d'avoine	17–25
Pruneau sec, amande	15–16
Abricot sec dénoyauté	14
Flocon d'avoine, chips	10
Figues sèches	10
Artichaut cuit	9
Haricot rouge cuit, pois chiche cuit, cacahuète, groseille Haricot	9
blanc cuit, salsifis appertisé	8–9
Lentilles cuites, datte sèche, noisette, cassis	7–8
Pain complet	7–8
Framboise, raisin sec, châtaigne, petits pois cuits, mûre, noix	6–7
Topinambour, céleri-rave cru, flageolet (conserve)	5
Pétales de maïs, pois cassé cuit, biscotte, olive verte, semoule	4–5
Panais cuit, fenouil cru, épinard cuit, haricot vert cuit	3–4
Baguette, pain de campagne, petit pois	3–4
Patate douce crue, chou vert, brocoli, chou-fleur cuit	2–3
Salades et crudités (moyenne)	2–3
Poireau, carotte, champignon de Paris cru	2–3
Riz complet Fruit (moyenne)	1,8–5

II.2.3.6. Structure

Les fibres sont présentes dans toutes les plantes, et lorsqu'elles sont exploitées commercialement, les plantes deviennent des cultures de fibres.

La cellulose est un homoglycane constitué de β (1→4) unités de D-glucopyranose liées. La cellulose est un polysaccharide de poids moléculaire élevé composé d'unités de cellobiose répétées produisant une chaîne linéaire dans laquelle des liaisons hydrogène moléculaires intra-chaîne et inter-chaîne se produisent pour relier les chaînes (Donato et al., 2015), qui produisent à leur tour des microfibrilles, des matrices et des parois cellulaires multicouches **(Figure 12)**.

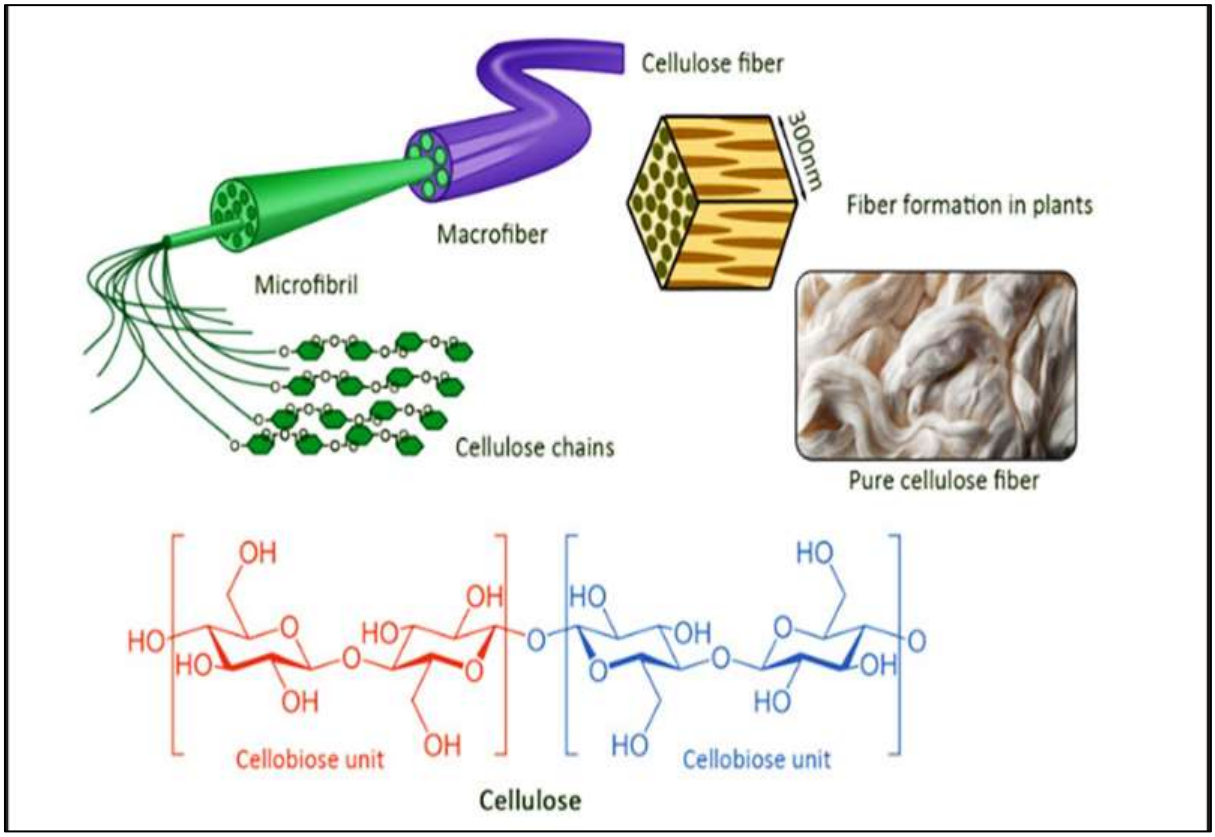


Figure 12: Formation de fibres à partir de chaînes de cellulose et structure de la cellulose (Kersten., 2016).

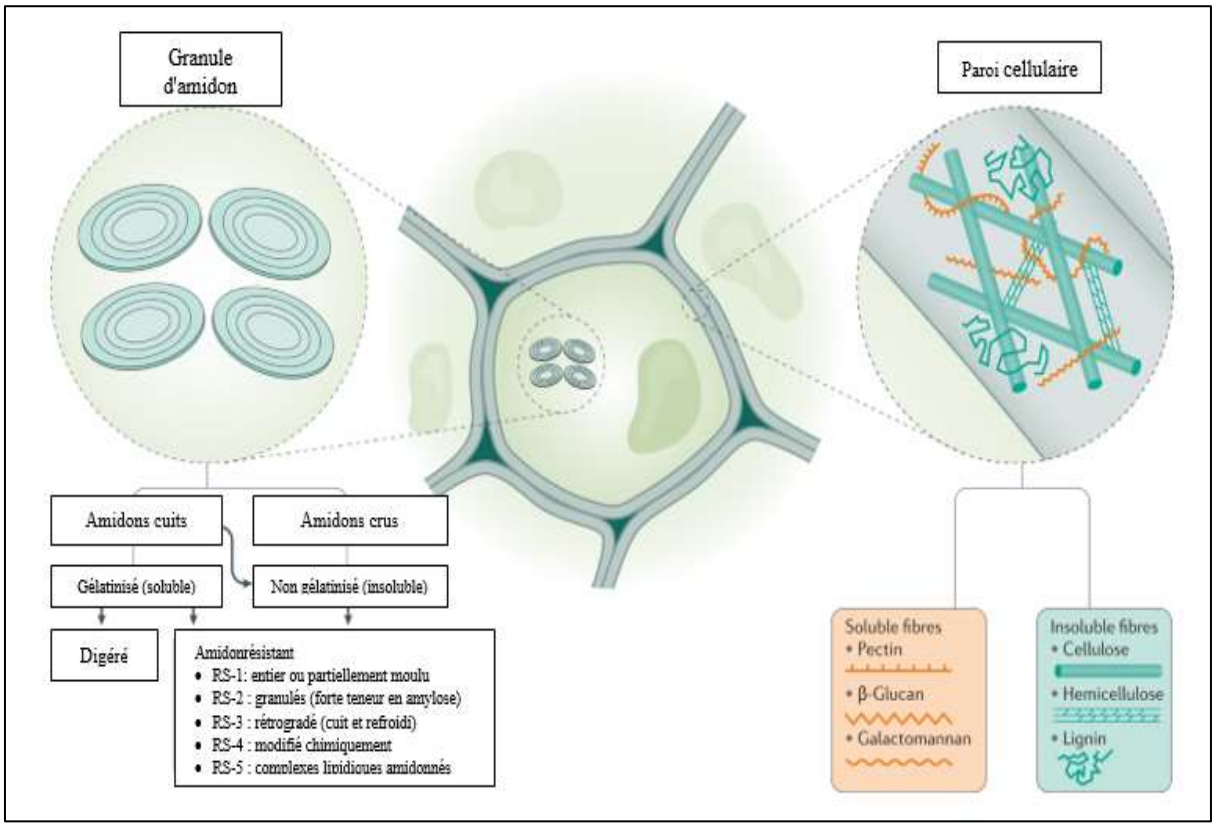


Figure 13: Les caractéristiques physicochimiques des fibres alimentaires et leur localisation dans la cellule végétale (Gill et al., 2021).

Ces molécules sont disposées de manière très systématique et symétrique dans les structures supramoléculaires, depuis les petites fibrilles initiales (d'une longueur comprise entre 1.5 et 3.5 nm), les microfibrilles (entre 10 et 30 nm), jusqu'aux bandes macrofibrillaires dont la longueur peut être de l'ordre de plusieurs centaines de nm (Klemm et al., 2005). Le processus de polymérisation et de formation des structures varie en fonction de la source végétale. Les fibres végétales de différentes sources varient en termes de longueur, de couleur, de composition, de force, de durabilité et de résistance à l'eau. Les fibres cellulosiques sont plus résistantes que les fibres lingo-cellulosiques. Les fibres de bois sont des fibres relativement grandes. Au cours de la formation de la paroi secondaire, la lignine se dépose sur la paroi primaire de la cellulose, ce qui rend la fibre épaisse, dure et résistante. La fibre de coton est une élongation des cellules de l'enveloppe de la graine et un exemple d'une des plus longues cellules (Kersten., 2016).

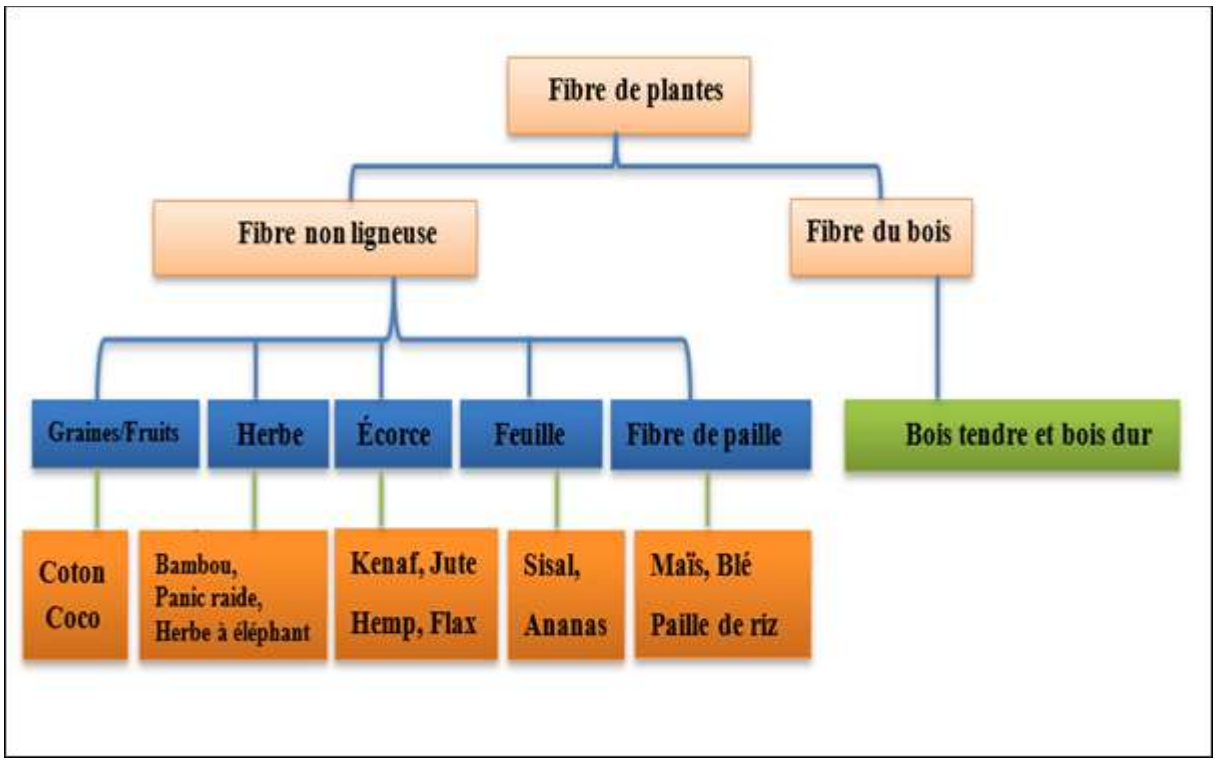


Figure 14: Différentes sortes de fibres obtenues à partir de plantes (Kersten., 2016)

II.2.3.7. Composition

Les fibres alimentaires comprennent de nombreux composants, qui sont souvent classés en fonction de leurs caractéristiques de solubilité dans le système digestif humain. Il est important de noter l'expression "dans le système digestif humain". En d'autres termes, bien qu'une fibre puisse être qualifiée de "soluble", elle n'est pas soluble dans l'eau au sens moléculaire du terme, mais forme une suspension colloïdale dans l'eau.

Les fibres solubles et insolubles ont des caractéristiques chimiques différentes et des effets physiologiques différents sur le corps humain. Les fibres alimentaires totales (FAT) désignent la quantité totale de fibres alimentaires, tant solubles qu'insolubles, dans un système alimentaire (Kennedy et Knill., 2002).

Comme indiqué précédemment, chaque source de FA est différente en raison de sa complexité chimique, qui comprend des polysaccharides comme l'hémicellulose et la cellulose et des oligosaccharides. Les FA comprennent également des molécules qui ne sont pas des hydrates de carbone, comme la lignine.

II.2.3.8. Classification

Les types de fibres alimentaires peuvent être classés en fonction de leur source, de leur composition, de leur solubilité, de leur fermentescibilité, du site de digestion, des produits de la digestion et de leurs effets physiologiques. Mais aucune de ces catégories ne peut être utilisée seule pour la classification des fibres alimentaires car elles ne couvrent pas tous les aspects des fibres alimentaires. Les deux systèmes de classification des fibres alimentaires les plus populaires sont basés sur leur solubilité (soluble et insoluble) dans l'eau et leur fermentescibilité (fermentescible et non fermentescible) dans le côlon humain. Les fibres alimentaires fermentables sont considérées comme hydrosolubles par nature, tandis que les fibres alimentaires non fermentescibles ou les moins fermentescibles sont considérées comme insolubles dans l'eau (Tungland et Meyer., 2002).

Tableau 9: Classification des fibres alimentaires (Galanakis., 2019).

Classe	Exemples
Fibres alimentaires insolubles	Celluloses Hémicelluloses Lignines Amidons résistants Arabinoxylanes Polysaccharides non amylacés
Fibres alimentaires solubles	Inuline Pectine β-glucane Galactomannanes Glucomannanes Polydextrose Psyllium Fructo-oligosaccharides (FOS) Dextrine (résistante)

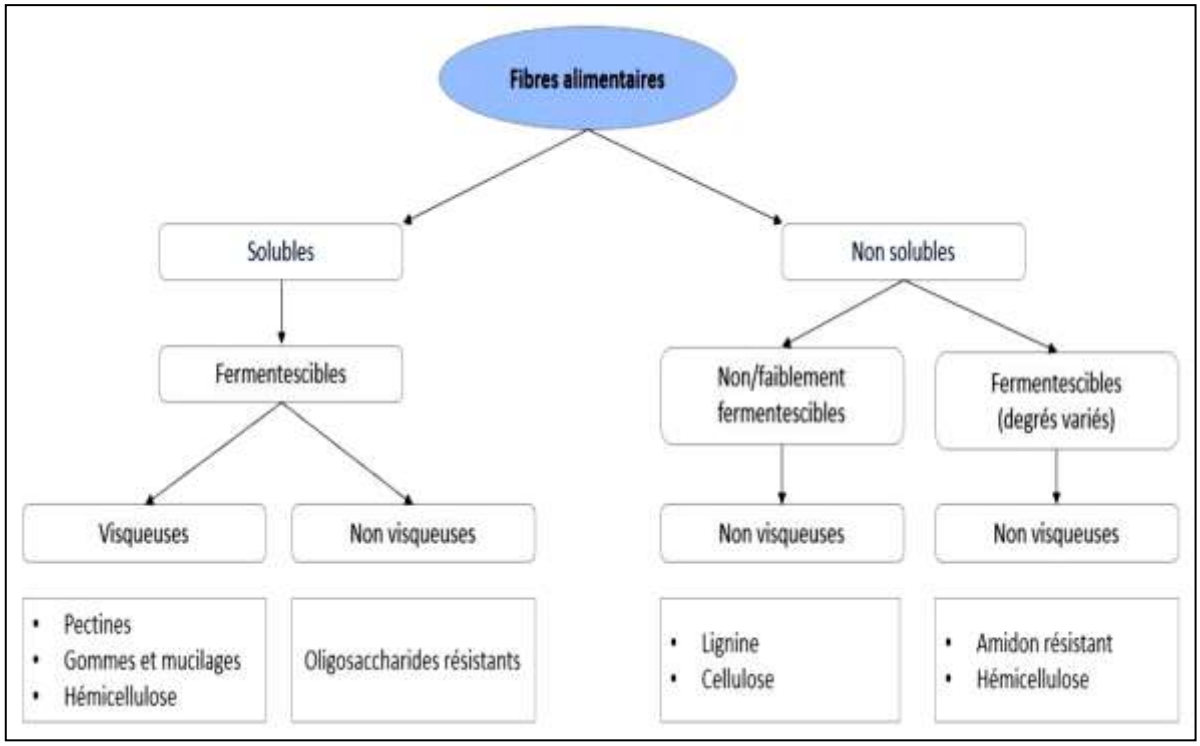


Figure 15: Différentes classifications des fibres alimentaires d'après (Ben Ahmed., 2018)

Tableau 10: Effets des fibres alimentaires solubles et insolubles sur la santé d'après (Eswaran et al., 2013).

Fibres alimentaires		
Fibres insolubles	Son de blé	Réduisent les risques de cancer du sein ou du colon
Fibres solubles	Légumes et fruits	Réduisent les risques de maladie cardiovasculaire. Protègent contre les maladies du cœur et certains cancers ; abaissent le taux de lipoprotéines de base de densité et de cholestérol

II.2.3.9. Fibres alimentaires solubles

Les fibres alimentaires solubles, qui sont solubles dans une solution aqueuse, résistent au processus de digestion dans l'intestin grêle et subissent le processus de fermentation dans le gros intestin provoqué par les micro-organismes intestinaux. Les sources de fibres alimentaires solubles comprennent les fruits, les légumes, les légumineuses, etc... (Mudgil et Barak., 2013).

Sur la base de leur capacité à former un gel visqueux lors de leur dissolution dans l'eau, les fibres solubles sont ensuite divisées en deux types, à savoir les fibres visqueuses et les fibres non visqueuses. Les fibres alimentaires solubles améliorent le temps de transit dans le tube digestif humain et retardent la vidange gastrique, ce qui entraîne une réduction du taux d'absorption du glucose. Les fibres alimentaires solubles comprennent le bêta-glucane, la pectine, les gommes et l'inuline (Galanakis., 2019).

Les fibres alimentaires solubles ont une action physiologique sur les lipides plasmatiques et offrent une protection contre les maladies cardiovasculaires (Galanakis., 2019).

a) Gommes

Il existe une variété de gommes qui pourraient être considérées dans le terme « fibres alimentaires". La gomme de guar est l'une d'entre elles, elle est considérée comme une fibre alimentaire soluble. Structurellement, la gomme de guar est un polygalactomannane obtenu à partir des graines de Cyamopsis tetragonalobus ; chimiquement, le galactomannane est constitué de monomères de mannose liés par des liaisons β-D-(1,4)-glycosidiques, et les monomères de galactose sont liés au mannose. Aussi, ce composé est largement utilisé dans la transformation des aliments car il confère des changements texturaux tels que l'épaississement et la stabilisation (Gupta et al., 2015).

b) Pectine

La pectine est un type d'hétéropolysaccharide conformé par trois domaines importants : Les homogalacturonanes et les ramnogalacturonanes I et II. On la trouve dans la paroi cellulaire primaire de toutes les plantes supérieures (Verkempinck et al., 2018). Aussi, la pectine est considérée comme un hydrocolloïde important largement utilisé dans la production alimentaire (Kim et al., 2016). La pectine peut être utilisée comme un FA dans les modifications structurelles qui peuvent être effectuées par des processus chimiques ou enzymatiques (Ngouémazong et al., 2011).

c) β-glucane

Les β-glucanes sont des polysaccharides à liaison β constitués de monomères de glucose. Les b-glucanes constituent un groupe diversifié de molécules dont la masse moléculaire, la solubilité et la viscosité peuvent varier. Le β-glucan est considéré comme une importante fibre soluble associée à la réduction des taux de cholestérol sérique et à l'atténuation de la réponse glycémique. Ces effets se manifestent dans le tractus gastro-intestinal supérieur et sont probablement liés à la viscosité du β-glucan (Sapirstein., 2015).

c) L'inuline

L'inuline est un fructane polydispersé dont le degré de polymérisation (DP) est compris entre 2 et 60 et qui consiste principalement en D-fructose relié par des liaisons β-(2→1) à un résidu D-glucose terminal (Waterhouse et Chatterton., 1993). Fibre soluble au goût neutre, l'inuline résiste à la digestion et est fermentée dans le côlon pour produire de grandes quantités d'acides gras à chaîne courte (AGCC) (Roberfroid., 1993), ces dernier jouent un rôle vital dans le maintien de l'intégrité et du métabolisme du côlon, il peuvent être l'effecteur du rôle bénéfique des fibres dans la prévention du cancer du côlon (Watson et al., 2014).

II.2.3.10. Fibres alimentaires insolubles

Les fibres alimentaires insolubles sont insolubles dans l'eau et ne présentent pas de formation de gel en raison de ce comportement. Les fibres alimentaires insolubles ne subissent pas de fermentation dans le gros intestin par la microflore. Lorsqu'elles sont consommées, elles augmentent le volume des selles, aident à l'élimination des déchets et réduisent le temps de transit intestinal. Les fibres alimentaires insolubles comprennent les celluloses, les hémicelluloses, la lignine, la cutine, la subérine, la chitine et le chitosan (Galanakis., 2019).

Les fibres alimentaires insolubles sont associées aux effets sur le système digestif humain ; leur consommation entraîne une meilleure laxation et une protection contre le cancer colorectal (Galanakis., 2019).

a) Cellulose

La cellulose est une sorte d'homo-polysaccharide composé de monomères de β-glucose liés par des liaisons β-1,4-O-glycosidiques (Kian et al., 2018). C'est peut-être la biomolécule organique la plus abondante dans la nature est le principal composant de la biomasse terrestre et une partie des parois cellulaires de toutes les plantes. La cellulose, un FAI, est résistante à la digestion, mais environ 50 % est fermentée dans le côlon, où se produit une digestion partielle (Mudgil et Barak., 2013).

b) Hémicellulose

L'hémicellulose est un hétéro-polysaccharide formé de plusieurs types de monomères, normalement de cinq ou six résidus monomères, dont le glucose, le galactose, le xylose, l'arabinose, le mannose et l'acide glucoronique, entre autres (Sjostrom., 1993). Il peut être trouvé dans la paroi cellulaire des plantes et comme partie de la biomasse ligno-cellulosique, qui est considérée comme le deuxième composant le plus abondant de la biomasse dans la nature juste après la cellulose (Farhat et al., 2017).

c) Oligosaccharides

Les oligosaccharides ou glycanes sont définis comme des glucides constitués de 3 à 10 unités monosaccharidiques, linéaires ou ramifiées, reliées par des liaisons α- et/ou β-glycosidiques.

Les principaux composants monosaccharides des oligosaccharides sont le D-glucose, le D-galactose, le D-mannose, le L-fucose, le L-xylose, la N-acétyl-D-glucosamine, la N-acétylgalactosamine, l'acide D-glucuronique, l'acide D-galacturonique, l'acide L-iduronique, l'acide N-acétyl-D-neuramique, l'acide N-acétyl-D-muraminique et l'acide 3-désoxy-α-D-manno-oct-2ulopyranosonique ; et parmi les principaux oligosaccharides, on trouve les fructooligosaccharides (FOS), les galactooligosaccharides (GOS), le lactulose, le raffinose et d'autres (Zhao et al., 2017). Un FOS est un oligosaccharide linéaire composé de 10 à 20 unités de fructose liées par des liaisons β 1-2. Des exemples de fructooligosaccharide sont le 1-kestose, le nistose et le fructosil-nistose (Park et al., 2016). Les GOS sont principalement obtenus par hydrolyse enzymatique du lactose à l'aide de β-galactosidase (Lans et Vodovotz., 2018); le produit de cette réaction est un mélange de GOS avec un degré de polymérisation variable (Guo et al., 2018).

d) Amidon résistant

L'amidon résistant fait également partie des fibres alimentaires et est défini comme un amidon qui n'est pas hydrolysé dans l'intestin grêle humain (Buksa., 2018). L'amidon résistant est classé en sous-groupes : amidon encapsulé (AR1), granules résistants (AR2), amylose rétrogradé (AR3), amidon chimiquement modifié et complexe amylose-lipide (AR3) (Zhao et al., 2018).

Les amidons résistants sont une classe d'amidons qui ne sont pas facilement attaqués par les amylases dans l'intestin grêle. Comme d'autres composants des fibres tels que la cellulose, ils subissent un certain degré de digestion dans le gros intestin (Kennedy et Knill., 2002).

e) Arabinoxylane

Les arabinoxylanes (hétéroxylanes, pentosanes) sont quantitativement les principaux polysaccharides non cellulosiques des parois cellulaires primaires et secondaires des céréales et des graminées, qu'elles proviennent de l'endosperme, de l'aleurone, du scutellum, de l'axe embryonnaire, du péricarpe (enveloppe de la graine) ou des parties végétatives de la plante (Khan et Shewry., 2013).

Les arabinoxylanes des céréales sont constitués d'un squelette d'unités β-D-xylopyranosyle liées en 1,4. Le squelette est substitué, le plus souvent, par des unités α-L-arabinofuranosyl uniques en C-(O)-2 et C-(O)-3. D'autres substituants sur le squelette comprennent l'acétate, l'acide glucuronique, l'acide 4-O-méthylglucuronique et des chaînes latérales oligomères complexes constituées d'arabinose, de galactose, de glucose, d'acides uroniques et de xylose (Awika et al., 2011).

Les arabinoxylanes réticulés conservent leur viscosité dans le tractus gastro-intestinal, ce qui atténue la réponse glycémique postprandiale et ils peuvent réduire le risque de développer un diabète de type 2 (Prückler et al., 2014).

f) Lignine

La lignine, considérée comme un composé phénolique hautement ramifié, est en fait la source la plus abondante de produits chimiques aromatiques dans la nature, et structurellement, la lignine est composée d'unités phénylpropanoïdes liées par des liaisons carbone-carbone ou carbone-oxygène (Chen et al., 2018).

La lignine est un polymère aromatique amorphe, de poids moléculaire élevé, composé principalement de trois monolignols : les alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique (Davin et Lewis., 2005). La structure de la lignine contient des groupes fonctionnels tels que phénolique, méthoxyle, carboxyle, p-hydroxy-phényle et hidroxyle aliphatique (Li et al., 2018).

Il s'agit d'un composant renforçant la paroi cellulaire, qui, dans le blé, apparaît principalement dans les couches extérieures du grain. La nature complexe de la lignine et des structures lignine-polysaccharide-protéine rend difficile la détermination de sa structure précise (Amthor., 2003 ; Davin et Lewis., 2005).

La distribution de la lignine dans le blé varie entre 2 et 9 % dans les différentes couches de son, mais n'est pas présente dans l'aleurone selon la littérature. L'acide férulique, ainsi que l'acide déhydroferulique, est un composant des lignocelluloses, servant à réticuler la lignine et le polysaccharide, conférant ainsi une rigidité aux parois cellulaires. Comme la cellulose, la lignine est fermentée à de faibles niveaux par les bactéries du côlon et est capable d'augmenter le volume des matières fécales. De plus, les lignines réduisent le temps de transit intestinal, ce qui est important pour réduire le temps d'exposition des carcinogènes alimentaires adsorbés dans les fibres. Les lignines possèdent également une activité antioxydante in vitro et peuvent atténuer les dommages oxydatifs de l'ADN et le développement de maladies liées à un stress oxydatif accru (Sapirstein., 2015).

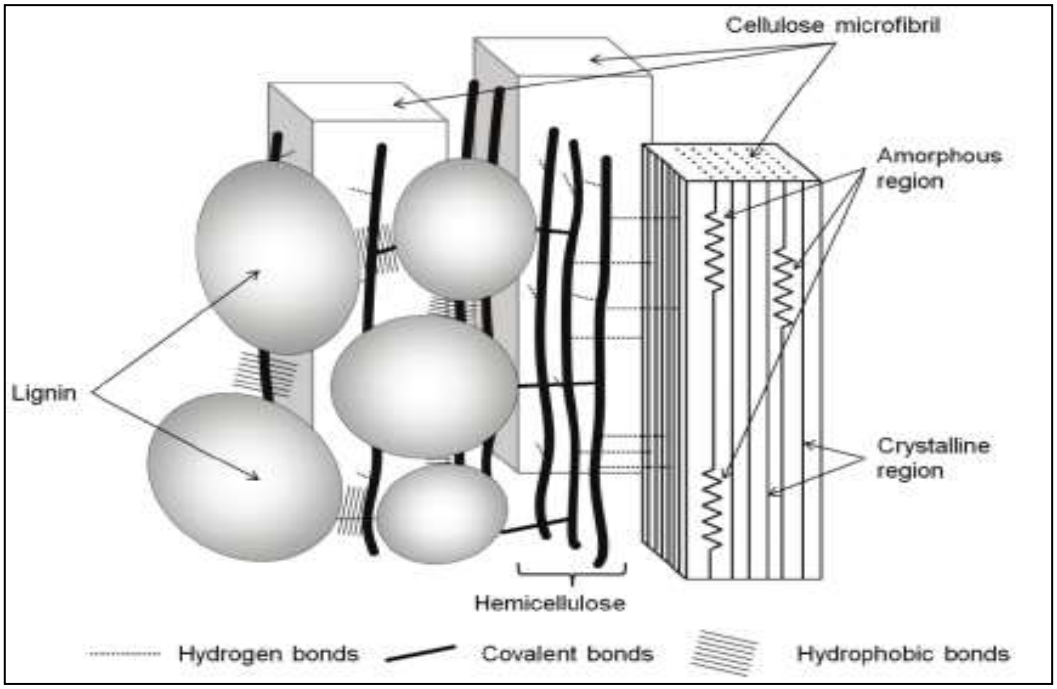


Figure 16: Illustrations schématiques de la lignine polysaccharide (Tsubaki et Azum., 2011)

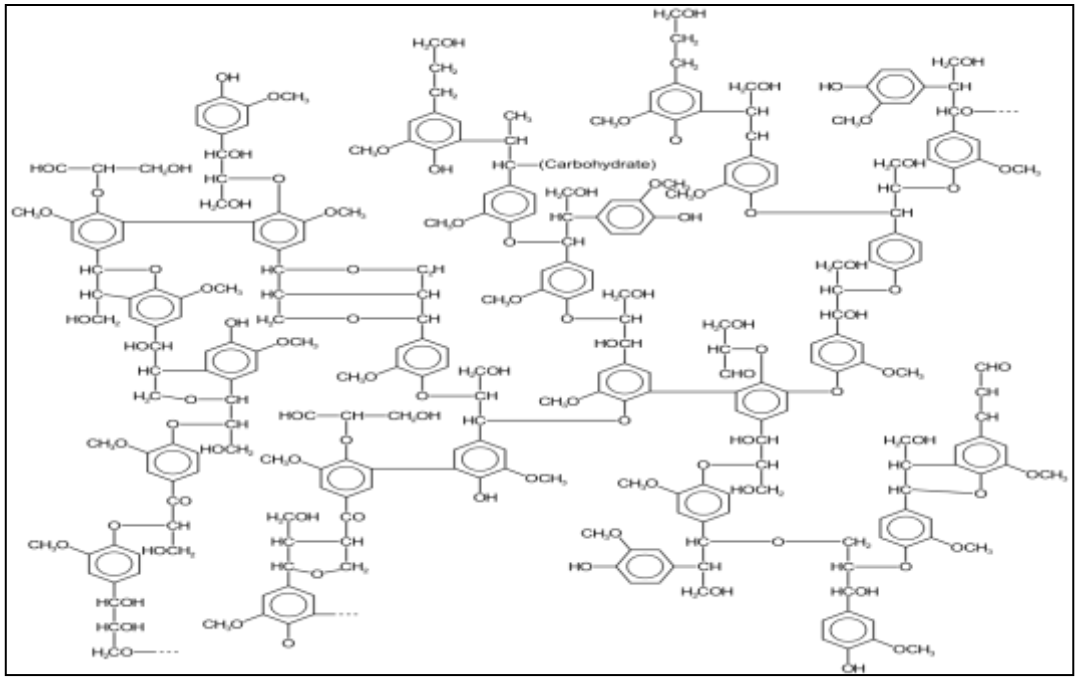


Figure 17: Structure de la molécule de la lignine (Tsubaki et Azum., 2011).

II.2.4. Substances phytochimiques

La teneur substantielle en vitamines, acides phénoliques, Alkylrésorcinol, stérols végétaux, lignanes et autres composants potentiellement bénéfiques pour la santé font du son de blé un ingrédient particulièrement intéressant pour la production alimentaire. Cependant, l'accessibilité de ces composés peut être limitée car ils sont piégés ou encapsulés par des structures complexes de la paroi cellulaire.

II.2.4.1. L'acide phytique

Le son de blé contient également du phytate (acide phytique), principalement situé dans la couche aleurone. Le phytate est capable de lier les minéraux, et peut donc réduire leur disponibilité dans les aliments contenant du son (Santala., 2014).

L'acide phytique représente la principale forme de stockage du phosphore dans le blé et les autres céréales. L'acide phytique représente la substance phytochimique la plus concentrée dans le blé et le son de blé en particulier, avec des niveaux moyens de 0.7 et 4.2 %, respectivement **(figure 18)** (Sapirstein., 2015).

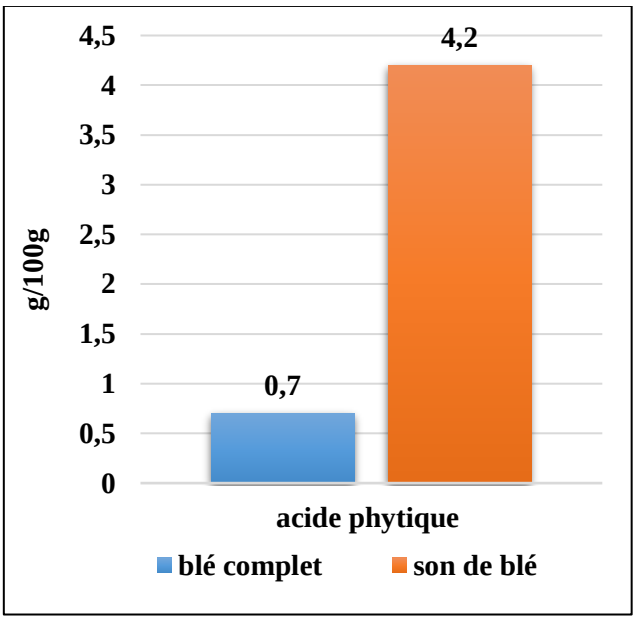


Figure 18: Teneur en acide phytique dans le blé complet et le son (Fardet., 2010).

De nombreuses études animales ont montré que l'acide phytique était capable d'activités antinéoplasiques sur de multiples types de cancers du sein, du côlon, du foie, de la prostate, de la peau et des muscles squelettiques (Sapirstein., 2015).

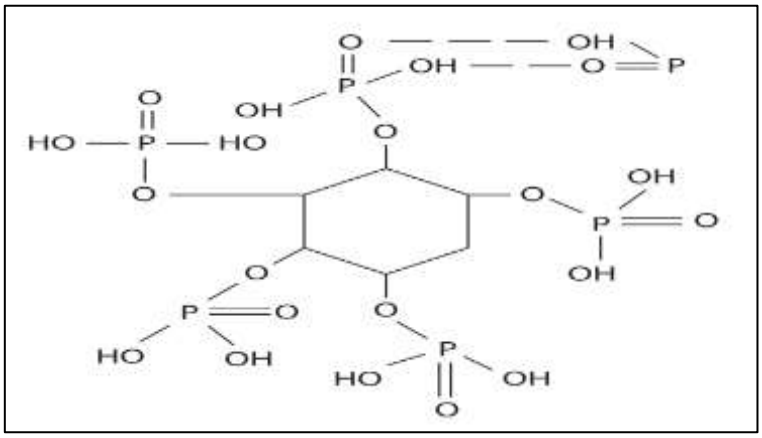


Figure 19: Structure chimique de la phytate (Serna-Saldivar., 2010).

II.2.4.2. Les vitamines

Les fractions de son de blé sont riches en vitamine B6, en thiamine, en folate et en vitamine E, ainsi qu'en certains composés phytochimiques (Stevenson et al., 2012).

Le blé dur contient une quantité importante de vitamines concentrées principalement dans le son, le germe et l'aleurone. Par conséquent, la teneur en de nombreuses vitamines est plus faible dans les produits à base de semoule et de pâtes raffinées que dans les produits à base de grains entiers ou de céréales complètes. Le blé dur ne contient ni vitamine C, ni vitamine A, ni vitamine B12 (Truswell., 2002 ; McKevith., 2004). Cependant, il est une source de vitamine B1 (thiamine), de vitamine B2 (riboflavine), de vitamine B3 (niacine), de vitamine B6 (pyridoxine) et de vitamine E, un antioxydant important (Truswell., 2002 ; Torres et al., 2007), et il contient des carotènes, dont certains peuvent agir comme précurseurs de la vitamine A (Graham et Welch., 2000 ; Okarter et al., 2010). La teneur en vitamines du blé peut varier considérablement en fonction du cultivar, du site et des conditions de croissance (Singh., 2011).

II.2.4.3. Alkylrésorcinols

Les Alkylrésorcinols (AR) sont un groupe de lipides phénoliques amphiphiles présents dans de nombreux organismes différents, tels que les plantes, les champignons et les bactéries. Les AR sont des biomarqueurs de la présence de blé et de seigle complets dans les produits alimentaires et ont été proposés pour estimer la consommation de produits à base de céréales complètes (Dey et Mikhailopulo., 2009).

Les AR ont un large éventail d'activités biologiques telles que des activités antibactériennes, antifongiques, antioxydantes, inhibitrices d'enzymes, chaque homologue des AR ayant une intensité différente de ces activités (Parikka et al., 2006), raison pour laquelle, il est intéressant de déterminer le profil des AR. Les AR alimentaires ont également été associés à la prévention du cancer (Zhao et al., 2019 ; Kruk et al., 2017).

II.2.4.4. Férules de stérol

Le son de blé a également été signalé comme étant une source importante de férules de stérol (Tsuzuki et al., 2017). Les férules de stérole ont été largement décrits pour l'huile de son de riz, et divers avantages pour la santé, y compris des activités hypo-cholestérolémiques-hypo-lipidémiques et anti-inflammatoires ont été associés au γ-oryzanol. Les férules stériles sont également considérées comme de puissants antioxydants en raison de la capacité du groupe phénolique de l'acide férulique à donner de l'hydrogène (Nyström et al., 2005).

II.2.4.5. Les tocophérols

Les tocophérols des céréales sont principalement situés dans le son et le germe, le blé et le seigle ont été décrits comme les sources les plus riches en tocophérols dans l'alimentation humaine. Les tocophérols sont généralement employés comme antioxydants lipophiles dans les systèmes alimentaires et les tocophérols "naturels", isolés de sources naturelles, ont été décrits comme plus actifs biologiquement que leurs homologues synthétiques, bien que la bioactivité diffère entre les homologues (α-, β-, γ- et δ) (Luthria et al., 2015).

II.2.4.6. Les composés phénoliques

Les propriétés saines du blé complet ont également été associées à son contenu phénolique (Rebolleda et al., 2020).

Les composés phénoliques sont des composés aromatiques avec un ou plusieurs groupes hydroxyle et les composés phénoliques les plus courants dans les grains de céréales sont les acides phénoliques et les flavonoïdes (Xu et al., 2019).

Les acides phénoliques ont suscité beaucoup d'intérêt en raison de leurs propriétés antioxydantes, anti-inflammatoires, antimutagènes et anti-carcinogènes, ainsi que de leur capacité à manipuler certaines fonctions enzymatiques clés dans les cellules (Liyana-Pathirana et Shahidi., 2006). Les acides phénoliques forment un groupe diversifié qui peut être subdivisé en deux groupes principaux : les acides hydroxybenzoïques et les acides hydroxycinnamiques. Les premiers comprennent les acides p-hydroxybenzoïque, protocatéchuïque, vanillique, syringique et gallique, tandis que les acides p-coumarique, caféique, férulique et sinapique appartiennent au second groupe **(figure 20)** (Velioglu et al., 1998).

Typiquement, dans les céréales, les acides phénoliques sont présents sous des formes libres et liées à la paroi cellulaire dans les couches externes des caryopses (Călinoiu et Vodnar., 2018).

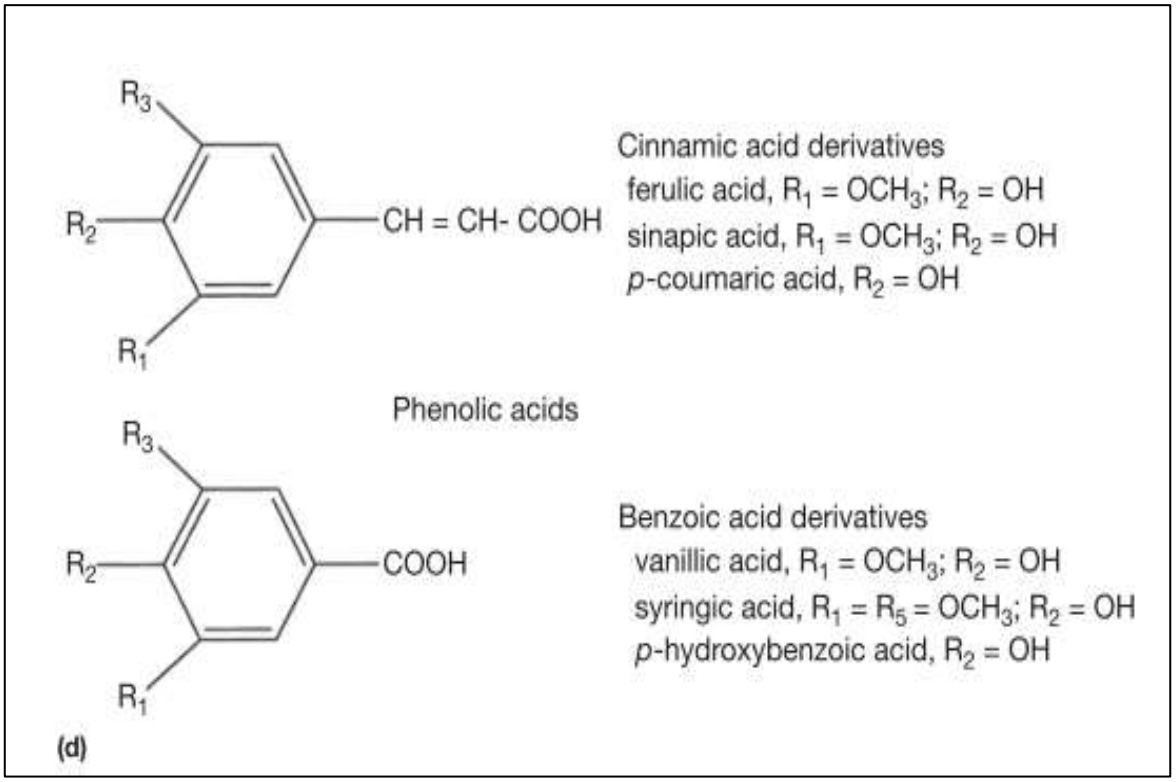


Figure 20: Structures moléculaires de base de quelques acides phénoliques (Sang et Zhu., 2014).

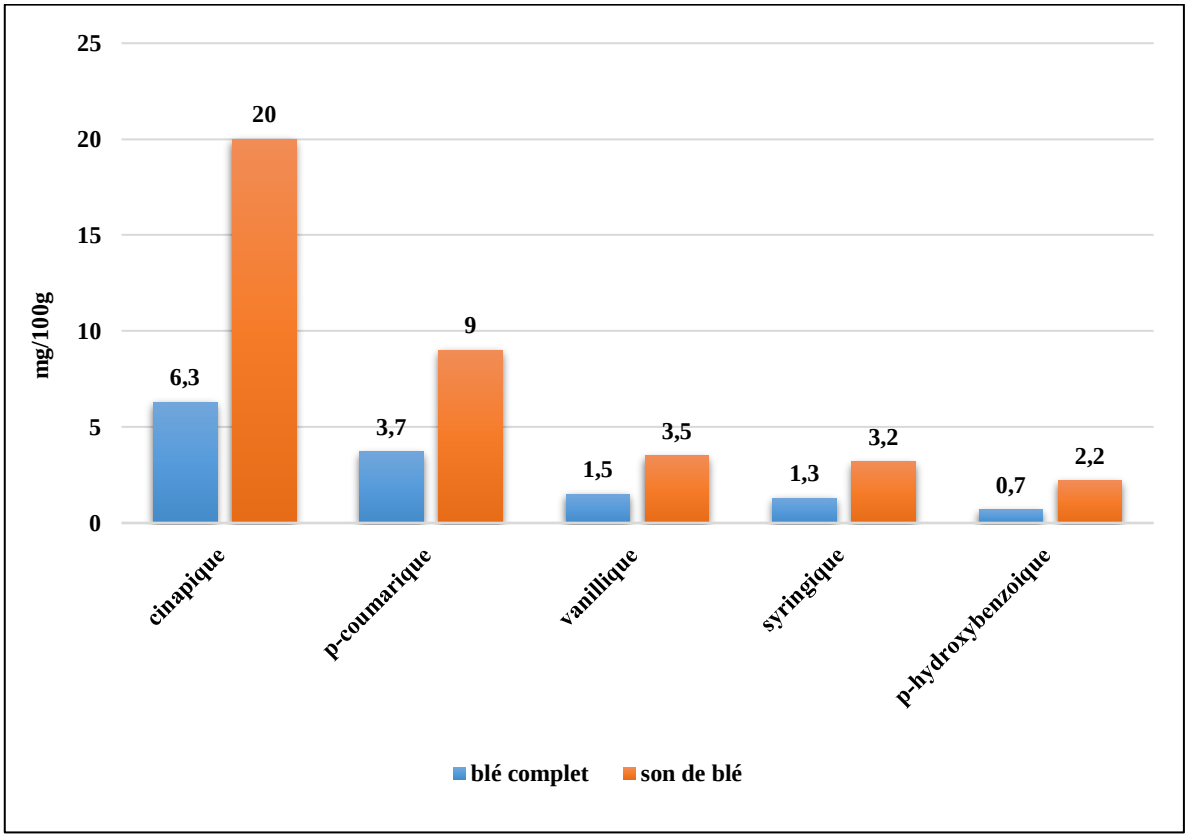


Figure 21: Les acides phénoliques présentent dans le blé complet et le son.

Les acides phénoliques se présentent sous forme soluble-conjuguée et sont caractérisés dans le grain entier, l'endosperme, le son, le germe, la farine et le gluten. La farine de blé entier a été examinée et les couches de son et de germe représentaient 83% du total des acides phénoliques mesurés. L'acide férulique est l'acide phénolique dominant dans le blé, on le trouve principalement sous forme liée, et on dit qu'il représente 70 à 90% des acides phénoliques totaux présents (Sang et Zhu., 2014).

Le son de blé est une bonne source d'acide férulique et la majorité est estérifiée à la composante hémicellulose de la paroi cellulaire. Cet acide phénolique lié peut être libéré au cours du processus alimentaire (Wang et al., 2014**)**, ou par l'enzyme estérase dans l'intestin grêle et le côlon humains (Price et al., 2008). La teneur en acide férulique peut différer entre les cultivars de blé. Une importante variabilité génétique et agronomique de la teneur en acide férulique a été détectée chez le blé dur et le blé tendre (Xu et al., 2019).

II.2.4.7. Les Caroténoïdes

Les caroténoïdes sont des pigments naturels de couleur jaune, orange et rouge. Plus de 700 caroténoïdes ont été identifiés dans les plantes (Burkhard et Böhm., 2007). Les caroténoïdes sont divisés en carotènes et en xanthophylles oxygénées, et seuls quelques-uns sont présents chez l'homme, notamment les α-carotènes, les β-carotènes, le lycopène, la lutéine, le zéaxanmince et la β-cryptoxanthine (Abdel-Aal et al., 2007). Les fruits et les légumes sont les principales sources alimentaires de caroténoïdes, mais certaines céréales comme le blé en contiennent une grande quantité. La variété de blé et l'environnement de culture peuvent modifier de manière significative les profils antioxydants tels que les caroténoïdes dans le son de blé (Atienza et al., 2007). La lutéine et la zéaxanthine sont les principaux caroténoïdes présents dans le blé dur (Xu et al., 2019).

Dans les plantes, les caroténoïdes jouent un rôle essentiel dans la récolte de la lumière pour la photosynthèse et dans la protection de la chlorophylle contre les dommages oxydatifs, qui sont liés à la réduction des risques de cancers, de maladies cardiovasculaires et de dégénérescence maculaire lorsqu'ils sont consommés par l'homme. Plusieurs facteurs, dont le temps d'extraction, la température d'extraction, la taille des particules, l'agitation et le pré-trempage dans l'eau, ont été étudiés pour leur influence sur l'extraction des caroténoïdes du blé dur et il a été constaté que le trempage dans l'eau pendant 5 minutes avant l'extraction par solvant organique avait le plus grand impact sur les rendements en caroténoïdes (Burkhard et Böhm., 2007).

II.2.4.8. Autres substances

Le son peut également contenir des contaminants, tels que des mycotoxines, des résidus de pesticides, des métaux lourds, etc. ainsi que des levures et des bactéries. Cependant, il a été démontré que ces caractéristiques indésirables peuvent être largement surmontées en utilisant des techniques de traitement et de fractionnement ciblées (Santala., 2014).

Chapitre III : Activités biologiques et effet des fibres alimentaires du son de blé dur sur la santé humaine

III.1. Le son de blé dur et activité biologiques

Les céréales ont été reconnues comme des sources importantes de composants bioactifs bénéfiques pour la santé, tels que les composés phénoliques, les caroténoïdes, le β-glucane, les vitamines et les fibres alimentaires (Xu et al., 2019).

Des études d'observation suggèrent une association inverse entre la consommation d'aliments à base de céréales complètes et le risque de maladies chroniques, notamment le syndrome métabolique, l'obésité, le diabète sucré de type2, les maladies cardiovasculaires (MCV), et certains cancers .Les céréales complètes contiennent un certain nombre de composants susceptibles d'influencer le risque de maladies chroniques, notamment des fibres, des vitamines, des minéraux, des lignanes et des substances phytochimiques (Watson et al., 2014).

La consommation de produits à base de blé complet est associée à un certain nombre de bienfaits pour la santé qui peuvent être liés en partie à la teneur en substances phytochimiques (Awika., 2011).

Il est bien connu que les avantages des produits à base de céréales complètes pour la santé sont principalement dus à plusieurs composés précieux du son. Ce dernier est riche en antioxydants naturels, en phytoœstrogènes et en lignanes, qui peuvent exercer de nombreux effets bénéfiques sur diverses fonctions corporelles (Wang et Sun., 2019).

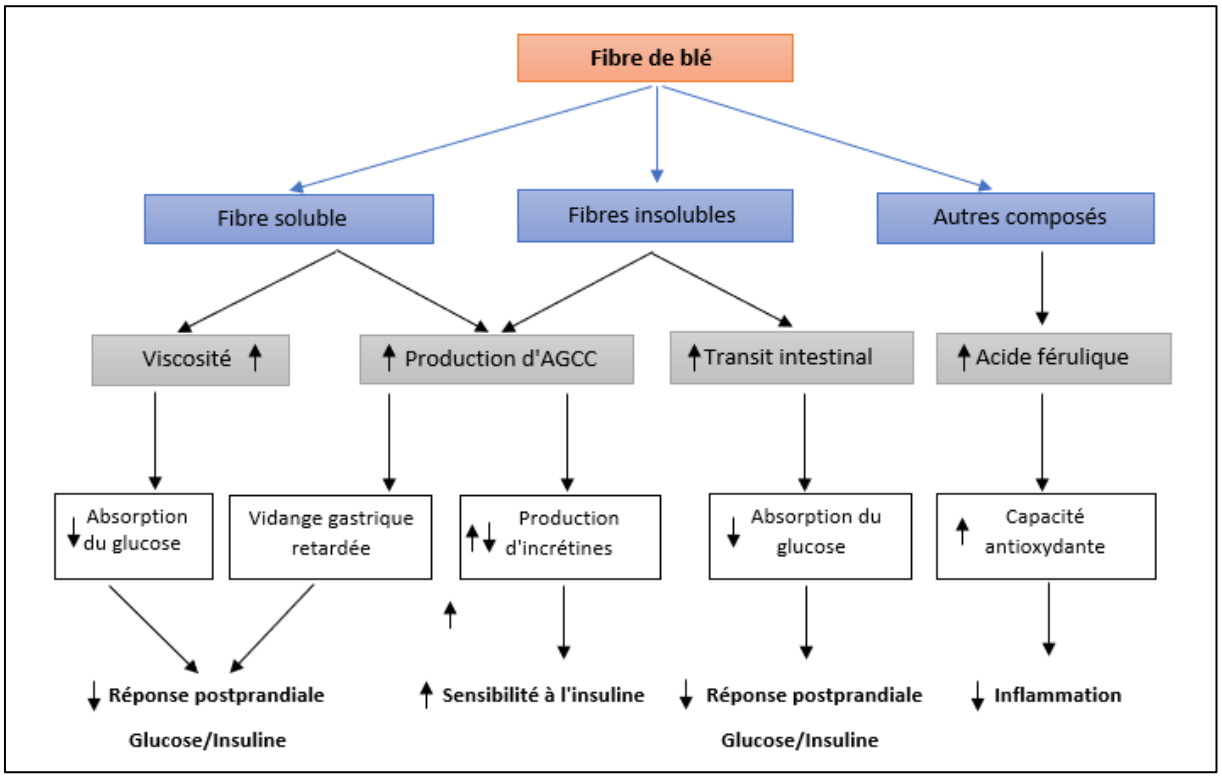


Figure 22: Effets postprandiaux potentiels de la consommation de fibres de blé.

III.1.1. L'activité antioxydante

Récemment, les antioxydants présents dans les céréales, les légumes et les fruits ont fait l'objet d'une attention considérable en raison de leur potentiel dans diverses applications, notamment l'amélioration de la qualité et de la sécurité des produits alimentaires, la prévention des maladies chroniques et la promotion de la santé humaine en générale (Sang et Zhu., 2014). Le blé et le son de blé ont démontré une forte activité antioxydante (Zhu et al., 2010). Les principaux composants antioxydants du son de blé sont les acides phénoliques (Martínez-Tomé et al., 2004), qui sont composés d'acide férulique, vanillique et p-coumarique, l'acide férulique étant prédominant (Onyeneho et Hettiarachchy., 1992 ; Adom et al., 2003). Outre les acides phénoliques, certaines variétés de blé contiennent également des caroténoïdes, dont la lutéine, la zéaxanthine et la cryptoxanthine (Zhu et al., 2010). Diverses études ont rapporté que ces composés présentent des capacités antioxydantes significatives, notamment en piégeant les radicaux libres (par exemple, en réduisant l'oxydation des lipides), en chélatant les ions métalliques et en activant les enzymes antioxydantes, ce qui suggère des propriétés antioxydantes du son de blé (Sang et Zhu., 2014).

Tableau 11: Propriétés antioxydantes des antioxydants non enzymatiques du son de blé dur (Sang et Zhu., 2014)

Antioxydants	Propriétés antioxydantes
Vitamine C	-Régénération de la vitamine E -Régénération du GSH
Vitamine E	-Piégeage des radicaux libres -Stabilisation des membranes
Vitamine A	-Piégeage des radicaux libres
Flavonoïde	-Chélation des ions métalliques -Activation de l'enzyme antioxydante -Piégeage des radicaux libres
Glutathion (Forme réduite)	-Substrat de la GPx -Régénération des vitamines C et E
Acide lipoïque	-Piégeage des radicaux libres -Régénération des vitamines C et E -Régénération du GSH -Chélation des ions métalliques
Ferritine	-Chélation du fer
Sélénium	-Cofacteur GPx
Lignan	-Activation de l'enzyme antioxydante -Piégeage des radicaux libres
Acide phytique	-Chélation des ions métalliques
Acide phénolique	-Activation des enzymes antioxydantes -Piégeage des radicaux libres -Chélation des ions métalliques -Réduction du cholestérol

GSH, glutathion réduit ; GPx, glutathion peroxydase.

III.1.2. Les effets mécaniques

Les effets physiologiques des fibres alimentaires du son de blé se situent principalement au niveau de la vidange gastrique et du temps de transit de l'intestin grêle, ce qui se traduit par une meilleure tolérance au glucose et une diminution de la digestion de l'amidon (Roberfroid., 1993).

Le son de blé montre des effets bénéfiques sur la prévention de maladies telles que le cancer colorectal, les maladies cardiovasculaires, l'obésité et certaines maladies gastro-intestinales, notamment la maladie diverticulaire, la constipation et le syndrome du côlon irritable (Stevenson et al., 2012).

Le son de blé peut également fonctionner comme un pré-biotique. Les pré-biotiques sont des ingrédients alimentaires non digestibles qui ont un effet bénéfique sur la santé de l'hôte en stimulant sélectivement la croissance ou l'activité de bactéries intestinales saines et amicales (probiotiques) dans le côlon (Xu et al., 2019).

III.1.3. Son de blé et prébiotiques

La microflore colique a des effets profonds sur la santé humaine. Les pré-biotiques sont définis comme des ingrédients alimentaires non digestibles qui sont bénéfiques pour l'hôte en stimulant sélectivement la croissance ou l'activité d'une ou d'un nombre limité de bactéries dans le côlon (Costabile et al., 2008). De plus en plus de preuves soutiennent le rôle des prébiotiques sur la santé intestinale et le cancer du côlon. La consommation de son de blé sera fermentée en acides gras à chaîne courte par la microflore de l'intestin, ce qui entraînera des modifications physiologiques du contenu colique, affectant le gonflement, la capacité de rétention d'eau et la viscosité (Rosa et al., 2013).

III.1.4. Santé digestive

L'association entre le son grossier (fibres) et la santé digestive a été reconnue pour la première fois par Hippocrate qui a observé en 371 avant J.-C. que le corps humain fonctionne mieux avec du pain fait de farine grossière plutôt que de farine finement moulue. Une bonne santé digestive est associée à une absorption appropriée des nutriments, à la motilité intestinale et à la fonction immunitaire, ainsi qu'à un micro-biote colique équilibré. Les fibres de son sont les composants alimentaires les plus importantes pour une bonne santé digestive car elles favorisent la laxation, la fermentation en acides gras à chaîne courte bioactifs (AGCC) et le maintien d'un écosystème de micro-biote colique sain (Dreher., 2018).

La cellulose et l'hémicellulose peuvent directement stimuler le transit intestinal, tandis que l'inuline doit être fermentée en acides gras à chaîne courte par la microflore afin de prévenir de nombreux troubles gastro-intestinaux (Wang et Sun., 2019).

Le son de blé est associé à la réduction des symptômes du syndrome du côlon irritable. Le son de blé a également augmenté le poids des selles et diminué le temps de transit chez des témoins sains et des patients souffrant de SII et de constipation chronique. La consommation de 45 g de son de blé brut non transformé a permis de soulager nettement les symptômes de diverticules. Un soulagement marqué des symptômes de la maladie diverticulaire. Une consommation accrue de son de blé soulage la constipation pendant la grossesse et augmente la fréquence des défécations (Babu et al., 2018).

III.2. Propriétés physicochimiques des fibres alimentaires

Les principales propriétés physico-chimiques des fibres alimentaires sont la solubilité, la viscosité et la capacité de rétention d'eau, le gonflement et la fermentescibilité, qui sont responsables des fonctions physiologiques causées par les fibres alimentaires.

III.2.1. Solubilité

La solubilité des fibres alimentaires est la caractéristique la plus importante, qui est directement liée aux fonctions physiologiques qu'elles provoquent. En fonction de leur solubilité, il existe deux types de fibres alimentaires : solubles et insolubles (Galanakis., 2019).

Par exemple, les fibres alimentaires solubles ne sont pas un composant unique mais un mélange de différents types de polysaccharides ayant des poids moléculaires différents. En général, la solubilité des fibres alimentaires fait référence à leur tendance à s'hydrater facilement dans l'eau. Dans des conditions favorables, elles peuvent également conduire à la formation de véritables solutions. La structure moléculaire du polysaccharide est le facteur responsable de sa solubilité dans l'eau (Morris et Norton., 1983).

La solubilité des fibres alimentaires n'affecte pas seulement les fonctions physiologiques dans le métabolisme humain mais a également des fonctions technologiques dans les produits alimentaires (Jiménez-Escrig et Sánchez-Muniz., 2000). La consommation de fibres alimentaires solubles entraîne une augmentation de la viscosité de la phase aqueuse et une diminution du taux de plasma-cholestérol et de la réponse glycémique (McCarty., 2005). Les fibres alimentaires insolubles ont des propriétés uniques de porosité et de faible densité, ce qui contribue à augmenter le volume des selles et à réduire le transit intestinal (Olson et al., 1987).

III.2.2. Viscosité

La viscosité est la résistance fournie par un fluide à son propre écoulement et est considérée comme l'une des caractéristiques importantes liées aux fibres alimentaires solubles (Dikeman et Fahey., 2006). Lorsqu'elles sont dispersées dans une phase aqueuse, les fibres alimentaires solubles (par exemple, le β-glucane, la gomme de guar, le psyllium, les pectines, etc.) entraînent la formation de solutions visqueuses. La capacité gélifiante des fibres alimentaires est due à leur tendance à absorber l'eau, ce qui donne une masse gélatineuse ou des solutions visqueuses ou gélifiantes. Lorsqu'ils sont consommés, ces types de fibres alimentaires augmentent non seulement le volume du contenu du tractus gastro-intestinal, mais aussi la viscosité du contenu du tractus (Olson et al., 1987).

L'espace ou le volume occupé par les molécules de fibres alimentaires est généralement décrit par la viscosité intrinsèque (Morris., 1990). La viscosité des digesta contenant des fibres alimentaires n'est pas la même dans toutes les parties de l'intestin. Ces composants ne subissent aucune modification dans la région supérieure de l'intestin, mais ils peuvent être dégradés ultérieurement, par exemple la pectine qui est solubilisée à un pH acide dans l'estomac ou à un pH neutre dans l'intestin grêle. Le degré de dégradation des fibres alimentaires peut avoir un effet nutritionnel causé par une diminution de la viscosité qui est finalement liée aux actions physiologiques. L'environnement ionique et le pH du tractus gastro-intestinal affectent également la viscosité ainsi que la solubilité du composant fibre alimentaire dans le tractus (Galanakis., 2019).

La concentration, la composition, le poids moléculaire et la structure des composants des fibres alimentaires sont des facteurs importants qui influencent leurs valeurs de viscosité dans le tractus gastro-intestinal et, en fin de compte, l'action physiologique provoquée par les fibres alimentaires (Galanakis., 2019).

III.2.3. La gélation

La gélification peut être décrite comme l'association d'unités de polymère pour former un réseau de zones de jonction. Les régions situées à l'intérieur des zones de jonction sont des compartiments qui contiennent de l'eau et d'autres solutés. Le gel qui en résulte à une structure tridimensionnelle et ferme. De nombreuses fibres et gommes solubles dans l'eau ont la capacité de former des gels. Les gommes végétales sont souvent utilisées comme agents gélifiants dans le développement de produits alimentaires. La formation du gel dépend de nombreux facteurs tels que le type de gomme, la concentration, la température, la présence d'ions (par exemple, le calcium), le pH ou la présence d'autres gommes. Les caractéristiques du gel dépendent également de ces facteurs (Kennedy et Knill., 2002).

III.2.4. Capacité de rétention d'eau et de liaison

Plusieurs termes peuvent être utilisés pour l'interaction entre les fibres alimentaires et l'eau, tels que l'hydratation, l'adsorption d'eau, la fixation d'eau, la rétention d'eau, l'absorption d'eau, etc. Tous ces termes ont des significations similaires ou présentent très peu de différences selon les conditions dans lesquelles ils sont décrits (Rey et Labuza., 1981).

Les termes les plus importants utilisés pour les fibres alimentaires sont la capacité de rétention d'eau et de liaison à l'eau. Certaines définitions sont mentionnées dans la littérature pour ces termes, qui peuvent être adoptées pour différencier la capacité de rétention d'eau et la capacité de liaison à l'eau. Les chercheurs ont proposé une définition basée sur le principe de l'action gélifiante des polysaccharides, qui convient également aux fibres alimentaires (Rey et Labuza., 1981). Selon eux, la capacité de liaison à l'eau est la quantité d'eau dans la structure du gel retenue par celui-ci après exposition à une force ou un stress externe. L'exemple de force externe peut inclure la force centrifuge.

La capacité de rétention d'eau et de liaison à l'eau des fibres alimentaires est affectée par plusieurs facteurs mais le facteur le plus important est la source de la fibre alimentaire, qui influence sa composition chimique. Les autres facteurs qui influencent la capacité de rétention et de fixation de l'eau des fibres alimentaires sont la microstructure, les conditions de traitement et la méthode utilisée pour déterminer la capacité de rétention et de fixation de l'eau. Certains chercheurs ont également signalé que la capacité de rétention d'eau des fibres alimentaires dépend de l'origine ou de la source des fibres alimentaires et de la technique utilisée pour les mesurer. Ils ont également suggéré que la structure de la fibre alimentaire est plus importante que la composition chimique de la fibre alimentaire (Robertson et Eastwood., 1981).

III.2.5. Fermentescibilité

La fermentescibilité des fibres alimentaires est une propriété importante, qui leur permet de servir de substrat pour le processus de fermentation. Les différents types de fibres alimentaires présentent différents degrés de fermentation, c'est-à-dire non fermentés comme la lignine et complètement fermentés comme les pectines. En général, les fibres alimentaires solubles sont plus fermentescibles par les bactéries présentes dans le côlon que les fibres alimentaires insolubles. Diverses fonctions intestinales, telles que le poids des selles, la fréquence des selles, le pH du côlon et l'énergie provenant des aliments non digestifs dépendent de la fermentescibilité et du mode de fermentation des fibres alimentaires (Edwards., 1995).

Sur la base de leur fermentescibilité dans le côlon, il existe trois catégories de fibres alimentaires : rapidement fermentescibles, lentement fermentescibles et non fermentescibles.

- **Les fibres alimentaires rapidement fermentescibles :** sont par exemple celles qui sont obtenues à partir de fruits et de légumes. Ces types de fibres ne contribuent pas de manière substantielle à la masse fécale par rapport aux autres types de fibres alimentaires.
- **Les fibres alimentaires lentement fermentescibles :** sont par exemple celles obtenues à partir du psyllium, du son de blé, etc. Celles-ci contribuent également au poids des matières fécales après fermentation.
- **Les fibres alimentaires non fermentescibles :** ou peu fermentescibles sont associées à une augmentation du volume et du poids des matières fécales dans le gros intestin humain, ce qui réduit le risque de problèmes liés à la constipation et de cancer du côlon.

En raison de la production de métabolites résultant de la fermentation colique, les fibres alimentaires fermentescibles provoquent des changements physiologiques dans la muqueuse présente dans le côlon (Bingham., 1990). Outre ces fonctions, quelques fibres alimentaires sont également associées à la stimulation de la croissance et de l'activité des bactéries bénéfiques (bifidobactéries, lactobacilles, etc.) présentes dans le tube digestif humain, qui exercent une fonction de barrière protectrice et stimulent la réponse immunitaire humaine (Salminen et al., 1998).

La vitesse et le degré de fermentation dépendent en grande partie de la structure de la source de fibres, qui est également associée au contact bactérien avec le substrat de fermentation (Guillon et Champ., 2000).

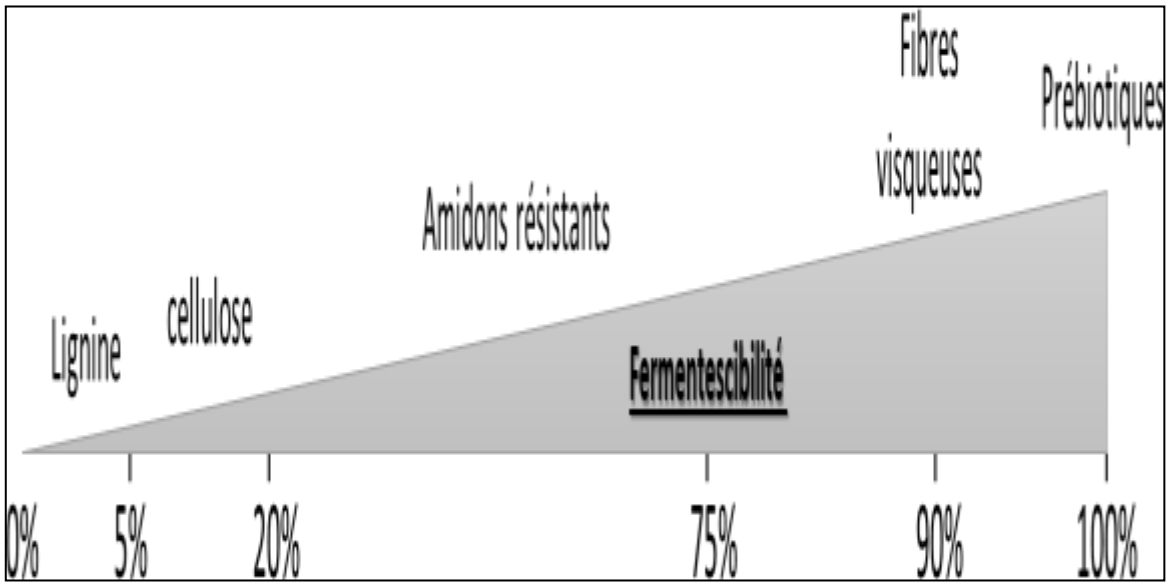


Figure 23: Degré de fermentescibilité des fibres alimentaires dans le colon d'après (Wang et al., 2009)

III.2.6. La capacité de liaison des minéraux et des acides biliaires

Outre leur capacité à se lier à l'eau, les composants des fibres alimentaires ont également la capacité de se lier à des molécules polaires et ioniques, telles que les acides biliaires et les minéraux. La diminution de la disponibilité des minéraux et l'absorption des composants ioniques sont dues à la présence de fibres alimentaires qui ont une capacité de liaison pour les ions et les matériaux polaires (Schneeman., 1986). La présence d'un groupe carboxylique libre et la quantité d'acide uronique présente dans les composants des fibres alimentaires dans l'alimentation sont généralement responsables de leur capacité à fixer les minéraux et les ions. Ces ions métalliques et ces molécules polaires peuvent être libérés et absorbés dans le côlon où certaines fibres alimentaires subissent une dégradation. Il a été signalé que l'absorption du fer et du zinc est augmentée par les fibres de betterave sucrière, tandis que l'absorption est inhibée par les fibres de son de blé en raison de la présence de phytate (Fairweather-Tait et Wright., 1990).

III.2.7. Capacité à fixer l'huile

Les composants des fibres alimentaires ont la capacité de lier l'huile dans leur structure. La composition chimique et la structure des composants des fibres alimentaires jouent un rôle dans la capacité de fixation de l'huile. La porosité de la structure des fibres alimentaires est un facteur plus important de la capacité de fixation de l'huile que la composition chimique ou l'affinité avec les molécules d'huile (Kennedy et Knill., 2002). Dans la capacité de liaison à l'eau des molécules de fibres alimentaires, la composition chimique ou l'affinité est un facteur primordial. La structure poreuse des composants des fibres alimentaires leur permet de fixer l'huile dans les pores présents dans leur structure. Cette capacité de liaison à l'huile des composants de fibres alimentaires peut être réduite par de simples opérations de prétraitement, comme le pré-trempage dans l'eau. Avant d'ajouter de l'huile aux ingrédients contenant des composants de fibres alimentaires, leur pré-trempage dans l'eau permet de réduire l'absorption d'huile par les composants de fibres en raison de l'occupation des pores par les molécules d'eau (Nelson., 2001).

III.2.8. Taille des particules et porosité

La taille des particules de fibres alimentaires joue un rôle important dans diverses fonctions physiologiques importantes de l'intestin humain, à savoir le temps de transit des digesta, la vitesse de fermentation des digesta et l'excrétion fécale. La surface des fibres alimentaires est directement liée à la vitesse de fermentation des fibres alimentaires (Cherbut., 1995).

Les grosses particules de son de blé régulent le temps de transit du digesta plus efficacement que les fines particules de son de blé. La taille des particules de fibres alimentaires dépend du type de paroi cellulaire de la plante et du niveau de transformation. Les opérations de transformation telles que le broyage, la fragmentation, le hachage, etc. influencent considérablement la taille des particules de fibres alimentaires (Guillon et Champ., 2000).

La porosité des fibres alimentaires est également une caractéristique importante qui affecte leur dégradation bactérienne et enzymatique, et elle dépend des types de cellules, de la composition des fibres alimentaires et du degré de transformation. Les pectines sont considérées comme ayant un rôle important dans la définition de la porosité des parois cellulaires des fibres alimentaires (Guillon et al., 1998).

III.3. Activités biologiques et effet des fibres alimentaires du son de blé dur sur la santé humaine

Le rôle des fibres alimentaires dans l'alimentation dépend de leur structure, de leurs propriétés physico-chimiques et de leur mode de consommation. Il semble bien que ce soit les propriétés physico-chimiques des fibres qui interviennent plus que leur composition chimique. Dans certaines conditions, les fibres agissent sur le transit intestinal et interviennent dans le métabolisme glucidique et lipidique. L'apport de fibres dans notre alimentation a des effets bénéfiques sur notre santé et ces effets sont dus à l'activité des microorganismes que nous hébergeons dans notre tube digestif (Mosoni., 2014).

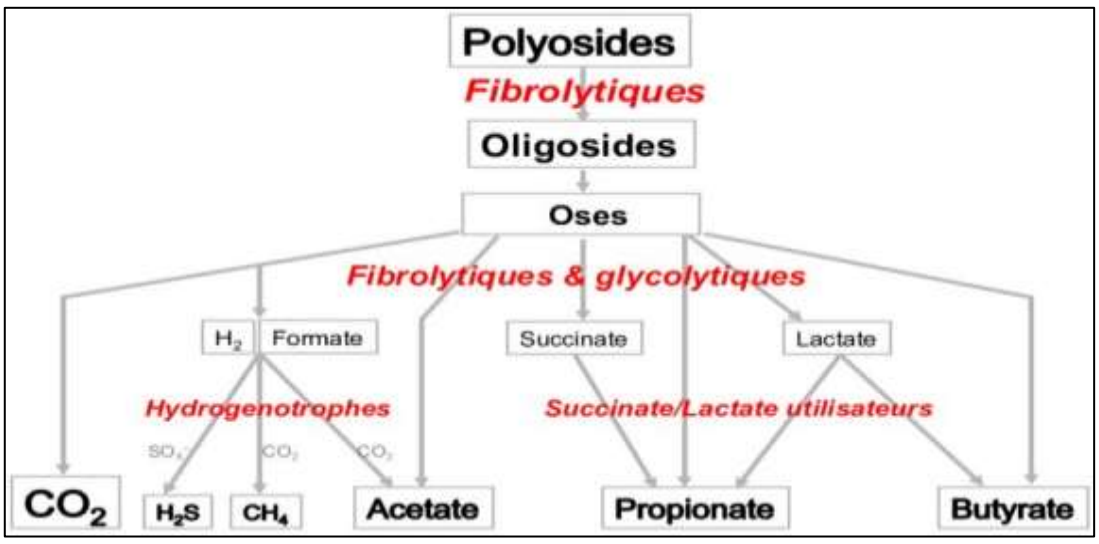


Figure 24: Chaîne trophique de dégradation des fibres alimentaires d'après (Mosoni., 2014)

Les aliments contiennent naturellement un mélange de fibres solubles et insolubles et les deux types de fibres ont un rôle important à jouer dans la santé dans le contexte d'un régime riche en fibres. Bien que la solubilité des fibres a été un temps considérée comme un facteur déterminant dans leur effet physiologique, des études plus récentes suggèrent que d'autres caractéristiques des fibres alimentaires, en particulier leur fermentescibilité et leur viscosité, sont d'une plus grande importance et que les composants végétaux (par exemple, les antioxydants) en association avec les fibres alimentaires peuvent également conduire à un risque plus faible de développer certaines maladies (McRorie et McKeown., 2017).

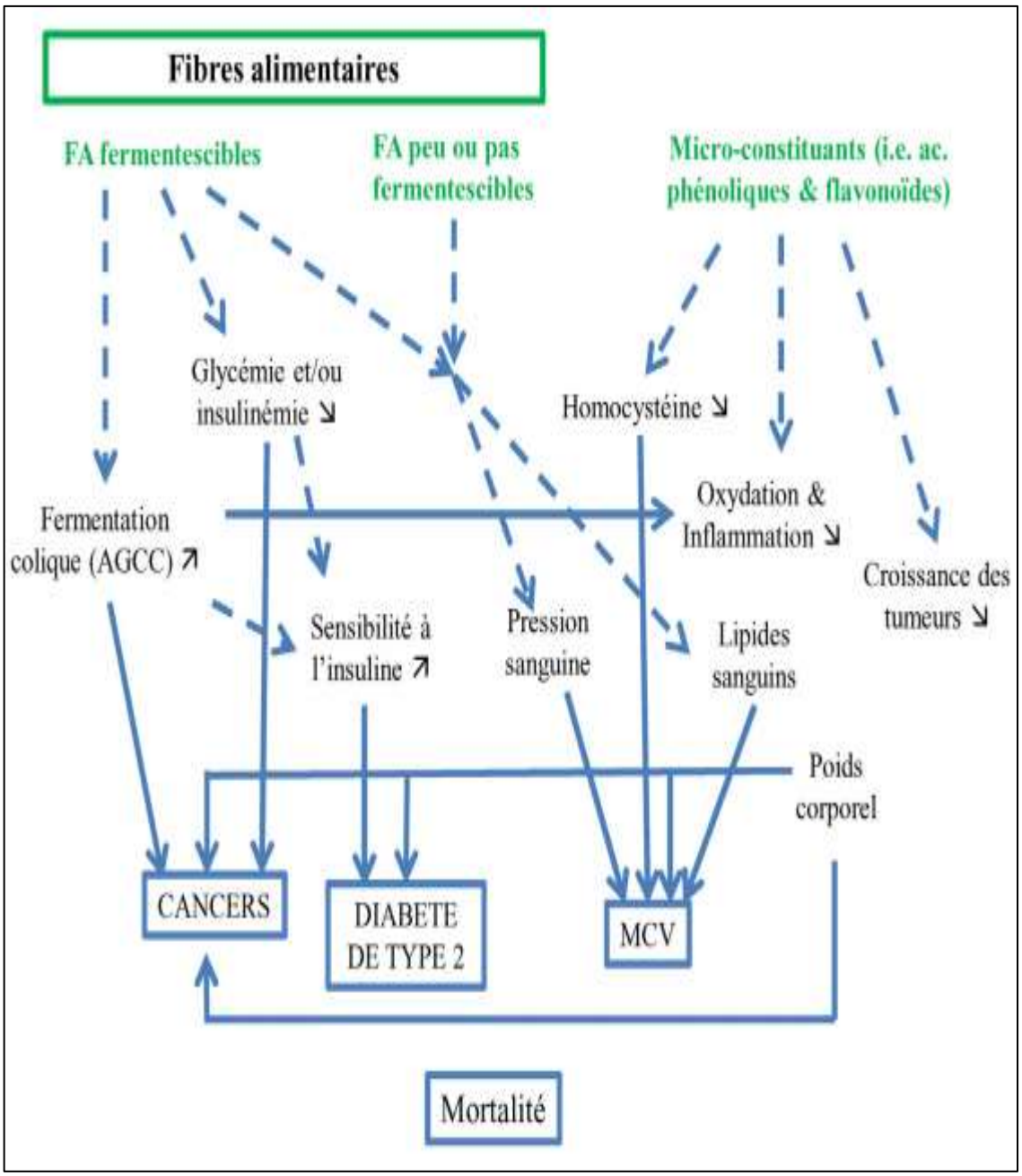


Figure 25: Mécanisme d'action des fibres alimentaires sur la prévention des maladies chroniques d'après (Champ., 2018).

III.3.1. Syndrome du côlon irritable (SCI)

Le syndrome du côlon irritable s'accompagne d'une douleur ou d'une gêne au niveau de l'estomac, accompagnée de diarrhée ou de constipation et de selles de nature différente. L'augmentation de la consommation de fibres est suggérée comme traitement initial de ce syndrome (Babu et al., 2018).

Les fibres alimentaires améliorent la santé intestinale, la régulation de l'appétit et la satiété prolongée. L'augmentation de la satiété peut être attribuée à la grande absorption d'eau des fibres alimentaires, à la réduction du temps de transit intestinal, à l'augmentation de la viscosité de la digestion dans l'intestin grêle et à l'augmentation du volume des selles et de la production d'acides gras à chaîne courte dans le côlon, en raison de la fermentation des fibres (Brouns et al., 2012). Les fibres alimentaires contribuent à la prévention des maladies du côlon (y compris le cancer), à la prévention du cancer gastrique, au traitement du syndrome du côlon irritable (SCI), à la réduction du risque d'hémorroïdes et de hernie hiatale (Almeida et al., 2013).

Les résultats récents d'une étude chez des patients adultes ont permis de montrer que l'instauration d'un régime riche en son de blé dur semble adéquate dans la prise en charge des patients souffrant du syndrome de l'intestin irritable et présente sans doute un intérêt thérapeutique et diététique (Menadi et al., 2021).

III.3.2. Diabète de type 2

Un apport adéquat en fibres, en particulier dans les aliments à faible indice glycémique, est associé à une plus faible incidence de diabète (Yao et al., 2014). Les preuves globales indiquent que la consommation de fibres alimentaires et de fibres de céréales est significativement inversement liée au risque de diabète (Kuijsten et al., 2015). Une analyse groupée de trois grandes études américaines suggère que les régimes alimentaires riches en aliments à indice glycémique ou à charge glycémique et pauvres en fibres céréalières (glucides raffinés) sont associés à un risque de diabète significativement plus élevé (Bhupathiraju et al., 2014).

L'association entre les fibres et le diabète s'explique en partie par l'effet des fibres sur la réduction du risque de prise de poids corporel et d'obésité (Bhupathiraju et al., 2014).

Une méta-analyse dose-réponse (17 études prospectives ; 488 293 participants ; 4 à 14 ans de suivi ; 19 033 cas de diabète) a mis en évidence une association inverse non linéaire significative entre la consommation de fibres totales et le risque de diabète pour une consommation inférieure à 25 g de fibres/jour et une réduction linéaire du risque au-delà de 25 g de fibres/jour (Yao et al., 2014).

La méta-analyse de l'étude InterAct (19 études de cohorte ; 617 968 participants ; âge 21-79 ans ; 4-16 ans de suivi ; 41 066 cas de diabète) a rapporté une réduction du risque de diabète par augmentation de 10 g de fibres/jour en fibres totales de 9%, en fibres de céréales de 25%, en fibres de fruits de 5% et en fibres de légumes de 7%. Les preuves globales indiquent que la consommation de fibres totales et de fibres de céréales est significativement inversement liée au risque de diabète (Yao et al., 2014).

Une étude finlandaise sur la prévention du diabète (522 sujets d'âge moyen en surpoids ; 172 hommes et 350 femmes ; âge moyen de 55 ans ; 3 ans) a montré qu'un programme de style de vie complet comprenant 15 g de fibres/1000 kcal, de l'exercice physique et une perte de poids de 5% réduisait significativement le risque de diabète de 58% sur 3 ans (Tuomilehto et al., 2001).

Une analyse groupée de trois grandes études de cohorte américaines suggère que les régimes alimentaires riches en aliments à indice glycémique ou à charge glycémique et pauvres en fibres céréalières (glucides raffinés) sont associés à un risque de diabète significativement plus élevé (Bhupathiraju et al., 2014). L'analyse du rapport scientifique du Comité consultatif sur les directives diététiques américaines de 2015 a montré que des habitudes alimentaires saines réduisent significativement le risque de développer un diabète de 21 %, contre un risque accru de 44 % observé avec un régime de type occidental pauvre en fibres (Dreher., 2018).

III.3.3. Maladies cardiovasculaires (MCV)

Les fibres solubles réduisent le risque de développer des maladies cardiovasculaires, principalement en abaissant le taux de cholestérol dans le sang, en diminuant le taux d'absorption des glucides dans l'intestin grêle et lors de la fermentation dans le gros intestin en produisant des AGCC (acétate, propionate et butyrate), et en favorisant un équilibre sain de la microflore colique (Farah Hosseinian et al., 2017).

Un certain nombre d'articles de synthèse concluent qu'une consommation adéquate de fibres réduit significativement le risque de MCV. Plusieurs études prospectives suggèrent une association inverse entre la consommation de fibres et le risque de MCV, avec une réduction de 9 à 11 % par augmentation de 7 à 10 g de fibres par jour. Il existe des preuves cliniques solides que des habitudes alimentaires saines peuvent réduire significativement le risque de MCV de 22 à 59 % selon le niveau d'adhésion (Dreher., 2018).

En 2008, après une évaluation approfondie des données disponibles, le comité de la bibliothèque d'analyse des preuves de l'Academy of Nutrition and Dietetics a conclu que des apports plus élevés en fibres peuvent contribuer à atténuer les taux élevés de lipides sériques,

la pression artérielle et les marqueurs d'inflammation systémique en tant que mécanismes clés pour expliquer les propriétés protectrices des fibres contre les MCV (Dahl et Stewart., 2015).

III.3.4. Maladie coronarienne (CHD)

L'hypercholestérolémie est l'un des plus importants facteurs de risque de CHD. Les fibres solubles peuvent réduire les taux de cholestérol sérique de 20 à 30 %, réduisant ainsi de manière significative le risque de coronaropathie (Furda et Brine., 1990).

Les fibres alimentaires influencent d'autres facteurs de risque lipidique de maladie coronarienne, notamment les taux sériques de cholestérol HDL et LDL, les triglycérides et les lipoprotéines A1 et B100.

Le risque de coronaropathie est étroitement lié à l'augmentation des taux de cholestérol LDL et de lipoprotéine B100. Le risque de maladies coronariennes est inversement lié au cholestérol HDL et aux niveaux de lipoprotéine A1. En général, les effets des fibres alimentaires sur les triglycérides et le cholestérol HDL sont variables selon les fibres alimentaires. La plupart des sources de fibres solubles réduisent généralement le LDL-cholestérol (Furda et Brine., 1990).

De nombreux essais randomisés ont démontré de manière cohérente que des apports de 26-30 g de fibres totales/jour provenant d'aliments complets ou de 3-12 g de suppléments de fibres solubles et visqueuses isolées/jour (y compris le bêta-glucan d'avoine/d'orge, le psyllium, le guar ou la pectine) peuvent réduire le LDL-C de 4-8 % (Brown et al., 1999 ; Wolever et al., 2010). Un vaste essai randomisé, en double aveugle, avec placebo, mené chez des hommes finlandais (21930 fumeurs ; âgés de 50 à 69 ans ; suivi de 6,1 ans ; 1399 premiers cas d'infarctus du myocarde non mortels et 635 décès par maladie coronarienne) a rapporté une réduction de 31 % du risque de coronaropathie (35 g contre 16 g de fibres/jour), les fibres de céréales ayant un effet plus fort que les fibres de légumes ou de fruits et les fibres solubles étant plus efficaces que les fibres insolubles (Pietinen et al., 1996).

Autres études prospectives estiment que pour chaque augmentation de 10 g/jour de fibres, le risque de tous les événements coronariens est réduit de 8 à 11 % et celui des décès dus aux maladies coronariennes de 24 % (Kim et Je., 2015 ; Wu et al., 2015). Le National Cholesterol Education Program (Adult Treatment Panel III) recommande un traitement précoce des patients hypercholestérolémiques par des régimes riches en fibres et des suppléments de fibres solubles et viscérales (Dreher., 2018). De plus, l'analyse scientifique du comité consultatif des directives alimentaires américaines de 2015 a montré que des modèles alimentaires sains peuvent réduire de manière significative le risque de coronaropathie avec le MedDiet de 29 à 61 %, le modèle

des directives alimentaires américaines de 24 à 31 % et les régimes DASH de 14 à 27 % (Dreher., 2018).

III.3.5. Pression artérielle

L'hypertension est en corrélation linéaire avec le risque de coronaropathie. L'augmentation du taux de la pression artérielle s'accompagne souvent d'une augmentation du taux de cholestérol sérique.

Des approches alternatives à la thérapie médicamenteuse dans le traitement de l'hypertension sont souhaitables en raison des effets secondaires de nombreux agents anti-hypertenseurs qui augmentent les lipides. La supplémentation en fibres alimentaires réduit les lipides sériques ainsi que les niveaux de pression artérielle.

Des études documentées démontrent clairement qu'un apport accru en fibres à un effet bénéfique sur la pression artérielle. Une intervention diététique, comprenant un apport généreux en fibres, constitue un traitement non pharmacologique de l'hypertension et d'autres facteurs de risque de maladies coronariennes (Furda et Brine., 1990).

Trois méta-analyses d'essais randomisés indiquent qu'une augmentation de la consommation de fibres de 6 à 11,5 g/jour peut réduire légèrement la pression artérielle systolique moyenne combinée de 0,9 à 1,2 mm Hg et la pression artérielle diastolique de 0,7 à 1,7 mm Hg (Evans et al., 2015). Cependant, après stratification des sujets, les réductions de la pression artérielle étaient significativement plus importantes chez les personnes âgées (>40 ans) et dans les populations hypertendues, avec une réduction de la pression artérielle systolique de 6 mm Hg et de la pression artérielle diastolique de 4,2 mm Hg. Le bêta-glucan s'est révélé être parmi les fibres hypotenseurs les plus efficaces, 4 g/jour abaissant la pression artérielle systolique de 2,9 mm Hg et la pression artérielle diastolique de 1,5 mm Hg (Evans et al., 2015). L'analyse scientifique du Comité consultatif des directives diététiques américaines de 2015 a conclu que les modèles alimentaires sains, en particulier les régimes de type DASH, peuvent réduire de manière significative la pression artérielle systolique de 6 mm Hg et la pression artérielle diastolique de 3 mm Hg par rapport aux modèles occidentaux, principalement en raison de l'augmentation des fibres, du potassium et des caroténoïdes, et de la diminution de la teneur en graisses saturées et en sodium (Dietary Guidelines Advisory Committee., 2015).

III.3.6. Accident vasculaire cérébral (AVC)

Un apport adéquat en fibres est associé à un risque total d'accident vasculaire cérébral plus faible. Plusieurs études prospectives ont systématiquement trouvé une relation dose-réponse inverse entre la consommation de fibres et le risque d'AVC (Dreher., 2018).

L'analyse scientifique du Comité consultatif sur les directives diététiques américaines de 2015 a révélé que les modèles alimentaires sains tels que ceux du MedDiet et des directives diététiques américaines peuvent réduire significativement le risque d'AVC de 13 à 60 %, selon le niveau d'adhésion (Dietary Guidelines Advisory Committee., 2015).

Une méta-analyse (6 études prospectives ; 314 864 sujets ; 8-18 ans de suivi ; 8 920 accidents vasculaires cérébraux) a rapporté une réduction de 12% du risque d'accident vasculaire cérébral pour chaque 10 g de fibres/jour (Chen et al., 2013). Une autre méta-analyse des habitudes alimentaires (21 études prospectives ; 1 023 131 participants ; âgés de 34 à 79 ans ; cohortes des États-Unis, d'Europe et d'Asie) a montré un risque d'AVC inférieur de 17 % pour les apports en fibres les plus élevés par rapport aux plus faibles (Zhang et al., 2013).

III.3.7. Cancer

Au début des années 1970, une hypothèse a été émis que les fibres réduisaient le risque de cancer, en particulier le cancer colorectal, en se basant sur des données montrant des taux plus faibles de cancer colorectal chez les Africains qui consommaient un régime traditionnel riche en fibres par rapport à ceux qui avaient un régime occidental urbain (Burkitt., 1971).

Il existe un certain nombre de mécanismes anticancéreux hypothétiques liés aux fibres qui affectent l'initiation et/ou la progression du cancer, tels que les effets des AGCC sur le pH du côlon, le contrôle par le butyrate des taux de division cellulaire, et les effets des fibres sur la réduction du risque d'obésité et les changements métaboliques et de signalisation associés liés au risque de cancer (Dahl et Stewart., 2015 ; Sengupta et al., 2006 ; Gallagher et LeRoith., 2015).

III.3.7.1. Le cancer colorectal

Un apport adéquat en fibres est associé à une réduction du risque de cancer colorectal. En 2011, le rapport Continuous Update of World Cancer Research Fund (WCRF) et de l'American Institute of Cancer Research (AICR) a conclu qu'il existe des preuves convaincantes que les régimes riches en fibres protègent contre le risque de cancer colorectal et des associations linéaires similaires ont été observées pour les cancers du côlon et du rectum (Dreher., 2018).

L'enquête prospective européenne sur le cancer et la nutrition a recommandé que les personnes suivant un régime riche en fibres puissent réduire de manière significative le risque de cancer colorectal (Stevenson et al., 2012).

Les effets antioxydants du phytate peuvent contribuer à réduire le cancer colorectal et le cancer du sein (Reddy et Sathe., 2001).

Une méta-analyse dose-réponse (16 études prospectives ; 1 985 552 participants ; 4,5 à 26 ans de suivi ; 14 514 cas de cancer colorectal) a révélé une réduction significative du risque de cancer colorectal de 10 % pour chaque apport de 10 g/jour de fibres totales et de fibres de céréales, et une réduction de 17 % pour chaque tranche de trois portions (90 g/jour) de céréales complètes par jour, avec des réductions supplémentaires pour des apports plus élevés (Aune et al., 2011).

L'étude de cohorte EPIC (477 312 participants de l'UE ; âge moyen 51 ans ; 30 % d'hommes ; 43 % de femmes ménopausées ; suivi moyen de 11 ans, 4 517 cas de cancer colorectal) a observé une association inverse entre la consommation de fibres totales et le risque colorectal, une augmentation de 10 g/jour de fibres réduisant le cancer colorectal de 13 % (Murphy et al., 2012).

III.3.7.2. Cancer du sein

Le cancer colorectal n'est peut-être pas le seul cancer lié aux fibres. Un effet potentiellement protecteur des fibres a également été observé dans la recherche sur le cancer du sein. Cade et al., (2007) suggèrent que chez les femmes pré-ménopausées, les fibres totales ont un effet protecteur contre le cancer du sein, en particulier les fibres provenant des céréales et éventuellement des fruits. Leur travail, qui a impliqué l'analyse d'une grande cohorte de femmes adultes, a révélé que chez les femmes pré-ménopausées, mais pas post-ménopausées, une relation inverse statistiquement significative a été trouvée entre la consommation de fibres totales et le risque de cancer du sein (Stevenson et al., 2012).

Les habitudes alimentaires saines et riches en fibres sont associées à une réduction modérée du risque de cancer du sein post-ménopausique, mais les preuves concernant le risque de cancer du sein pré-ménopausique sont plus limitées et non concluantes à l'heure actuelle (Dietary Guidelines Advisory Committee., 2015).

Une étude prospective EPIC (334 849 femmes ; âge moyen 50 ans ; 11,5 ans de suivi médian ; 11 576 cas de cancer du sein) a trouvé une réduction significative du risque de cancer du sein de 5 % pour des apports en fibres totales et en fibres provenant de légumes non amylacés de 10 %, mais pas pour les fibres provenant de fruits, de céréales ou de légumineuses (Ferrari et al., 2013). L'étude Nurses' Health II (90 534 femmes pré-ménopausées ; âge moyen 36 ans ; suivi de 20 ans ; 2 833 cas de cancer du sein invasif) suggère qu'une consommation adéquate de fibres pendant l'adolescence et le début de l'âge adulte peut être particulièrement protectrice contre le risque de cancer du sein, le risque de cancer du sein étant réduit de 25 % en cas de consommation plus élevée par rapport à une consommation plus faible (Farvid et al., 2016).

III.3.7.3. Autres cancers

Deux autres cancers qui peuvent être affectés par une consommation adéquate de fibres sont le cancer de la prostate et le cancer gastrique. Le rapport de mise à jour continue du WCRF (World Cancer Research Fund) et de l'AICR (American Institute for Cancer Research) de 2014 a conclu qu'il n'y a pas ou peu de preuves qu'un apport accru en fibres protège directement contre le risque de cancer de la prostate (Dreher., 2018). Le cancer de la prostate est le deuxième cancer le plus fréquent chez les hommes dans le monde, et la sixième cause de décès par cancer. Les substances bioactives présentes dans les aliments à base de céréales complètes et les aliments riches en fibres alimentaires peuvent exercer des effets protecteurs contre le cancer de la prostate par le biais de mécanismes biologiques multiples qui se chevauchent partiellement. Il est moins évident qu'un régime alimentaire comportant une forte proportion de céréales complètes et une teneur élevée en fibres puisse également être bénéfique pour la prévention du cancer de la prostate (Watson et al., 2014).

Une supplémentation en fibres alimentaires peut inhiber la synthèse de l'ADN et la prolifération des cellules épithéliales dans les cryptes de la muqueuse rectale de patients présentant un risque élevé de cancer du côlon (Babu et al., 2018). L'inuline est bénéfique pour réduire le risque de nombreuses maladies du tube digestif, telles que les maladies du côlon irritable et le cancer du côlon (Rodney and Samaan., 2017).

l'étude de Physicians' Health Study (926 hommes chez qui un cancer de la prostate non métastatique a été diagnostiqué ; questionnaires sur l'alimentation pendant une durée médiane de 5,1 ans après le diagnostic ; suivi pendant 10 ans) suggère qu'un modèle alimentaire occidental pauvre en fibres était associé à une mortalité plus élevée, spécifique au cancer de la prostate et toutes causes confondues, et qu'un modèle alimentaire prudent riche en fibres était associé à une mortalité plus faible toutes causes confondues (Yang et al., 2015). Une méta-analyse (19 études cas-témoins et 2 études de cohorte ; 580 064 sujets) a rapporté que les fibres avaient un effet dose-réponse inverse significatif sur le risque de cancer gastrique, avec une réduction de 44 % pour chaque augmentation de 10 g de fibres consommées quotidiennement (Zhang et al., 2013).

III.3.8. Effet des fibres alimentaires gestion du poids corporelle

La prévalence accrue de l'excès de poids corporel et de l'obésité a conduit à des études sur l'effet de la composition du régime alimentaire sur le poids corporel. Les causes de l'excès de poids sont multifactorielles, mais les facteurs les plus importants sont un apport calorique excessif associé à une dépense énergétique limitée.

Bien que de nombreuses options conventionnelles et alternatives de perte de poids soient disponibles, leur efficacité à long terme est limitée ou inconnue, et des effets néfastes sont possibles. C'est pourquoi les consommateurs recherchent des stratégies de perte de poids efficaces, naturelles et non toxiques (Galanakis., 2019) .

Pour des résultats plus prometteurs, l'ajout de fibres fonctionnelles aux régimes amaigrissants est suggéré comme outil pour améliorer le succès (Slavin., 2005). La régulation du poids corporel et de la masse grasse s'effectue sous l'effet de différents facteurs, impliquant des circuits nerveux centraux, des stimuli de sensations périphériques, des signaux de satiété mécaniques et chimiques provenant du tractus gastro-intestinal, une entrée vagale afférente et des signaux d'adiposité provenant du tissu adipeux et du foie (Papathanasopoulos et Camilleri., 2010).

Il a été démontré que les fibres alimentaires modulent le poids corporel principalement par plusieurs mécanismes tels que :

1- une augmentation de la satiété et de la satiation (Chew et Brownlee., 2018).

2-réduction de l'apport énergétique en raison de leur indigestibilité et de la diminution de la quantité d'énergie absorbée à partir des aliments ingérés et augmentation de la dépense énergétique postprandiale (c'est-à-dire la thermogenèse induite par le régime alimentaire), qui peut être attribuée à l'augmentation de la motilité gastro-intestinale (Ng et Brownlee., 2017 ; Chew et Brownlee., 2018).

3- l'augmentation de l'excrétion d'acide biliaire, qui entraîne un flux métabolique dans la production hépatique de bile et une mobilisation des réserves de graisse corporelle (Chew et Brownlee., 2018 ; Thompson et al., 2017).

4. en agissant comme un substrat qui modifie favorablement le microbiote intestinal, ce qui modifie la récolte, le stockage et la dépense d'énergie (Chew et Brownlee., 2018 ; Thompson et al., 2017).

III.3.9. Vieillir en bonne santé

La consommation de régimes alimentaires sains au milieu de la vie (45-65 ans), qui fournissent suffisamment de micronutriments, de fibres et d'antioxydants tout en contrôlant l'apport énergétique, peut favoriser un vieillissement en bonne santé, défini comme suit : absence de maladies chroniques majeures prématurées, maintien d'une bonne fonction physique et cognitive sans limitation des activités essentielles de la vie quotidienne, une absence de symptômes dépressifs graves et une bonne perception globale de sa propre santé .

Dans une étude exploratoire, les personnes ayant un apport en fibres plus élevé étaient significativement plus aptes à contrôler l'apport calorique, ce qui se traduisait par un indice de masse corporelle (IMC) plus faible et une plus grande satisfaction alimentaire (Gilhooly et al., 2008). Plusieurs articles de synthèse suggèrent que les AGCC issus de la fermentation des fibres par le microbiote colique peuvent réduire les processus d'inflammation en ciblant les modifications de signalisation dans les fonctions physiologiques, les changements épi-génétiques impliqués dans les altérations des modèles de méthylation de l'ADN, la modification post-traductionnelle des histones et le remodelage de la chromatine qui représentent des pistes émergentes importantes pour la recherche sur le vieillissement sain (Kasubuchi et al., 2015 ; Szarc et al., 2015). L'augmentation de la consommation d'aliments riches en fibres pourrait être une stratégie efficace pour atteindre une vieillesse sans maladie et pleinement fonctionnelle (Dreher., 2018).

III.3.10. Une espérance de vie plus longue

Des études prospectives suggèrent que des habitudes alimentaires saines améliorent les chances d'une espérance de vie plus longue (Harmon et al., 2015). Un certain nombre d'études suggèrent qu'un apport adéquat en fibres joue un rôle indépendant dans la réduction du risque de mortalité, toutes causes confondues et spécifiques à une maladie. De plus, une association inverse entre la consommation de fibres et la mortalité par cancer a été observée chez les hommes, mais pas chez les femmes. De même, une étude prospective a trouvé une association inverse avec la mortalité totale et le risque de mortalité circulatoire avec une réduction du risque de 10% par 10 g de fibres/jour (Chuang et al., 2012).

III.4. Apports suffisants en fibres

Des niveaux d'apport adéquats en fibres ont été établis par un certain nombre d'autorités sanitaires internationales au cours de la première décennie du XXIe siècle, notamment en raison des avantages des fibres pour la santé cardiaque et la relaxation. En 2002, l'Institut de médecine

de l'Académie nationale des sciences des États-Unis a fixé l'apport adéquat en fibres à 14 g/1000 kcal, soit 38 g/jour pour les hommes et 25 g/jour pour les femmes, en se basant sur le niveau d'apport observé pour protéger contre les maladies coronariennes (CHD). L'apport quotidien adéquat en fibres totales selon l'âge et le sexe est résumé dans la **figure 26** (Institute of Medicine., 2002). Dans un rapport publié en 2003, l'Organisation mondiale de la santé a recommandé à la population de consommer au moins 25 g de fibres par jour provenant d'aliments riches en fibres (fruits, légumes et céréales complètes, par exemple).

Cet objectif de population est basé sur des preuves associant un apport adéquat en fibres à une amélioration de la santé par rapport aux régimes occidentaux pauvres en fibres pour une diminution du risque de prise de poids (convaincant), de diabète de type 2 (probable) et de maladies cardiovasculaires (probable) (World Health Organisation., 2003). En 2010, le panel de l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a recommandé un apport en fibres chez l'adulte pour (1) la fonction intestinale, 25 g/jour étant jugé adéquat pour une laxation normale chez l'adulte, et (2) un bénéfice pour la santé pour réduire le risque de maladie coronarienne, de diabète de type 2 et de prise de poids avec la consommation de régimes contenant des aliments riches en fibres à des apports en fibres ≥25 g/jour (European Food Safety Authority., 2010). Les apports en fibres recommandés pour les adultes dans la plupart des pays développés sont de 30-35 g/jour pour les hommes et de 25-32 g/jour pour les femmes. Pour les enfants, les recommandations varient d'un pays à l'autre avec une fourchette générale de grammes de fibres recommandés correspondant à l'âge de l'enfant plus 5 g de fibres supplémentaires. Pour les adolescents, les recommandations sont de 20-26 g/jour pour les filles et de 24-38 g/jour pour les garçons (Stephen et al., 2017).

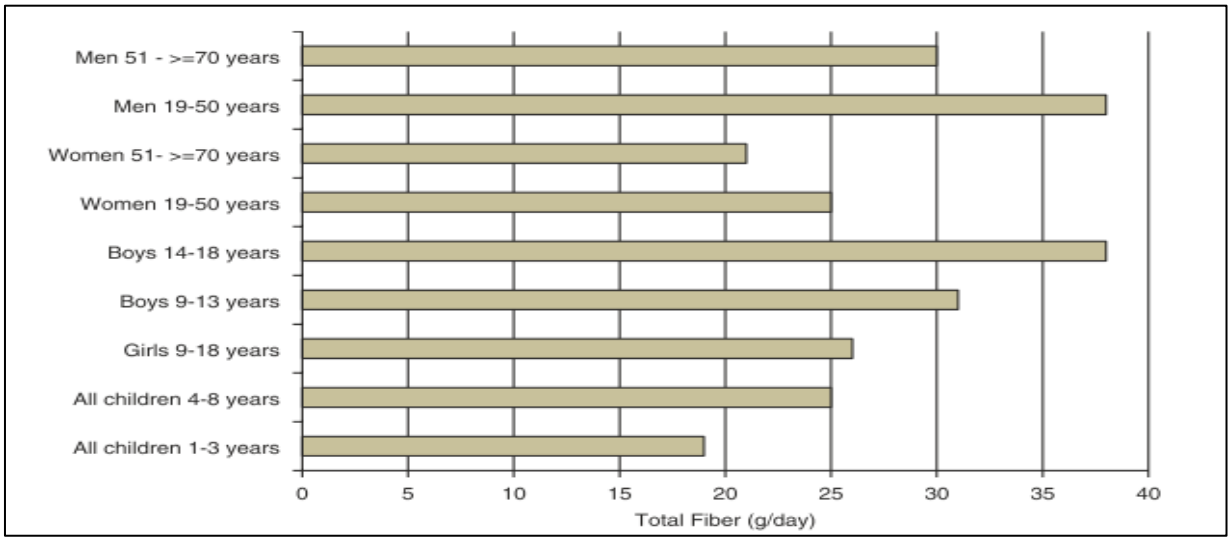


Figure 26: Apport journalier adéquat en fibres totales en fonction de l'âge et du sexe (Institute of Medicine., 2002)

III.5. Utilisation des sons en alimentation humaine

Outre l'utilisation en l'état ou la mise en forme de granulés vendus en pharmacie, trois domaines peuvent être envisagés dans la conception de produits d'origine céréalière riches en sons.

III.5.1. La boulangerie

On peut concevoir 03 sortes de produits :

1- Les produits fabriqués à partir de farine de blé à différents taux d'extraction :

L'utilisation des farines à taux d'extraction élevé permet l'enrichissement progressif des farines non seulement en éléments minéraux et vitaminiques localisés dans les sons et les germes, mais d'avantage en fibres utiles au bon fonctionnement physiologique du métabolisme et du transit intestinal.

L'initiative de promouvoir le son en utilisant le pain comme véhicule surtout dans les sociétés caractérisées par un manque de fibre dans l'alimentation se justifie amplement (Boudreau et Menard., 1992)

Tableau 12: Taux des fibres selon les variations des taux d'extractions.

Taux d'extraction %	75	85	90	95	100
Fibres brutes %	0,15	0,30	0,80	1,4	2,0

2- Les produits faits à partir d'une farine blanche (à 75% d'extraction), à laquelle est ajouté une quantité de sons supérieure à ce qui était normalement présent dans le grain de blé : c'est le pain au son.

3- Les produits fabriqués à partir d'une farine blanche additionnée en fibres modifiés (ces fibres ne proviennent d'ailleurs pas exclusivement du son de blé) pouvant être extraites du soja, de l'avoine et des agrumes.

III.5.2. Biscuiterie

On peut ajouter des sons à la formule et faire ainsi des biscuits au son.

III.5.3. Extrusion

Il est également possible de fabriquer par extrusion des produits enrichis au son.

En conclusion, le son, constituant naturel du grain de blé, est extrait lors du processus de mouture classique et donne un produit riche en fibres alimentaires, pouvant être utilisé pour fabriquer toutes sortes de produit enrichis en fibres (Colas., 1987).

Partie Expérimentale

Chapitre IV : Matériels et Méthodes

IV.1. Objectif du travail

Dans le cadre de la revalorisation dans l'alimentation et la santé humaine des ressources naturelles, nous avons fixé comme objectif la recherche du potentiel thérapeutique du son de blé dur (*Triticum turgidum subsp. Durum*) de quelques variétés Algériennes, en opérant de la manière suivante :

1. Détermination de quelques paramètres physicochimiques
2. Détermination des fibres alimentaires et de quelques composés phénoliques
3. Evaluation des activités biologiques (activité antioxydante et antibactérienne).

IV.2. Enquête sur l'utilisation du son de blé dur dans la région de sidi bel abbés

Nous avons réalisé une enquête sur l'utilisation alimentaire et thérapeutique du son de blé dur (*Triticum turgidum subsp. Durum*) au niveau d'une population dans la région de sidi bel Abbès ouest d'Algérie, qui vise à collecter les informations et les données relatives à la consommation du son de blé par la population d'étude.

IV.2.1. La population d'étude

L'enquête a été menée auprès de 500 personnes interrogées à Sidi Bel Abbes composées de ménagères, de scientifiques, d'universitaires, des guérisseurs traditionnels et des herboristes. Un questionnaire a été établie et soigneusement renseigné par chaque acteur en présence de l'enquêteur (**Annexe 1)**.

IV.2.2. Indices calculés

- **Use value (UV)**

L'importance relative de chaque espèce végétale connue localement comme remède est appelée UV, et elle est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$UV = \Sigma U / n$$

D'où UV est la valeur d'usage d'une espèce, U est le nombre de rapports d'utilisation cités par chaque informateur pour une espèce végétale donnée et n est le nombre total d'informateurs interrogés (Barnert et Messmann., 2008)

- **Fidelity level (FL)**

Le niveau de fidélité est utilisé pour déterminer la fréquence d'utilisation d'une plante dans le traitement d'une catégorie particulière de maladies. Le FL est calculé en utilisant la formule suivante (Martin., 2004) :

$$FL\ (\%) = (NP/N) \times 100$$

D'où NP est le nombre de rapports d'utilisation de la plante pour une catégorie particulière de maladie et N est le nombre total de rapports d'utilisation cités. En général, on obtient des FLs élevées pour les plantes pour les quelles pratiquement tous les rapports d'utilisation se réfèrent à la même catégorie d'affection, alors que les FLs faibles sont obtenus pour des plantes utilisées à de nombreuses fins différentes.

IV.2.3. Expression des résultats

Les données de l'enquête sont exprimées en fréquences et en pourcentages et représentés graphiquement par des diagrammes en portions ou en bâtons. La relation entre l'utilisation du son de blé dur et les autres facteurs a été vérifiée par le test du chi carré ou le test exact de Fisher en utilisant Microsoft Excel 2016 et Minitab 18, la valeur p a été considérée comme significative si $p < 0.05$, hautement significative si $p < 0.01$ ou fortement significative si $p < 0.001$.

IV.3. Détermination des paramètres physicochimiques

IV.3.1. Sélection des échantillons

Trois échantillons de variétés de blé dur "*Triticum turgidum subsp. Durum (Desf.)*" : Chen's, Siméto et Vitron **(Tableau 13)**; ont été récupérés auprès du Centre national de contrôle et de certification des semences et plantes de Sidi Bel Abbès, dans l'ouest de l'Algérie (CNCC, 2015). Les variétés ont été récoltées au cours du mois de juin 2018 dans différentes régions. Les caractéristiques des échantillons sont reprises dans le **tableau 13** :

Tableau 13: Les caractéristiques des variétés de blé dur.

Désignation (Variétés)	Provenance	Origine	Climat Zone d'adaptation
Chen's	Mascara	Syrie	Semi-aride
Siméto	Ain Temouchent	Italie	Semi-aride
Vitron	Adrar	éspagne	Aride

1. Variété 1 (Chen's) : provienne de la région de Mascara : Latitude : 35,3833, longitude : 0,15 35° 22′ 59″ N, 0° 9′ 0″ E, Altitude : 489 m avec un climat semi-aride, sec et froid (classification Köppen : BSk). D'origine Syrienne sélection ICARDA-ITGC en 1990, la zone d'adaptation : sublittoral et hauts plateaux, c'est une plante courte (65 à 75 cm).
Le rendement optimal est de 35 à 45 q/ha, mieux adaptée aux régions arides, semi-arides et sahariennes (< 150 mm), résistante aux maladies cryptogamiques et à la verse (Ladjal et Azouzi., 2014).

2. Variété 2 (Siméto) : provienne de la région d'Ain Temouchent : Latitude : 35,2895, longitude : -1,14099 35° 17′ 22″ N, 1° 8′ 28″ W, Altitude : 245 m avec un climat semi-aride sec et froid (classification Köppen : BSk). D'origines Italiennes caractérisées par un rendement élevé, PMG élevé, qualité semoulière très bonne et un teneur en protéines de 15.80 %.

3. Variété 3 (Vitron) : provienne de la région d'Adrar : Latitude : 27,8667, longitude : -0,283333 27° 52′ 0″ N, 0° 16′ 59″ W, Altitude : 279 m avec un climat désertique sec et chaud (classification Köppen : BWh). D'origine Espagne caractérisé par une paille haute à moyenne, cycle végétatif demi-précoce, tallage moyen, mieux adaptée aux régions arides et semi-arides.

Les trois variétés ont été transformées dans un moulin de laboratoire afin d'obtenir le produit fini et les sous-produits (son de blé) objet de la présente étude **(figure 27)**.

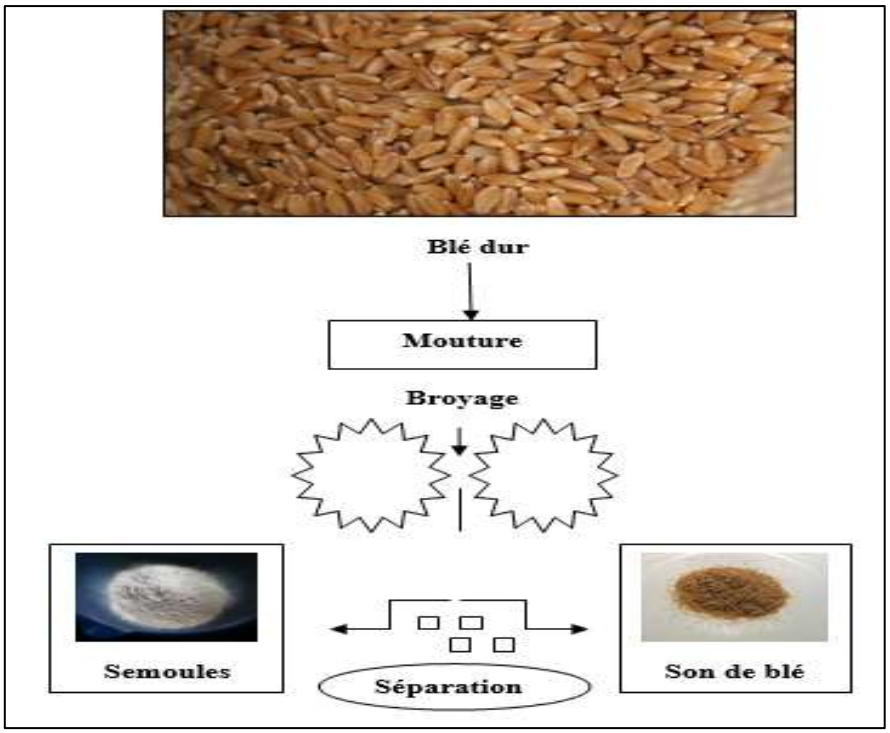


Figure 27: Diagramme de transformation des grains.

IV.4. Méthodes analytiques

L'étude de la composition chimique du son de blé dur a pour objet la détermination des teneurs en métabolites primaires et secondaires et l'évaluation de l'activité biologique.

Tous les solvants et les produits chimiques utilisés dans ce travail sont de haute qualité et de pureté (Sigma-Aldrich).

Les analyses physico-chimiques ont été réalisées respectivement dans les laboratoires de de Biochimie, Cartographie, Phytochimie et Microbiologie de la Faculté des sciences de la nature « SNV » de l'université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbes.

Les principes des méthodes analytiques utilisées se présentent comme suit :

IV.5. Méthode d'extraction du matériel végétal

La méthode d'extraction utilisée sur les poudres de son blé dur des trois variétés est une macération éthanolique à froid à 80 % pendant 24 heures (Hafiz Ansar et Barrow., 2020) **(Annex 2)**. Le rendement d'extraction (R %) a été calculé par la formule suivante :

R%= (masse de résidu sec /masse de la poudre végétale) x 100

IV.6. Détermination des caractéristiques physico-chimiques

IV.6.1. Détermination du taux d'humidité (NA : 1333/1990)

Principe : séchage de l'échantillon dans une étuve « Chopin » à la température de 103 ± 2 °C jusqu'à l'obtention d'une masse pratiquement constante. La teneur en eau est la différence entre le Poids de l'échantillon avant et après la dessiccation. La teneur en eau a été réalisée selon la méthode décrite par la norme algérienne NA 1333/1990 **(Annex 3)**.

IV.6.2. Capacité de rétention de l'eau

La capacité de rétention de l'eau a été déterminée par le protocole modifié de (Ning et al., 1991). 1 g d'échantillon a été mélangé avec 5 ml d'eau distillée, le mélange a été agité pendant 30 minutes à température ambiante, puis centrifugé à 2500t/min pendant 30 minutes à 20°C. Le liquide retenu par les solides insolubles a été déterminé et rapporté comme capacité de rétention d'eau en gramme d'eau retenue par gramme d'échantillon (g H_2O/g SBD).

IV.6.3. Dosage des fibres alimentaires

IV.6.3.1. Fibres totales « NDF » Van Soest 1967

Les fibres totales (**NDF**) constituent le résidu obtenu après traitement de la prise d'essai au détergent neutre **(Annexe 4)**.

IV.6.3.2. Lignine +cellulose « ADF » Van Soest 1963

Le composé lignocellulose « **ADF** » est obtenue après traitement de la prise d'essai au détergent acide **(Annexe 5)**.

IV.6.3.3. Lignine : « ADL » Van Soest 1963

La lignine « **ADL** » est obtenue à partir du résidu **ADF** par solubilisation de la cellulose en milieu acide concentré **(Annexe 6)**.

ADL = ADF - Cellulose

Cellulose = ADF - ADL

IV.6.3.4. Hémicelluloses

Il n'existe pas de méthode spécifique permettant de doser l'ensemble des hémicelluloses (Roudier et al. 2012). Les hémicelluloses ont été obtenus par défalcations des valeurs de ligno-cellulose obtenues avec le détergent acide « **ADF** » à partir des fibres totales **NDF (Annexe 7)**.

Hémicelluloses = NDF - ADF

IV.6.4. Dosage des composés phénoliques

Parmi les techniques utilisées dans le dosage des métabolites ; la spectrométrie d'absorption moléculaire de l'ultraviolet et du visible, cette dernière repose sur l'absorption des radiations lumineuses par la matière dans la plage spectrale s'étendant du proche ultraviolet au très proche infrarouge, soit entre 180 et 1100 nm. L'estimation de la teneur en composé phénolique de nos extraits hydroalcoolique a été réalisée par des techniques spectrophotométriques.

IV.6.4.1. Dosage des phénols totaux

Le dosage des polyphénols totaux par le réactif de Folin-Ciocalteu a été décrit dès 1965 par Singleton et Rossi. Le réactif est constitué par un mélange d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$) et d'acide phosphomolybdique ($H_3PMo_{12}O_{40}$). Il est réduit, lors de l'oxydation des phénols, en un mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène (Singleton et Rossi., 1965) **(Annexe 8)**.

IV.6.4.2. Dosage des flavonoïdes

La quantification des flavonoïdes a été effectuée par une méthode adaptée par (Zhishen et al., 1999) avec le trichlorure d'aluminium et la soude. Le trichlorure d'aluminium forme un complexe jaune avec les flavonoïdes et la soude forme un complexe de couleur rose absorbe dans le visible à 510 nm (Thangaraj., 2015) **(Annexe 8)**.

IV.6.4.3. Dosage des tanins condensée

Les tanins condensés sont déterminés par la méthode à la vanilline en milieu acide. Cette méthode est basée sur la capacité de la vanilline à réagir avec les unités des tanins condensés en présence d'acide pour produire un complexe coloré mesuré à 500 nm (Price et al., 1978) **(Annexe 8)**.

IV.7. Tests biologiques in vitro

Les tests biologiques in vitro réalisés sont l'activité antioxydante et l'activité antibactérienne.

IV.7.1. Activité antioxydante

La nature diversifiée des antioxydants et aussi des radicaux libres, avec des composants hydrophiles et hydrophobes et la complexité des processus d'oxydation impliquent qu'aucune méthode n'est universelle pour l'évaluation de l'activité antioxydante d'une manière précise, et c'est la raison pour laquelle on a opté dans ce présent travail à une combinaison de quatre méthodes différentes pour mesurer *in vitro* le pouvoir antioxydant des extraits du son de blé dur.

IV.7.1.1. Test de l'effet scavenger du radical DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazil)

Dans cette méthode le radical libre chromogène pourpre DPPH est réduit par les antioxydants à l'hydrazine correspondante de couleur jaune pâle et qui absorbe à 515 nm par le spectrophotomètre (Benhammou et al., 2009) **(Annexe 9)**.

IV.7.1.2. Test de FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power)

La méthode de FRAP est basée sur la capacité des antioxydants à réduire le complexe ferrique tripyridyltriazine (Fe^{+++}-TPTZ) de couleur jaune en complexe ferreux (Fe^{++}-TPTZ) de couleur bleue dans un milieu acide (Benzie et Strain., 1996) **(Annexe 9)**.

IV.7.1.3. Test de blanchissement du β-carotène

Cette méthode est basée sur l'oxydation couplée de β-carotène et l'acide linoléique développée par (Marco., 1968). Elle consiste à mesurer le blanchiment de β-carotène résultant de son oxydation par les produits de dégradation de l'acide linoléique **(Annexe 9)**.

IV.7.1.4. Effet chélateur des ions ferreux (FIC)

Le test de chélation des ions ferreux a été réalisé selon la méthode décrite par Chew et al. en 2009 (Chew et al., 2009). La ferrozine réagit avec les ions ferreux en solution, et l'absence est mesuré à 562 nm **(Annexe 9)**.

IV.7.2. Activité antibactérienne (méthode de diffusion sur milieu gélosé)

La méthode d'antibiogramme par diffusion sur milieu gélosé permet de classer la plupart des isolats bactériens comme sensibles ou résistants à une variété d'agents antimicrobiens. Pour effectuer l'essai, des disques de papier filtre imprégnés d'une concentration spécifiée d'un agent antimicrobien sont appliqués sur la surface d'un milieu gélosé qui a été inoculé avec l'organisme d'essai. Le médicament dans le disque diffuse à travers la gélose. Lorsque la distance par rapport au disque augmente, la concentration de l'agent antimicrobien diminue de façon logarithmique, ce qui crée un gradient de médicament dans le milieu gélosé entourant chaque disque. En même temps que la diffusion du médicament, les bactéries qui ont été inoculées sur la surface et qui n'ont pas été inhibées par la concentration de l'agent antimicrobien dans la gélose continuent de se multiplier jusqu'à ce qu'une pelouse de croissance soit visible. Dans les zones où la concentration du médicament est inhibitrice, il n'y a pas de croissance, formant une zone d'inhibition autour de chaque disque (Jorgensen et Pfaller., 2015) **(Annexe 10)**.

IV.8. Étude statistique

Tous les tests biologiques et chimiques ont été effectués avec trois répétitions au moins, ce qui implique que les résultats seront présentés en moyenne ± écart type. La comparaison des moyennes a été réalisée par l'analyse de la variance à un seul facteur (ANOVA) suivi d'une comparaison multiple par le test de Tukey. Les différences ont été considérées significatives à partir d'une valeur de P inférieur ou égale à 0,05. Les analyses statistiques ont été effectuées avec logiciel Minitab 18.

Toutes les représentations graphiques (courbes, diagrammes) ont été réalisées avec le Microsoft Excel 2019.

Chapitre V : Résultats et discussions

V.1. Résultats de l'enquête sur l'utilisation du son de blé dur

V.1.1. Description de l'échantillon de la population interrogé

Notre enquête sur l'utilisation de son de blé dur (*Triticum turgidum subsp durum*) a été réalisée au titre d'une période de six (06) mois sur une population constituée de 500 sujets de différentes tranches d'âges **(Tableau 14)**, au niveau des endroits publics (hôpitaux, université et herboristes). Il reste à préciser que la famille et nos proches ont fait aussi partie des sujets interrogés. Les caractéristiques de la population d'étude (âge, sexes, types, niveaux d'études) sont représentées dans les **Figures 28,29,30,31**.

Tableau 14: Pourcentage globale des différentes tranches d'âge.

Tranches d'âge	Pourcentage (%)
≤24	23.4
25–34	16.1
35–44	17.8
45–54	20.6
55–64	12.8
65–74	6.4
>74	2.8

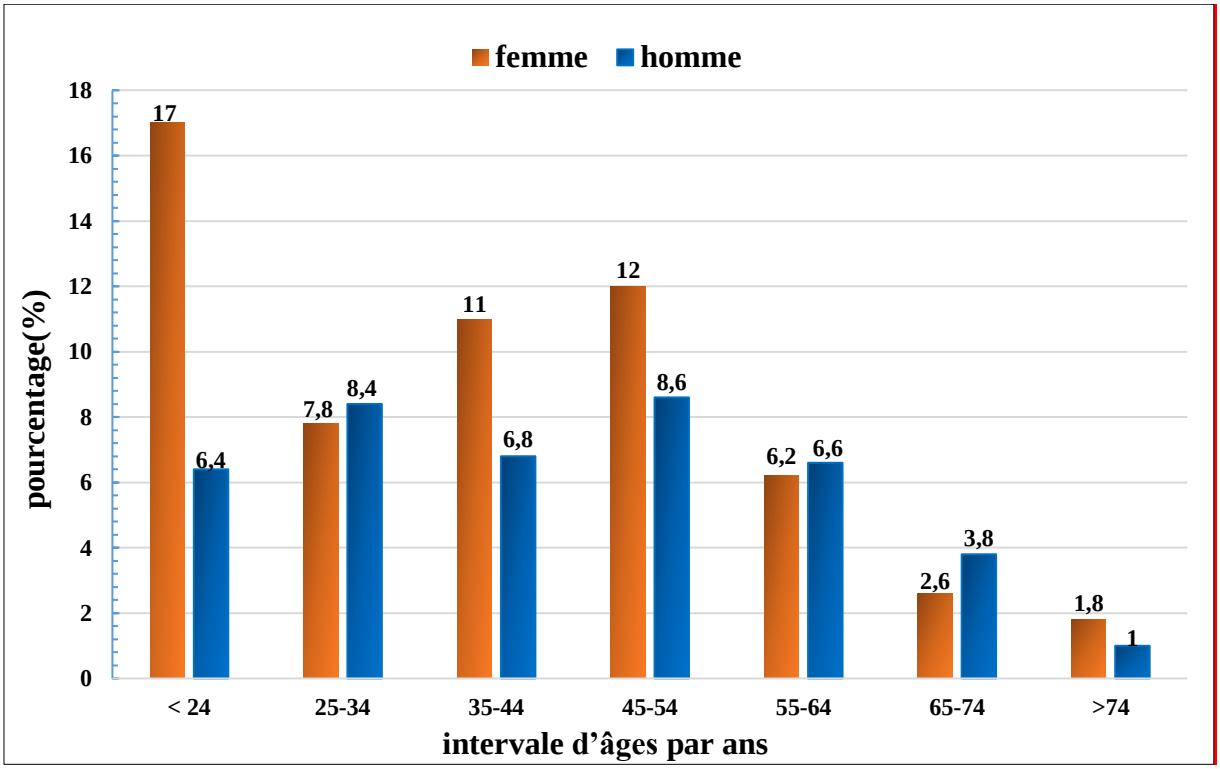


Figure 28: Tranches d'âges de la population d'étude.

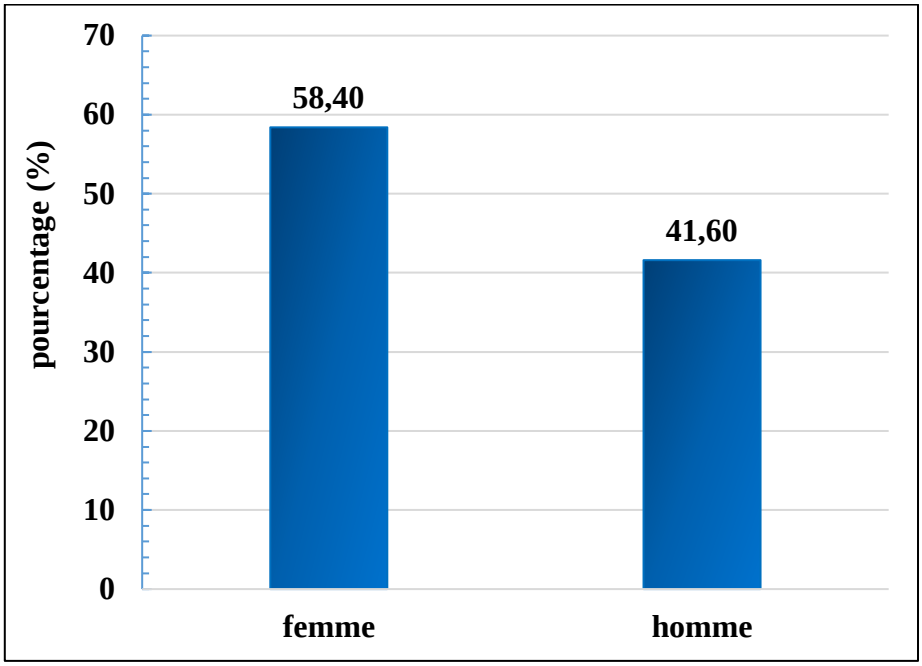


Figure 29: Répartition de la population d'étude selon le sexe.

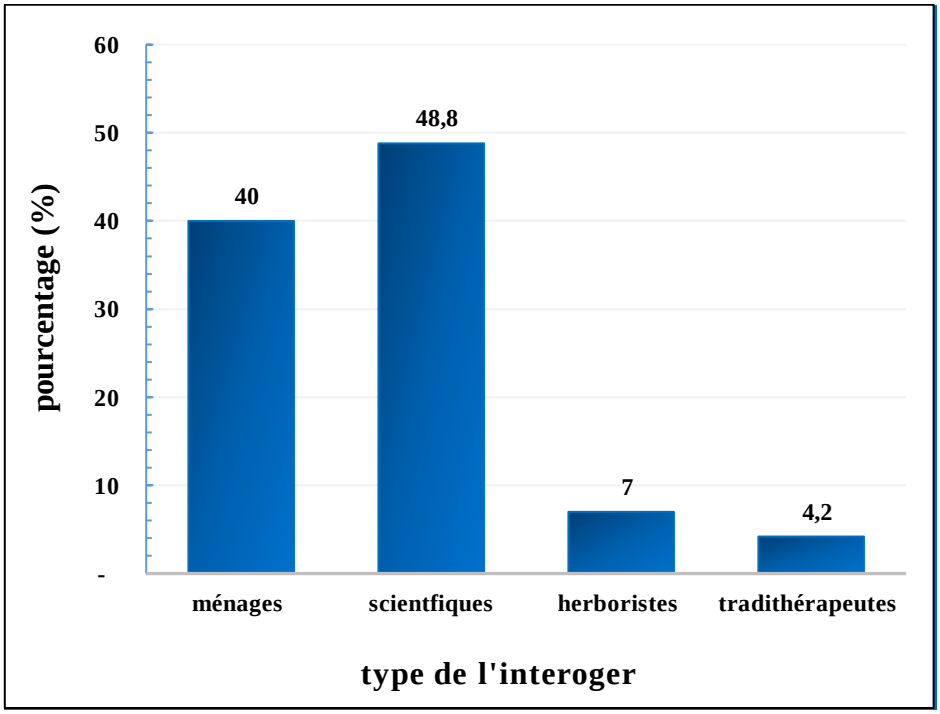


Figure 30: Pourcentage des informateurs selon le type de l'interroger.

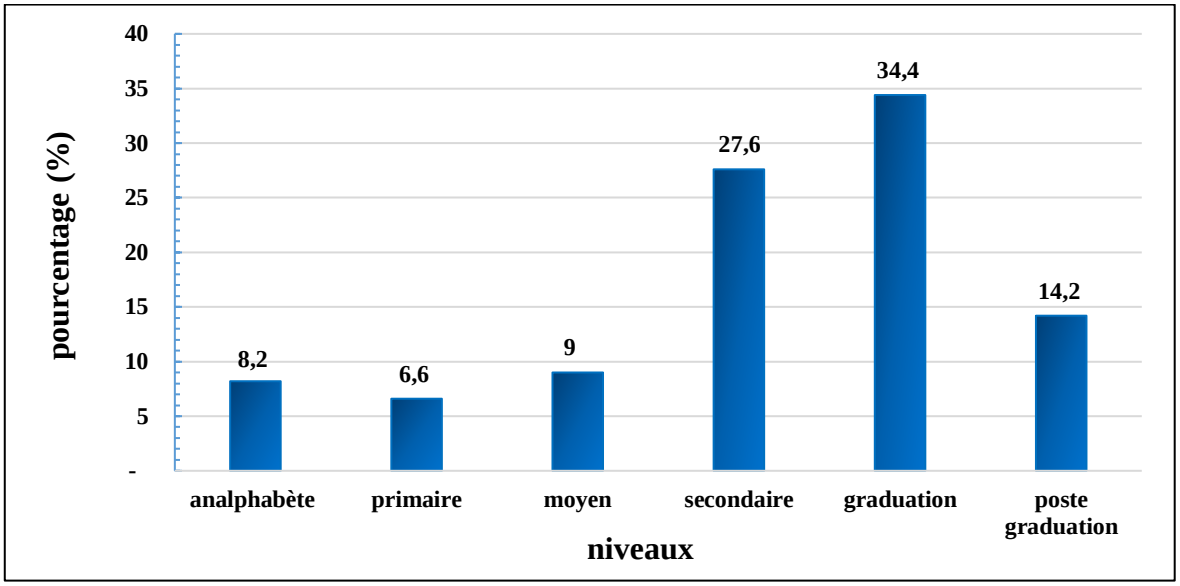


Figure 31: Pourcentage des informateurs selon le niveau de l'interroger.

V.1.2. Utilisation du son de blé dur

Les réponses des sujets enquêtés sur l'utilisation du son de blé dur sont présentées dans la **(figure 32)**. Un faible pourcentage (12%) de la population d'étude utilise le son de blé dur dans leur alimentation quotidienne **(figure 33)**. Pour l'utilisation thérapeutiques, la moitié de la proportion des sujets enquêtés soit 50.80% utilise le son de blé dur comme moyen de traitement de certaines pathologies digestives, et ce, sur recommandations des herboristes et autres.

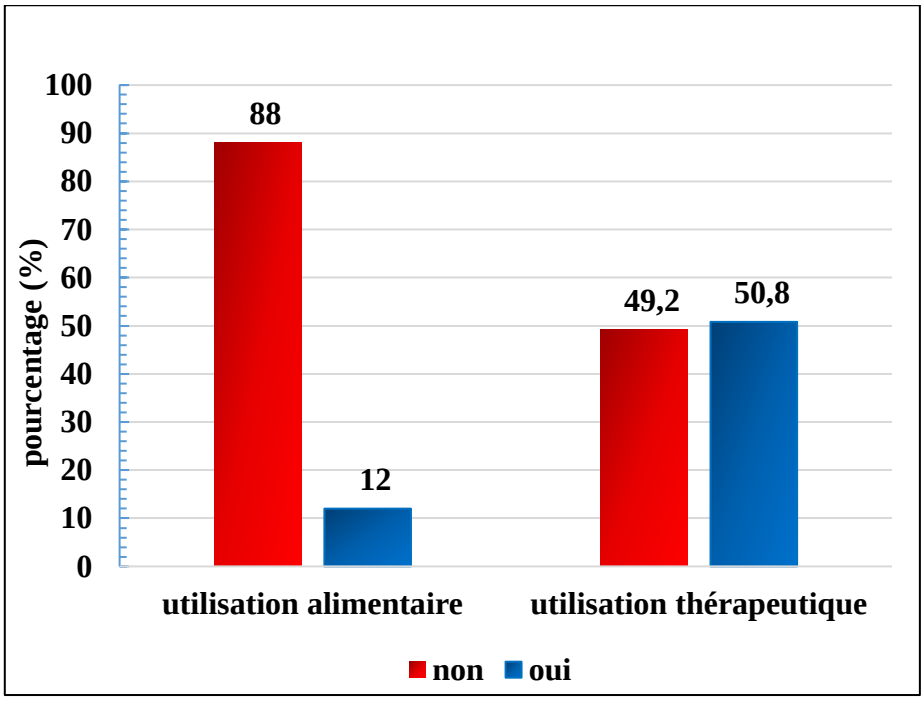


Figure 32: Domaine d'usage du son de blé dur.

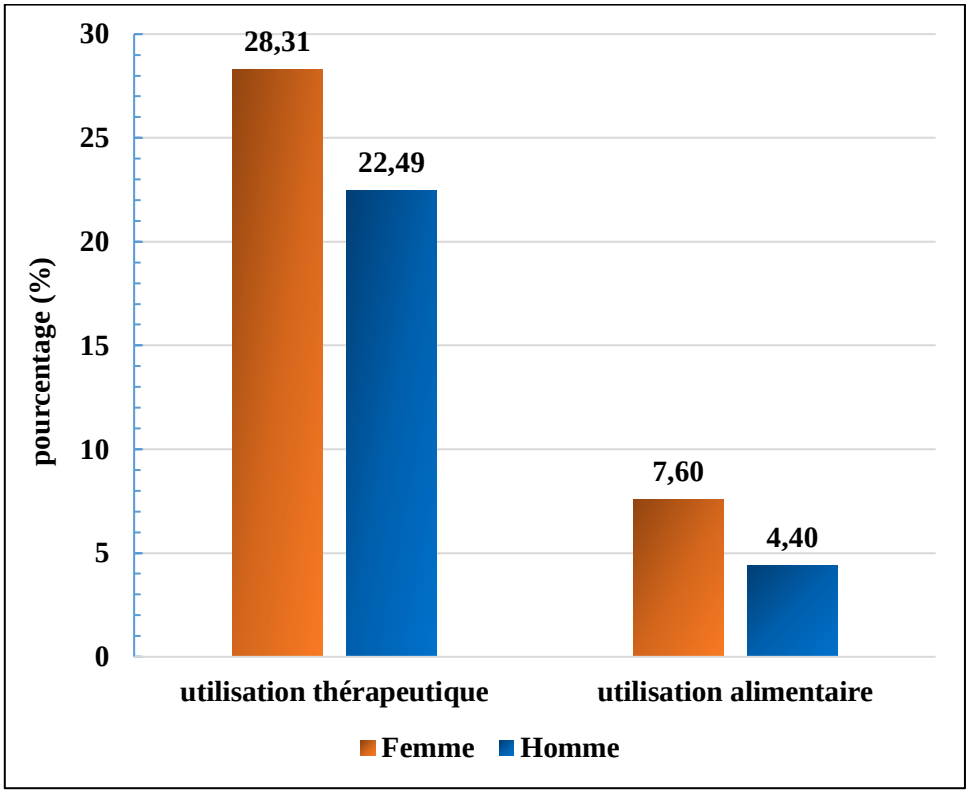


Figure 33: Taux d'utilisation du son de blé dur selon le sexe.

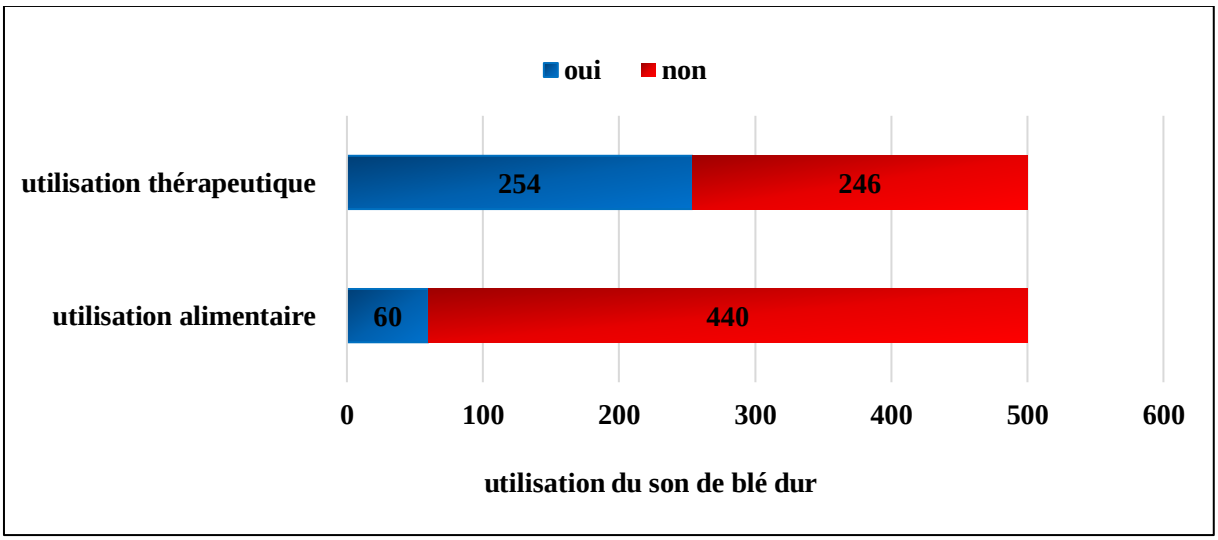


Figure 34 : Fréquence d'utilisation alimentaire et thérapeutique du son de blé dur.

Les réponses révèlent que 79 % de la population ont des connaissances sur le son de blé mais ignorent son utilisation alimentaire **(tableau 15)**.

Tableau 15: Fréquence et pourcentage d'utilisation du son de blé dur.

Information	n	%
Utilisation alimentaire		
Non	440	88.00
Oui	60	12.00
Utilisation thérapeutique		
Non	246	49.20
Oui	254	50.80
Connaissance		
Non	105	21.00
Oui	395	79.00

Nos recherches ont montré que plusieurs facteurs étaient associés à l'utilisation du son de blé dur tels que la connaissance des avantages pour la santé humaine, le sexe, l'âge, le type d'utilisateurs et le niveau d'éducation **(tableau 16)**.

Tableau 16: Facteurs associés à l'utilisation du son de blé dur.

		Utilisation du son de blé dur		
Facteurs		**Usage alimentaire (%)**	**Usage thérapeutique (%)**	**P**
Totale		**12.00**	**50.80**	
Connaissances	Oui	11.60	44.60	P<0.001
	Non	0.40	6.20	
Sexe	Homme	4.40	22.49	P=0.605
	Femme	7.60	28.31	
Age	<25	0.29	5.90	P<0.001
	25–34	1,00	7.41	
	35–44	1,40	8.92	
	45–54	4,37	11.39	
	55–64	2,21	9.19	
	>65	2,73	7.99	
Niveaux	Analphabète	1.15	4.90	P=0.886
	Primaire	0.95	3.74	
	Moyen	1.26	5.51	
	Secondaire	3.28	13.89	
	Graduation	3.66	15.53	
	Poste graduation	1.70	7.23	
Utilisateurs	Ménages	1,85	22.19	P=0.001
	Scientifiques	1,75	21.51	
	Herboristes	3,80	4.63	
	Tradithérapeutes	4,60	2.47	

V.1.3. Maladie traitée par la consommation du son de blé dur

Use value (UV) :

On rappelle que la valeur d'utilisation est le rapport de la somme des rapports d'utilisation sur le nombre total des informateurs. Le son de blé dur présente un indice UV de (**2.174)**, ce qui signifie statistiquement qu'au moins chaque informateur a cité deux rapports d'utilisation. Ce taux de connaissance, relativement important chez la population, montre que le son de blé dur occupe une place primordiale dans la médecine populaire de la région.

Fidelity level (FL) :

Les niveaux de fidélités liés à l'utilisation de son de blé dur dans chaque catégorie d'affection sont présentés dans le **Tableau 17**.

Tableau 17: niveaux de fidélité (FL) du son de blé dur.

Maladies traités	FL (%)
Syndrome du côlon irritable	59.37
Hypertension	13.30
Diabète de type 2	11.59
Maladies cardiovasculaires	2.80
Cancer du côlon	0.77

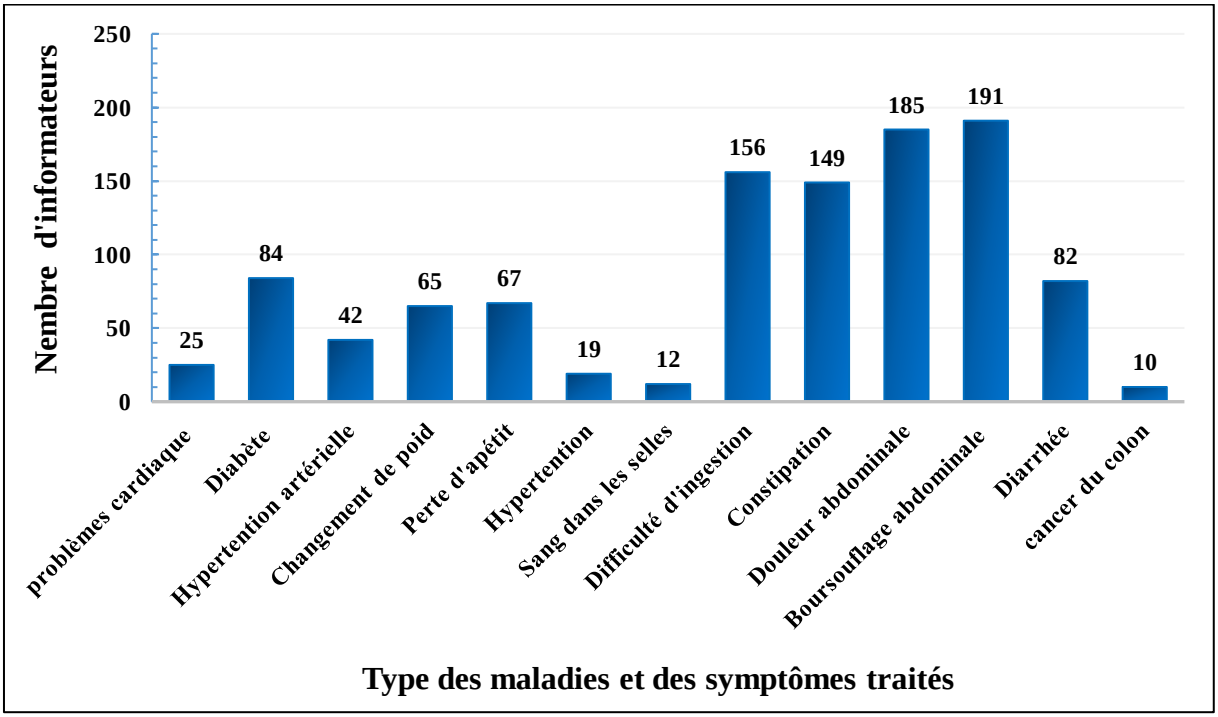


Figure 35: Fréquences des maladies et de symptômes traités par le son de blé dur selon les informateurs.

Les résultats révèlent que le SBD est utilisé dans le traitement de plusieurs types de pathologies digestives et métaboliques maladies **(figure 35)**. Les symptômes liés aux troubles digestives occupent le premier rang, et se représentent principalement par : la difficulté d'ingestion, la constipation, douleur et ballonnements et diarrhées. En deuxième rang l'hypertension. Le diabète de type 2 est en troisième rang, ainsi que d'autres maladies comme les maladies cardiovasculaires et le cancer du côlon. Certains symptômes sont aussi traités avec le son de blé dur.

L'échantillon de la population enquêtée est constitué de 41.60 % d'hommes et 58.40 % de femmes avec plusieurs tranches d'âge la plus importante est représenté par celle allant ayant de moins de 24 ans, 45-54, 25-44 et 25-34 ans. Le niveau d'étude de la population d'étude est considérable, avec 34.4 %, d'universitaires et 27.6 % de secondaires. Les sujets ayant un niveau moyen, primaire et les analphabètes représentent 23.8 % de l'échantillon. En ce qui concerne les types de sujets presque la moitié de l'échantillon sont des scientifiques et représentent 48.8% de la population étudiée, suivie par les ménagères avec un pourcentage de 40 % de la population, les herboristes et les tradithérapeutes avec un pourcentage de 11.2 % dans l'ensemble.

Le son de blé dur a été utilisé de manière fortement significative selon la connaissance des avantages pour la santé ($p<0.001$), les personnes âgées ($p<0.001$) et le type d'utilisateur $p=0.001$. L'utilisation est non significative selon le sexe et le niveau des sujets avec un $p=0.605$ et $p=0.886$ respectivement.

Cette enquête a montré que les habitants de Sidi Bel Abbès préfèrent mélanger le son de blé dur avec du yaourt (51.16 %), du lait (19.19%), du miel (12.21 %), d'autres suggèrent que le son de blé dur est utilisé pour la préparation du pain, couscous et la soupe pour des fin alimentaires et thérapeutiques.

L'enquête effectuée auprès de la population d'étude a révélé que les sujets enquêtés consomment moins de son de blé à l'état brute, c'est à dire que leurs structures de de consommation est largement pauvre en son de blé. Les valeurs d'utilisations et les niveaux de fidélités révèlent que le son de blé dur est utilisé rarement et uniquement dans le cas du traitement de quelque pathologies digestives et métaboliques notamment le syndrome de l'intestin irritable et le diabète de type 2, et ce, sur recommandations des herboristes. Selon les résultats de l'enquête la consommation journalière est caractérisée par une forte consommation de céréales raffinée (semoules et farines) conformément aux habitudes alimentaires des algériens, ce qui implique une absence des fibres alimentaires insolubles et des composants phénoliques dans la structure de consommation journalière des sujets d'où une déficience caractérisée de certains composés très utile pour la nutrition humaine, puisque le son de blé est

connu pour sa richesse en fibres alimentaires , en minéraux, en vitamines B et en composés bioactifs qui présentent des propriétés favorables à la santé (Onipe et al., 2015).

V.2. Résultats de dosages des paramètres biochimiques

V.2.1. Teneur en eau et rendement d'extraction

La teneur en eau des trois variétés du son de blé dur (Chen's, Siméto et Vitron) et le rendement d'extraction sont représentés dans **Figure 36 et 37.**

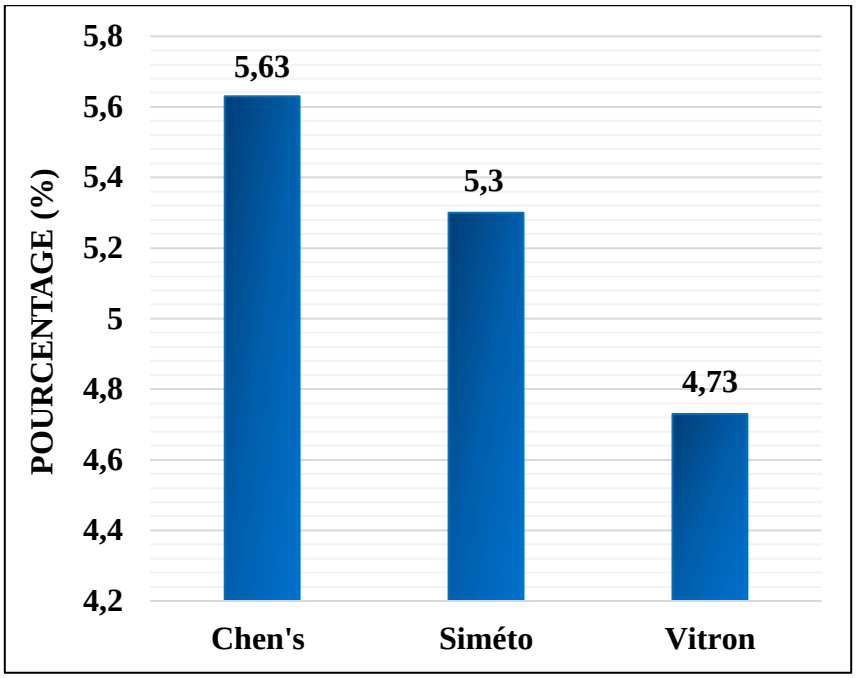


Figure 36: Teneur en eau des échantillons du son de blé dur.

La valeur de la teneur en eau du son de blé est importante dans la mesure où elle permet de donner une idée sur la stabilité du produit durant la conservation en vue de sa commercialisation. Plus le produit est humide, plus les éléments constitutifs se dégradent rapidement durant le stockage de la matière première et des sous-produits. La teneur moyenne en eau de nos échantillons est de 5.63 %, 5.30 % et 4.73 % pour les variétés Chen's, Siméto et Vitron respectivement. Cette teneur est un bon indicateur de conservation et de la commercialisation du sous-produit. Nos résultats sont inférieurs aux résultats retrouvés par (Onipe et al., 2015) soit 8%. Le changement dans cette teneur en eau est peut-être dû aux conditions climatiques, les génotypes et ou procédé de technologique de transformation du blé.

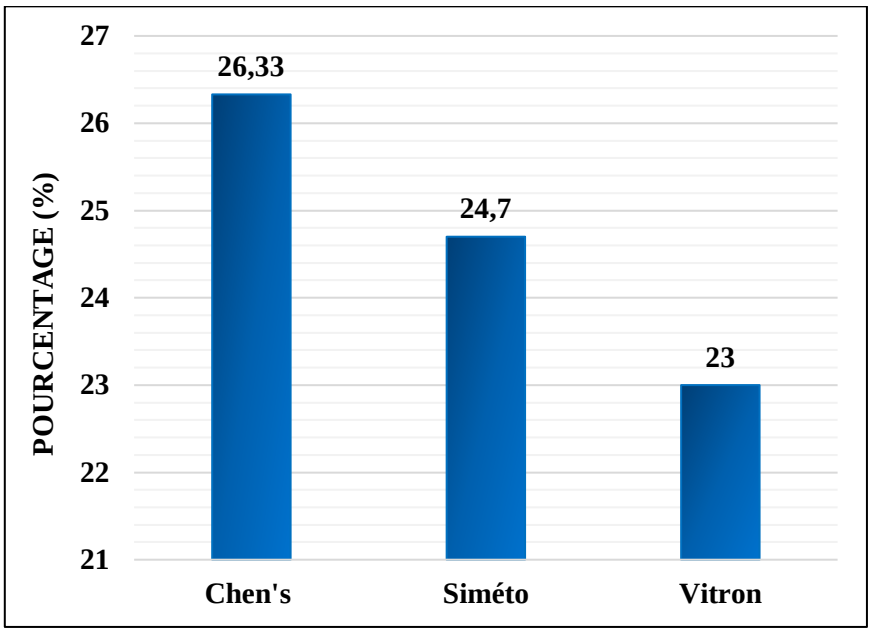


Figure 37: Rendement d'extraction des échantillons par solvant (Éthanol 80 %).

Il est souvent difficile de comparer ce genre de résultats avec ceux de la bibliographie, car le rendement n'est que relatif et dépend de la méthode et des conditions dans lesquelles l'extraction a été effectuée.

V.2.2. Capacité de rétention de l'eau

Les résultats repris dans le **tableau 18** montrent que les échantillons du son de blé dur des trois variétés possèdent une capacité de rétention d'eau très importante, soit 3.135 ± 0.151 g/g pour la variété Vitron suivi de 2.586 ± 0.143 g/g pour la variété Siméto et finalement le taux de rétention le plus faible est pour la variété Chen's avec une capacité de 2.513±0.210 g/g. Cette capacité de rétention de l'eau est significative (p=0.008).

Tableau 18: Capacité de rétention de l'eau dans les échantillons.

Variétés	Capacité de rétention de l'eau*
Chen's	2.513 ± 0.210
Siméto	2.586 ± 0.143
Vitron	3.135 ± 0.151

*g d'eau/g d'échantillons

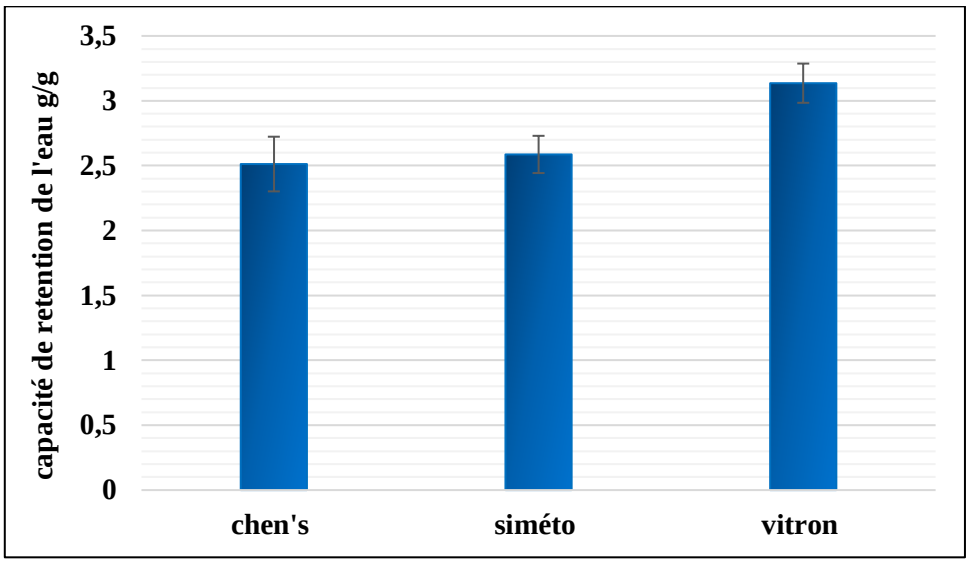


Figure 38: Capacité de rétention de l'eau selon les trois variétés.

Les capacités de rétention d'eau reflètent la capacité des aliments ou des ingrédients alimentaires à lier et à retenir l'eau (Ye et al., 2021). La détermination de la capacité de fixation de l'eau des fibres alimentaires implique généralement l'addition d'un volume connu d'eau au poids connu de l'échantillon de fibres alimentaires, qui est soumis à une séparation par filtration ou centrifugation. D'autres conditions telles que la température, le temps de trempage, la vitesse et la durée de centrifugation, etc. doivent également être mentionnées, car la capacité de fixation de l'eau des fibres alimentaires est influencée par plusieurs facteurs. Lors de la détermination de la capacité de rétention d'eau ou de liaison des fibres alimentaires, une petite quantité de fibres solubles est généralement perdue, ce qui affecte les résultats (Galanakis., 2019).

Nos résultats sont en accord avec les travaux de Esposito et al., en 2005 qui ont trouvé des valeurs de 1.5 à 2.1 et 3.1 à 3.9 g/g dans des différentes fractions du son de blé avant et après extrusion. Ils ont constaté que la capacité de rétention de l'eau des sous-produits de blé dur est strictement liée à la fois à la quantité de fibres présentent dans chaque fraction, et à la granulométrie du matériau. La capacité de rétention augmente avec la quantité de fibre totale et diminue avec la granulométrie (Esposito et al., 2005). Cependant, dans une autre étude de Santala et al., en (2014), il a été montré des valeurs proches de nos résultats de 3.7 et 3.3 g/g pour le son grossier et le son ultrafin, après un traitement enzymatique les valeurs qui ont été remarqué sont de 2.3 à 3.7 g/g et de 2.4 à 3.1 g/g dans le son grossier et le son ultrafin respectivement (Santala et al., 2014). Les résultats de He et al., (2018) montrent des valeurs supérieures à nos résultats (4.20 à 7.00 g/g) dans la poudre superfine de son de blé dur. Cependant, nos résultats sont aussi similaires aux résultats trouvés par Ye et al., (2021) qui montrent des valeurs entre 2.65 et 3.30 g/g dans des échantillons de son de blé qui subissant des différentes méthodes de traitement.

Le gonflement et la capacité de rétention d'eau et de liaison à l'eau des fibres alimentaires insolubles (cellulose, lignine, etc.), qui ne sont pas fermentescibles par la microflore des gros intestins, entraînent une augmentation de la masse fécale et une régularisation du transit digestive (Elleuch et al., 2011). L'absorption et le piégeage de l'eau dans sa structure poreuse et son gonflement sont responsables de l'effet de gonflement des fibres alimentaires insolubles dans le côlon. La capacité de liaison à l'eau des fibres alimentaires insolubles leur permet de diminuer l'efficacité des substances toxiques en raison de leur dilution dans le gros intestin humain (Galanakis., 2019).

V.2.3. Résultat de dosage des fibres alimentaires :

Les résultats de dosages des fibres alimentaires dans le son de blé dur des trois variétés Siméto, Chen's et Vitron sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 19: Résultats de dosages des fibres alimentaires du son de blé dur selon les trois variétés.

Echantillon	%NDF	%Hémicellulose	%ADF	%Cellulose	%ADL
Chen's	39.7	28.71	10,99	6,41	4,58
Siméto	39.4	25.92	13,28	7,33	5,95
Vitron	39.3	26.47	12,83	6,91	5,92

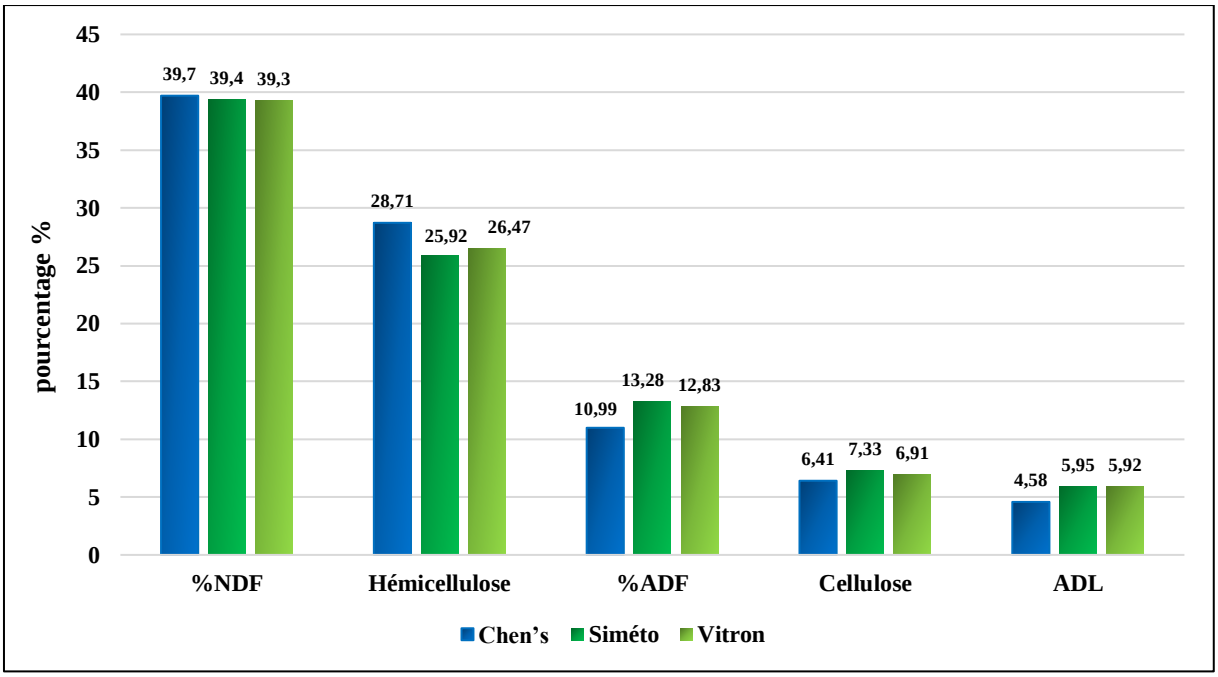


Figure 39: Résultats de dosages des fibres alimentaires dans les échantillons.

L'importance des fibres alimentaires en tant que composant protecteur de la santé est reconnue depuis longtemps, mais son analyse et sa définition sur la base des propriétés chimiques et physiques ont fait l'objet de débats et de recherches intenses (Santala., 2014).
Le son de blé est un sous-produit important dans l'industrie céréalière, il est reconnu comme étant une meilleure source de fibres alimentaires insolubles. Ce qui est confirmé par le résultat trouvé dans notre étude. Nos valeurs se situent dans la gamme des valeurs observées par (Vitaglione et al., 2008 ; McCleary et al., 2012 et Cheng et al., 2021) soient respectivement 36.5 à 52.4 %, 29.80 à 36.62 % et 42.8 %. Une autre étude de Ouyed et al., en (2011) sur la composition chimique du son de blé dur d'une variété algérienne, montre des résultats proches de nos valeur soient 39.7%, 11.7% et 3.6% pour les teneurs en NDF, ADF et ADL respectivement (Ouyed et al., 2011). D'autre travaux de Boudouma., en (2009) sur la composition chimique du son de blé dur produit par les moulins industriels algériens, montrent des valeurs proches à nos résultats pour l'NDF et la cellulose, soient de 41.7 % et 10.6 % respectivement. Autres valeurs similaires à nos résultats ont été trouvé pour l'ADF (13.3 %) et l'hémicellulose (28.4 %) (Boudouma., 2009) . Les valeurs des hémicelluloses sont inférieures à celle trouvée par Ghodrat et al., (2017) 31.60 %. Hossain et al., (2013), ont travaillé sur une analyse des composants des fibres du son de blé de six génotypes cultivés dans trois différents environnements et ils ont trouvé un taux de de NDF, ADF, hémicellulose et cellulose dans les intervalles (23.128 à 26.5 %), (6.5 à 8.072 %), (16.276 à 18.670 %) et (4.022 à 5.645 %) respectivement, ils ont constaté aussi que la variation de la composition en fibres du son de blé est due aux des différences dans le patrimoine génétique et agricole du blé ou à l'environnement. Les condition environnementale ou climatiques peuvent aussi affecter les teneurs en fibres alimentaires dans le son de blé, les teneurs en fibres hydrosolubles dans le son de blé et la farine blanche étaient toutes deux négativement corrélées à la température et positivement corrélées aux précipitations (Shewry et al., 2010).

Kamal-Eldin et al., (2009) ont caractérisé deux échantillons commerciaux de son de blé provenant des pays nordiques. La teneur en fibre alimentaire de ces produits de son de blé variait de 40 à 53 % de la matière sèche. Environ 55% de la fibre alimentaire du son de blé est de type AX ; le reste est constitué de cellulose (9-12 %), de lignine (3-5 %), de fructane (3-4 %) et de β-glucane à liaisons mixtes (2.2-2.6 %), ils ont conclu que ces variations de composition sont peut-être dues aussi aux procédés de mouture. En particulier, il peut y avoir une grande variation dans la teneur en amidon, qui affecte directement la teneur en cendres et en fibres du son (Kamal-Eldin et al., 2009). Le broyage des céréales provoque une rupture partielle des structures des fibres alimentaires de l'endosperme, rendant l'endosperme plus accessible aux enzymes digestives et plus accessible aux bactéries du côlon , ce qui affecte le degré de fermentation des composants et par conséquent les effets physiologiques de la fibre

alimentaire, puisque la taille des particules a une influence sur les propriétés physiologiques de la fibre, d'ailleurs une mouture excessive peut avoir des effets négatifs dû à une grande perte du taux des fibres (Mongeau et Brooks., 2015) . D'autre part , les travaux de Ye et al., (2021) dans une étude sur l'effet du modification du traitement sur les composants de base du son de blé montrent des valeur entre 41.53 % et 44.41 % pour les fibres alimentaires totale, en ce qui concerne les fibres insolubles et les fibres solubles les valeur trouvés sont dans l'intervalle de (38.29 % - 40.43 %) et (2.71 % - 4.44 %) respectivement et ils ont constaté que les différents modifications de traitements ont eu des effets différents sur les propriétés du son de blé y compris les teneurs en fibres alimentaires (Ye et al., 2021). La présente étude nous a permis de mettre en évidence que le son de blé des variétés de blé dur étudiées est très riche en fibres alimentaires, c'est pour cela et conformément aux différentes données de la littérature (Stevenson et al., 2012).

Les fibres du son de blé présentent un intérêt thérapeutique et nutritionnel très intéressant, ses effets physiologiques peuvent être divisés en effets nutritionnels (dus aux nutriments présents) et en effets mécaniques (principalement sur le tractus gastro-intestinal, en raison de la teneur en fibres) et effets antioxydants (découlant des phytonutriments présents tels que l'acide phénolique et les alkylrésorcinols). Il est donc nécessaire de proposer le son de blé dans alimentation et la santé humaine puisqu'il a été démontré que sa richesse en fibres alimentaires est à l'origine d'une amélioration de la santé intestinale, d'une régulation de l'appétit et d'un prolongement de la satiété. Cette dernière peut être attribuée à l'absorption importante d'eau par les fibres alimentaires, à la réduction du temps de transit intestinal, à l'augmentation de la viscosité dans l'intestin grêle, à l'augmentation du volume des selles et à la production d'acides gras à chaîne courte (AGCC) dans le côlon, suite à la fermentation des fibres (Brouns et al., 2012). Il a été mis en évidence que dans le cas du Syndrome du côlon irritable, la supplémentation en fibres peut réduire le temps de transit de l'intestin entier, contenir les pressions intra-coloniques et les douleurs qui en découlent et, en quantité suffisante (20-30 g/jour), améliorer la constipation (Parisi et al., 2002). Une étude récente a montré qu'une consommation de 30 g/j de son de blé dur riche en fibres (43,5 % MS) a entraîné une augmentation très significative du poids des selles et de leur fréquence avec une modification très significative de la consistance des selles dures des sujets constipés suivi d'une régularisation du transit intestinal (constipation) et une amélioration des symptômes associés au transit digestif (douleurs et ballonnements) (Menadi et al., 2021). Une autre étude récente portant sur l'utilisation d'un régime riche en fibres alimentaires du son de blé dur sur des rats rendus diabétiques, a permis de montrer une perte significative ($p<0.05$) du poids corporel chez les rats diabétiques, une diminution très significative ($p<0.04$) de la glycémie à partir de la quatrième semaine du régime alimentaires, et une différence très significative ($p<0.001$) du taux

de cholestérol lié aux lipoprotéines de basse densité (LDL-C) entre les rats diabétiques avec régime expérimental et les rats non diabétiques avec régime expérimental (Tarfaoui et al., 2020).

Watson et al., (2014) ont indiqué que les mécanismes par lesquels les fibres céréalières pourraient protéger contre les maladies ne sont pas bien compris, mais ils pourraient impliquer une augmentation du temps de transit intestinal et une amélioration de la sensibilité à l'insuline. Cependant, Wang et al., (2007) ont précisé que les régimes alimentaires contenant des quantités différentes de fibres solubles et insolubles peuvent avoir des effets différents sur la prise de poids et le métabolisme des glucides, mais un facteur contributif pourrait être la modification du taux d'absorption du glucose dans l'intestin. Burton-Freeman et al., (2017), ont montré que l'augmentation de l'apport en fibre alimentaires peut contribuer à freiner la prise de poids et à favoriser la perte de poids en diminuant la densité énergétique du régime alimentaire.

La consommation de céréales complètes et de fibres de céréales complètes améliore significativement le contrôle de la glycémie, améliore les niveaux de cholestérol, réduit la pression artérielle et diminue la concentration sérique des protéines C-réactives à haute sensibilité, un marqueur d'inflammation de bas grade. Ces observations indiquent toutes une amélioration du dérèglement métabolique lié à l'obésité (syndrome X) et ont été attribuées en grande partie aux fibres (β-glucane et Arabinoxylane) et aux composés phytochimiques (phénoliques, stérols, tocols et vitamines) qui sont concentrés dans la couche d'aleurone du son ainsi que présents dans la fraction de germe de blé. Ces composés exercent des effets synergiques sur des processus métaboliques spécifiques liés à la santé (Awika., 2011).

L'apport en fibres alimentaires recommandé en Europe est de 25 g/jour selon la méthode AOAC. Au Royaume-Uni, les recommandations en matière de fibres basées sur le NSP sont fixées à 18 g/jour. Pour les enfants, cela varie et la règle générale pour les professionnels de la santé est l'âge de l'enfant plus 5 g. En Europe, les apports moyens en fibres alimentaires varient de 10 à 20 g/jour chez les jeunes enfants et les adultes. 20 g/jour chez les jeunes enfants et de 16 à 29 g/jour chez les adultes (Stevenson et al., 2012).

V.2.4. Détermination des composés phénoliques

Les résultats obtenus sont exprimés en milligramme équivalent d'acide gallique par gramme d'extrait (mg EAG/g) pour les phénols totaux, et en milligramme équivalent catéchine par gramme d'extrait (mg EC/g) pour les flavonoïdes et les tanins condensés. En utilisant l'équation de la régression linéaire de la courbe d'étalonnage tracée de l'acide gallique et la catéchine **(Annexe 5)**.

Les concentrations de la teneur totale en phénols (CPT), la teneur totale en flavonoïdes (CFT) et la teneur en tanins condensés (CTC) dans les extraits de son de blé dur des trois variétés sont indiqués dans le **tableau 20**.

Tableau 20: Concentration des composés phénoliques dans les extraits de son de blé dur.

	CPT*	CFT**	CTC**
Chen's	1.817 ± 0.231	0.594 ± 0.116	1.345 ± 0.850
Siméto	1.678 ± 0.051	0.543 ± 0.102	1.526 ± 0.193
Vitron	1.813 ± 0.075	0.503 ± 0.077	1.587 ± 0.182

*mg EAG/g SBD, **mg EC/g SBD, SBD / son de blé dur

Les teneurs totales en phénols des variétés Siméto, Chen's et Vitron sont respectivement de 1.678±0.046 mg EAG/g de SBD, 1.817±0.21 mg EAG/g de SBD et 1.813±0.068 mg EAG/g de SBD. La concentration en flavonoïdes est de 0.543±0.091 mg EC/g de SBD (Siméto), 0.594±0.10 mg EC/g de SBD (Chen's) et 0.503±0.069 mg EC/g de SBD (Vitron). Tandis que, la teneur en tanins condensés est de 1.526±0.173 mg EC/g SBD pour Siméto, 1.345±0.176 mg EC/g SBD pour Chen's et 1.587±0.163 mg EC/g SBD pour Vitron.

Aucune différence significative n'a été enregistrée entre les concentrations des trois composés phénoliques dans les variétés étudiées. Phénols totaux (p=0.259), flavonoïdes (p=0.382) et tannins condensés (p=0.748).

Les acides phénoliques et les flavonoïdes représentent la forme la plus commune de composés phénoliques que l'on trouve dans le blé complet où ils font partie des groupes les plus importants et les plus complexes de substances phytochimiques (Žilić et al., 2012). Il est bien connu que les composés phénoliques sont concentrés dans les fractions de son et de germe du blé qui sont éliminées lors de la mouture du blé (Vaher et al., 2010). Il est difficile de comparer les résultats obtenus dans cette étude à ceux d'études antérieures en raison de la diversité des facteurs environnementaux et des cultivars de blé dur utilisés, de la variation des méthodes d'analyse, du solvant d'extraction, des différences dans le protocole d'extraction et des unités de mesure (Zhou et Yu., 2004).

Les résultats obtenus (**tableau 20)** pour les concentrations de phénols totaux sont similaires à ceux trouvés par (Vaher et al., 2010) qui ont rapporté que les couches de son de blé ont la plus haute teneur en phénols totaux, allant de 1.258 à 3.157 mg EAG/g. Cependant, Abozed et al., (2014) ont également trouvé des concentrations élevées de phénol totaux : 1.99 mg EAG/g pour le son de blé commun et 2,64 mg EAG/g pour le SBD avec une extraction à l'éthanol 70 %. (Povilaitis et al., 2015) ont trouvé une concentration en phénols totaux entre 1.58 et 1.78 mg EAG/g de son de blé, ils ont montré que les variations de la concentration en phénols totaux entre les différentes fractions granulométriques pour un même type de son n'étaient pas remarquables. Les études de (Zhu et al., 2010) ont trouvé une concentration proche de nos résultats qui sont de 1.24±0.026 mg EAG/g de son. En comparaison avec d'autres travaux, nos résultats confirment que le son de blé a une concentration considérable en phénols totaux.

Les flavonoïdes sont une classe importante de substances phytochimiques dans le blé, contribuant aux propriétés bénéfiques pour la santé (Žilić et al., 2013). Nos résultats montrent une faible concentration de flavonoïdes dans les extraits de son avec une moyenne qui varie entre 0.503 et 0.594 mg EC/g de SBD , car on les trouve en grande partie dans le germe de blé et avec des concentrations relativement faibles dans le son (Sapirstein., 2015), et la teneur en flavonoïdes était plus élevée dans le blé entier que dans le son (Abozed et al., 2014). En ce qui concerne les flavonoïdes, nos concentrations sont plus élevées par rapport à d'autres résultats.

Dans une étude précédente, (Abozed et al., 2014) ont montré que les concentrations en flavonoïdes sont de 223.96 µg EC/g pour le son blé tendre et 258.04 µg EC/g pour le son de blé dur. (Brewer et al., 2014) ont révélé que la teneur en flavonoïdes dans le son de blé à différentes tailles de particules allait de 177.05 à 206.74 µg EC/g, et les résultats de l'étude indiquent que les flavonoïdes sont concentrés dans le son. Les flavonoïdes totaux moyens étaient de 213.04 et 259.31 mg EC/kg dans le son et le pain de blé dur, respectivement. D'autres résultats trouvés par (Žilić et al., 2012) indiquent que les flavonoïdes sont concentrés dans le son, et la teneur moyenne en flavonoïdes totaux était de 259.31 mg EC/kg dans le SBD.

Pour les résultats de la teneur en tanins condensés (CTC), nous avons constaté qu'il était très difficile de les comparer avec d'autres travaux de recherches qui sont moins abondants. Nous avons la chance d'être les premiers à déterminer leurs concentrations dans le son de blé dur.

Des travaux antérieurs ont mentionné que la variation de la concentration en composés phénoliques dans le son de blé dur est affectée par l'emplacement géographique, les conditions climatiques et les génotypes des variétés. De plus, d'autres études ont suggéré que les conditions biotiques (espèce, organe et stade physiologique) et les stress abiotiques (salinité, luminosité, déficit hydrique et facteurs édaphiques) peuvent augmenter le métabolisme phénolique en

réponse au stress oxydatif (Benhammou et al., 2009). Cependant, (Moore et al., 2006) ont indiqué que l'environnement et le génotype sont également des facteurs importants. Bien que dans nos résultats, aucune variation significative des composés phénoliques n'a été observée dans le SBD des trois variétés. Les valeurs obtenues dans nos études semblent être plus élevées que celles rapportées dans la littérature de (Brandolini et al., 2013; Žilić et al., 2013) pour des différents génotypes de blé dur et/ou zones agro-climatiques, ce qui confirme que la présence de composés antioxydants et le niveau d'activité antioxydante dans le blé dur sont significativement affectés par le génotype, la zone de culture (Martini et al., 2015), et les conditions environnementales (Žilić et al., 2013). Des études supplémentaires sont nécessaires pour explorer comment ces paramètres changent par rapport à l'environnement, car les interactions génotypiques par environnement peuvent avoir une forte implication sur la capacité antioxydante des plantes. Bien qu'un nombre relativement faible de génotypes ont été étudiés, une grande variabilité pour la plupart des composés phénoliques et la capacité antioxydante a été obtenue dans les espèces (Žilić et al., 2013).

Il est connu que les propriétés antioxydantes du grain de blé sont significativement influencées par le génotype et les conditions environnementales et que les composés phénoliques peuvent contribuer de manière significative à la capacité antioxydante globale des grains de blé (Žilić et al., 2013), il serait utile de déterminer plus précisément quels facteurs environnementaux individuels contribuent le plus à cette variance (Moore et al., 2006).

Une comparaison d'un ensemble de 26 génotypes cultivés dans 4 ou 6 environnements a montré des corrélations positives entre les teneurs en substances phytochimiques et la température moyenne pendant le développement du grain, certains composants présentant également des corrélations négatives avec la précipitation totale au cours de la même période (Shewry et al., 2010). Les facteurs qui influent sur la teneur en substances phytochimiques bioactives du blé et de ses produits sont la plantation, les méthodes de traitement et d'autres méthodes. Les conditions de plantation affecteront la composition du grain de blé, qui contient principalement des facteurs génétiques et environnementaux, tels que les conditions météorologiques, notamment la température et la disponibilité en eau pendant le développement du grain (Shewry et al., 2010).

Il est donc évident que les données de la littérature montrent souvent une variation de la teneur en composés bioactifs dans les tissus du grain de blé, qui peut être due à différentes méthodes d'analyse, aux techniques de mouture, technologie de transformation, au cultivar et au lieu de culture (Awika., 2011).

V.3. Résultats des Activités biologiques in vitro :

V.3.1. Le test de balayage du radical DPPH :

Les résultats de l'activité de piégeage des radicaux DPPH (IC_{50}) pour les extraits de son de blé dur des trois variétés et les différents standards de référence (acide ascorbique, acide gallique) sont présentés dans le **tableau 21**.

Les extraits des différentes variétés de SBD ont une faible activité antioxydante par rapport aux standards, avec une IC_{50} de 35.16±0.15 mg/ml, 33.50±0.22 mg/ml et 40.79±0.71 mg/ml respectivement pour Chen's, Siméto et Vitron, pour les courbes d'inhibition **(voire Annex 6)**.

Tableau 21: Valeurs IC_{50} pour les extraits de son de blé et les standards de référence.

Extraits	IC_{50} (mg/ml)
Chen's	35.16 ± 0.15
Siméto	33.50 ± 0.22
Vitron	40.79 ± 0.71
Acide ascorbique	0.087 ± 0.02
Acide gallique	0.095 ± 0.01

V.3.2. Essai FRAP :

Le pouvoir antioxydant des extraits de SBD a été évalué par le test FRAP dans le **tableau 22**.

Tableau 22: Concentrations de Fe++ en mmol/g d'extraits.

Extraits	Pouvoir antioxydant *
Chen's	0.62 ± 0.013**
Vitron	0.54 ± 0.059**
Siméto	0.71 ± 0.022**
Catéchine	4.81 ± 0.004
Acide gallique	4.62 ± 0.081
Acide ascorbique	4.38 ± 0.009

*Mmol Fe++/g d'extrait, **p=0.004

Les résultats montrent une différence significative (p=0.004) entre les extraits des différentes variétés, avec 0.62±0.01 mmol Fe++/g pour la variété Chen's, 0.54±0.05 mmol Fe++/g pour le Vitron et une concentration de 0.71±0.02 mmol Fe++/g pour la variété Siméto. Le pouvoir réducteur des extraits est moins important par rapport aux standards utilisés (catéchine, acide gallique et acide ascorbique) avec 4.81 mmol Fe++/g, 4.62 mmol Fe++/g et 4.38 mmol Fe++/g respectivement.

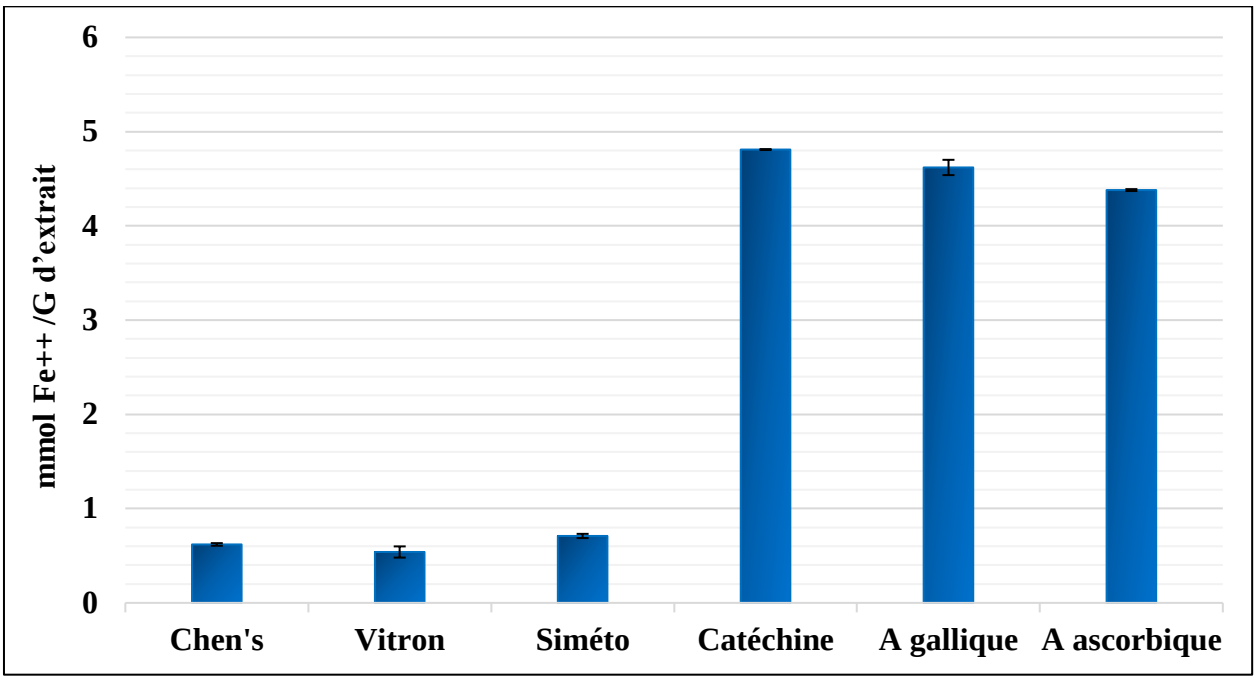


Figure 40: Les concentrations de Fe++ dans les mélanges en (mmol/g d'extrait).

V.3.3. Méthode de blanchiment du β-carotène :

Selon la cinétique de blanchiment du β-carotène **(figure 41)**, aucune différence significative n'a été constatée entre les trois extraits SBD de Chen's, Siméto et Vitron avec p=0.893, et les pourcentages d'activité inhibitrice sont respectivement de 30.4±1.8 %, 35.4±0.00 % et 39±1.6 % **(tableau 23)**.

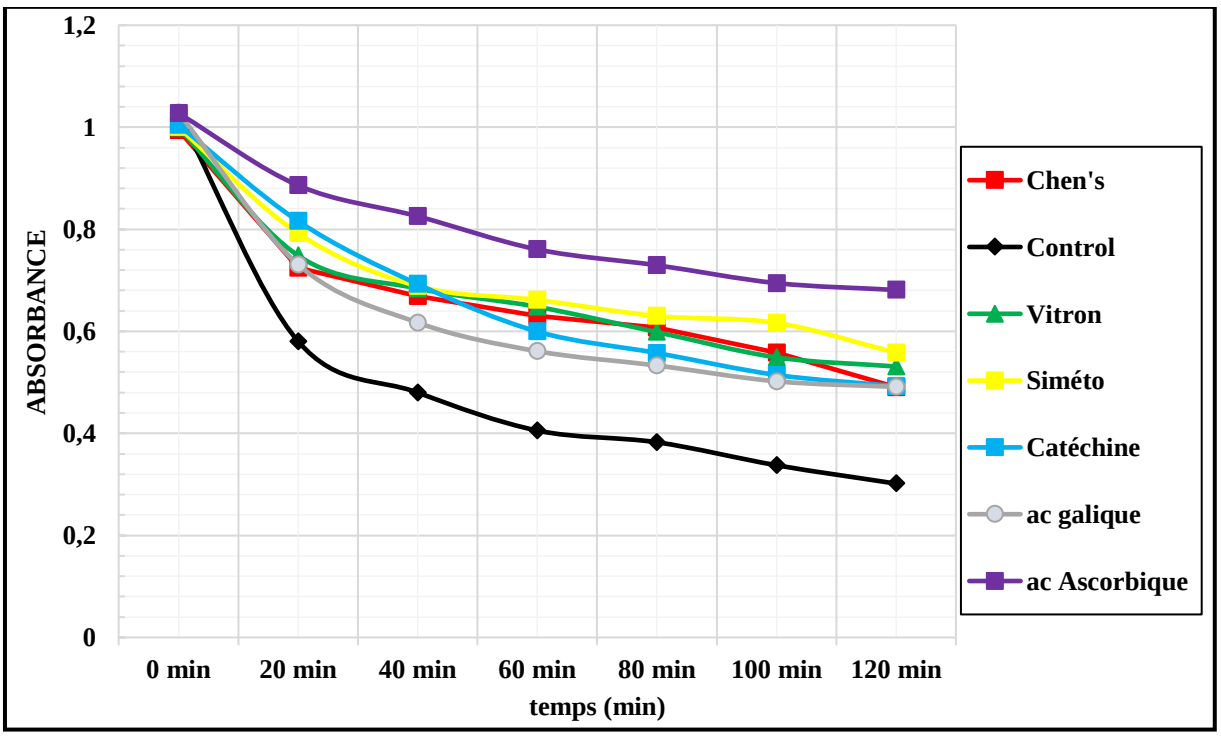


Figure 41: Cinétique de blanchiment du β-carotène en fonction du temps pour les trois variétés de SBD, extrait et normes de référence.

Selon la cinétique de blanchiment du β-carotène, aucune différence significative n'a été observée (p=0.189) entre le pourcentage d'inhibition des standards catéchine (29.3±1.2 %) et acide gallique (25.8±1.7 %) et celui de l'acide ascorbique (52.2±2.2 %). Les résultats de ce test montrent que les extraits de SDB ont une activité antioxydante élevée par rapport aux standards de référence. Selon le pourcentage d'inhibition, les activités antioxydantes des extraits sont dans l'ordre suivant : Acide ascorbique> Siméto> Vitron> Chen's> Catéchine> Acide gallique.

Tableau 23: Pourcentages d'activité antioxydante des extraits de son de blé dur.

Extraits	% de l'activité
Chen's	30.4 ± 1.8*
Vitron	35.4 ± 0.00*
Siméto	39.0 ± 1.6*
Catechin	29.3 ± 1.2
Acide gallique	25.8 ± 1.7
Acide ascorbique	52.2 ± 2.2

*p=0.839

V.3.4. Effet chélateur des ions ferreux (FIC) :

L'analyse de l'activité chélatante des ions ferreux de nos extraits montre une forte activité FIC. Aucune différence significative (p=0.133) pour l'activité chélatante observée entre les trois extraits de SBD des variétés, et la différence n'est pas significative selon les concentrations des extraits pour ce test avec p=0,225. À la concentration la plus élevée (5 mg/ml), les extraits de SBD ont montré la plus forte activité FIC avec 98.14 %, 97.46 % et 95.80 % pour le Chen's, le Vitron et le Siméto respectivement **(Tableau 24)**.

Tableau 24: Pourcentage (%) de chélation des ions ferriques dans les extraits et les standards.

Extraits	1.75 mg/ml	2.50 mg/ml	5.00 mg/ml
Chen's	96.58 ± 0.97	97.26 ± 2.86	98.14 ± 1.11
Vitron	94.72 ± 1.33	95.70 ± 1.18	97.46 ± 0.97
Siméto	77.91 ± 0.29	89.44 ± 0.56	95.80 ± 0.83
EDTA	97.86 ± 0.08	98.10 ± 0.08	98.19 ± 0.14
Catechin	31.66 ± 0.70	37.51 ± 1.04	41.69 ± 0.29
Acide ascorbique	29.11 ± 1.41	30.13 ± 0.35	32.08 ± 1.26
Acide gallique	28.27 ± 0.14	30.50 ± 0.28	34.08 ± 2.12

Les extraits ont révélé un effet chélateur fortement supérieur aux standards de référence utilisés : catéchine, acide gallique et acide ascorbique sauf pour l'EDTA qui donne une activité de 98.19 % presque la même activité que nos extraits à la concentration la plus élevée.

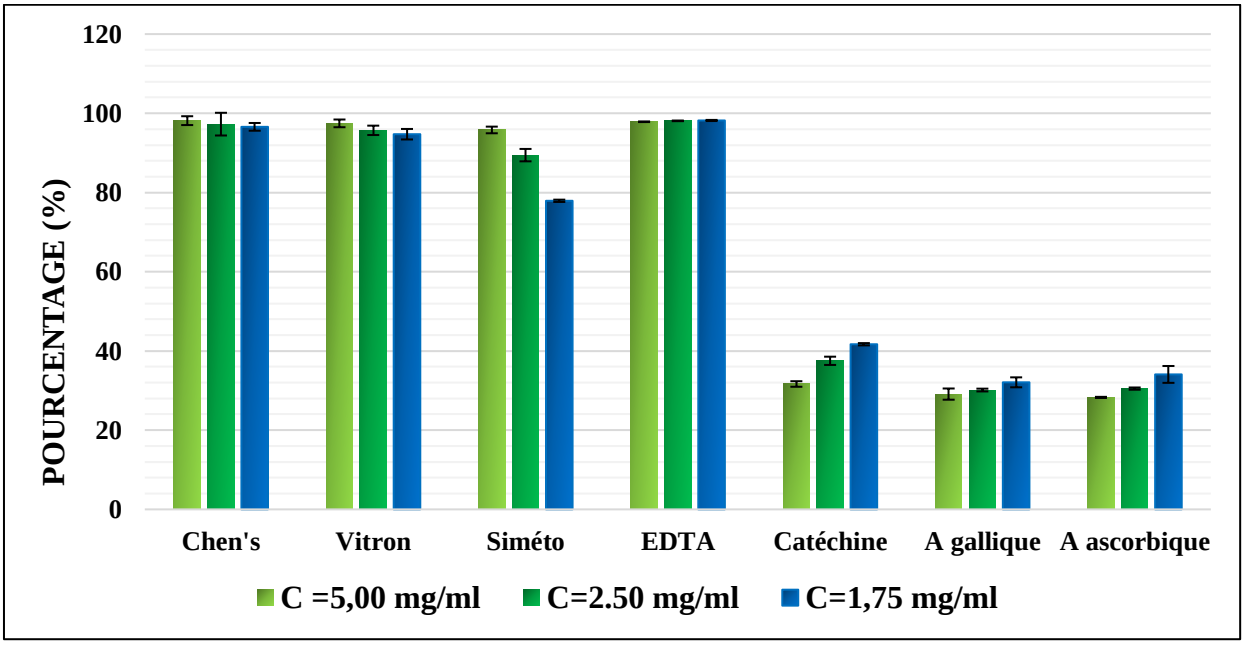


Figure 42: Pourcentage de chélation des ions ferrique dans les échantillons et les standards.

Les radicaux libres les plus nocifs sont les radicaux hydroxyle (HO.) et les radicaux d'hydrogène produits dans les réactions de radiation ionisante ou de toxicologie environnementale, ainsi que les radicaux superoxyde (O2-) qui sont produits dans les réactions de transport d'électrons mitochondriaux. Naturellement, la superoxyde dismutase forme rapidement du peroxyde d'hydrogène (H2O2) à partir de (O2-). Le fer ferreux libre (Fe2+) et le cuivre (Cu+) participent aux réactions de Fenton avec H2O2 pour produire des radicaux hydroxyles et des anions hydroxydes, oxydant les métaux en Fe3+ et Cu2+. Le fer ou le cuivre libre oxydé peut ensuite oxyder le H2O2 pour former des radicaux hydroperoxyles (HOO-) et des protons (H+), réduisant les métaux en Fe2+ et Cu+, de sorte que de nouvelles réactions de peroxydation peuvent se produire de manière cyclique, ce qui entraîne de nombreux dysfonctionnements cellulaires, enzymatiques et vasculaires (Armstrong et Stratton., 2016).

Le son de blé a une activité antioxydante supérieure à celle d'autres fractions broyées,2 et contient divers composants tels que l'acide phytique, les polyphénols (y compris les lignanes et les acides phénoliques), les vitamines et les minéraux (Adlercreutz., 1990).

Diverses études ont rapporté que ces composés présentent des capacités antioxydantes significatives, notamment en piégeant les radicaux libres (par exemple, en réduisant l'oxydation

des lipides), en chélatant les ions métalliques et en activant les enzymes antioxydantes, ce qui suggère des propriétés antioxydantes du son de blé (Sang et Zhu., 2014).

Environ 95% des composés phénoliques sont liés aux polysaccharides de la paroi cellulaire et ils sont tous désignés comme des composés phénoliques de fibres alimentaires (Vitaglione et al., 2008). Comme beaucoup d'autres composés phytochimiques, les acides phénoliques et les flavonoïdes se trouvaient principalement sous des formes insolubles dans la couche de son de blé, liés par des esters aux composants de la paroi cellulaire tels que les arabinoxylanes et la lignine. D'autre part, seul un faible pourcentage d'antioxydants solubles de faible poids moléculaire (environ 6 %), qui sont libres de toute interaction chimique ou physique avec d'autres macromolécules, est présent dans le son de blé (Liyana-Pathirana et Shahidi., 2006).

Les résultats de l'activité antioxydante étudiée à l'aide de diverses méthodes in vitro, notamment l'activité de piégeage des radicaux DPPH, le blanchiment du β-carotène, le pouvoir réducteur FRAP et l'activité de chélation FIC, ont montré un potentiel antioxydant considérable, qui pourrait être en partie responsable des propriétés médicinales du son de blé dur. L'activité antiradicalaire du test DPPH et FRAP s'est avérée assez faible par rapport aux autres méthodes. Les résultats de notre test FIC et le test de blanchiment du β-carotène sont très importants. Bien que tous les tests présentés dans cette étude aient été évalués et utilisés par les chercheurs pour étudier les propriétés antioxydantes. Les résultats des tests pour les composés phénoliques et l'activité antioxydante des extraits de SBD montrent une faible corrélation positive et négative, sauf entre l'activité antioxydante du test β-carotène avec CTC qui est positivement corrélée avec r^2=0.799 et l'activité antioxydante du test FIC avec CPT qui a une corrélation positive parfaite avec r^2=0.966, et nous notons que la corrélation entre le CFT et l'activité de piégeage du DPPH est positivement remarquable avec r^2=0.780, car la plupart des flavonoïdes possèdent de fortes propriétés antioxydantes suivant le mécanisme de rupture de chaîne et ils peuvent agir comme antioxydants en agissant comme des donneurs d'hydrogène ou en agissant comme des agents chélateurs et peuvent aider à contrôler l'étendue de la peroxydation lipidique en chélatant les ions métalliques. (Iqbal et al., 2007; Žilić et al., 2013) trouvent que la capacité antioxydante totale avait une corrélation positive avec les phénols totaux libres dans le blé tendre et le blé dur (r^2=0.76 et 0.80). Cependant, considérant que la plupart des composés phénoliques des céréales sont liés au polysaccharide insoluble, la capacité antioxydante du blé dépend surtout de cette forme phénolique. Une corrélation significative entre les propriétés antioxydantes des grains et des fractions de blé a été précédemment rapportée dans de nombreuses études, d'autres ont trouvé des corrélations significatives entre la capacité de piégeage du DPPH et la CPT (Moore et al., 2006). Ainsi, la CPT est rapportée comme étant directement associée à l'activité antioxydante (Iqbal et al., 2007). Liyana-Pathirana et Shahidi., (2007) ont signalé que seule la

fraction de son présente une activité antioxydante plus élevée que les autres fractions obtenues après la mouture du blé et ont constaté que la capacité à piéger les radicaux DPPH dans les fractions de blé était dans l'ordre suivant : son> germe> grain entier> farine, pour les cultivars de blé. Ces résultats ont été confirmés par ceux de (Onyeneho et Hettiarachchy., 1992) et (Higuchi., 2014), qui trouvent que le son de blé a une activité antioxydante plus élevée que les autres fractions de blé et que l'extrait de son de blé ayant une concentration élevée d'acides phénoliques, il a une activité antioxydante plus forte que les autres fractions de blé. Guerini et al., (2020) rapporte un résultat très élevé par rapport à nos résultats d'IC_{50} de l'activité de piégeage des radicaux des extraits avec les radicaux DPPH. Les tests ont montré une tendance d'activité avec une IC_{50} de (3.61 à 1194.80 µg/ml) dans des extrait du son de blé dur de différentes variétés (Guerrini et al., 2020). Cependant les résultats d'une étude récente de Saidani et al., (2022) sur l'activité antioxydante des couches périphériques du blé tendre cultivé en Algérie pendant le remplissage des graines montre des valeur plus faibles que nos résultats aves des IC_{50} allant de 181.924 mg/ml à 345.6 mg/ml. Ces résultats révèlent que les extraits entre eux ont un potentiel antioxydant significatif, à l'augmentation de l'activité chélatrice pendant le remplissage des grains.

Les composés phénoliques sont considérés comme des piégeurs de radicaux libres, et leurs propriétés antioxydantes dépendent de leur structure chimique. Plus précisément, ces propriétés dépendent de leur capacité à donner de l'hydrogène ou un électron et de leur capacité à délocaliser l'électron non apparié au sein de la structure aromatique (Prior et al., 2005).

Les résultats obtenus montrent que les antioxydants contenus dans les extraits de SBD peuvent piéger les radicaux libres et réduire les oxydants. Les propriétés de donneur d'électrons de l'extrait de blé neutralisent ainsi les radicaux libres en formant des produits stables. Le résultat de la réaction de réduction est de mettre fin aux réactions en chaîne des radicaux qui peuvent autrement être très dommageables (Liyana-Pathirana et Shahidi., 2006).

Le son de blé dur examiné dans cette étude a démontré une bonne capacité de réduction, agissant ainsi comme des reductones efficaces. Ceci est en accord avec Liangli., (2007) qui a rapporté que les acides phénoliques, qui sont liés de manière covalente à la matrice insoluble du son de blé, possèdent différentes fonctions antioxydantes. Parmi les différentes espèces de métaux de transition, le fer est connu comme le pro-oxydant le plus puissant en raison de sa grande réactivité (Gülçin., 2006), et les agents chélateurs peuvent piéger ou désactiver les ions métalliques et potentiellement inhiber les processus oxydatifs médiés par les métaux de transition. Le son de blé a une capacité substantielle de fixation des ions métalliques et les principaux composants actifs ont été proposés comme fibres alimentaires ou phytate dans le son (Frolich., 1990). Les travaux de Wang et al., (2013) ont indiqué que la capacité de chélation des métaux des composés phénoliques ne semble pas être liée à leur efficacité en matière de

pouvoir réducteur et d'activités de piégeage des radicaux. Le son de blé présente les liens d'activité les plus forts pour le pouvoir réducteur et l'activité chélatrice des ions ferreux (Zhu et al., 2010). Les travaux de Saidani et al., (2022) montre pour une activité chélatante très faible par rapport à nos résultats, les résultats obtenus montrent que la capacité des extraits des couches périphériques du blé à réduire le fer est inférieure à celle du standard, mais elle est variable entre les extraits des couches périphériques étudiées, la comparaison du pouvoir antioxydant des extraits entre eux révèle que la couche périphérique des grains matures est la plus active.

Le test au β-carotène est une technique complémentaire qui simule la réaction de peroxydation des lipides in vitro. Il consiste à mesurer le blanchiment du β-carotène résultant de son oxydation par les produits de dégradation de l'acide linoléique. L'oxydation de ce dernier est catalysée par la chaleur (50°C) (Laguerre et al., 2007). L'ajout d'extraits de SBD et de standards a pour effet de retarder la propagation de la réaction. L'activité de nos extraits était modérément élevée par rapport aux molécules de référence. La comparaison avec d'autres travaux est une tâche délicate en raison de certaines limitations de la technique, telles que les différentes concentrations d'extraits utilisées par les chercheurs et aussi l'oxydation de l'acide linoléique induite thermiquement qui n'est pas contrôlée, ce qui induit souvent une variabilité des données (Laguerre et al., 2007).

Brewer et al., (2014) a constaté que le contenu phytochimique et l'activité antioxydante varient considérablement dans les variétés de blé ; par conséquent, la sélection de génotypes de grains de céréales avec des niveaux élevés de ces composants est d'un grand intérêt pour les consommateurs de céréales. IL a également constaté que la taille des particules du son de blé influençait l'extractibilité des composés phytochimiques et les propriétés antioxydantes. Cependant, les études de He et al., (2018) montrent que la poudre superfine du son de blé dur a montré de meilleures activités antioxydantes dans l'activité de piégeage du DPPH avec une valeur d'IC_{50} de (0.62 mg/ml) et l'activité de chélation des ions ferreux avec (0.67 mg/ml) en raison de sa dispersibilité et de sa solubilité notables, et elle pourrait être utilisée comme régulateur nutritionnel potentiel, car elle pourrait absorber les lipides nocifs et inhiber les dommages oxydatifs des radicaux libres pour maintenir la santé humaine (He et al., 2018). Dans une étude de Yu et al., (2021) les effets de six méthodes de modification (micro-ondes, vapeur, extrusion, vapeur surchauffée, fermentation et traitements enzymatiques) sur la composition chimique, les caractéristiques de qualité de transformation et la capacité antioxydante du son de blé ont été déterminés. Par rapport au son témoin non modifié, les six méthodes de modification ont eu un impact significatif sur les propriétés physiques et chimiques et la capacité antioxydante du son de blé (Ye et al., 2021).

Enfin, les extraits présentent une forte activité en raison de leur richesse en composés inhibiteurs du cycle cellulaire, de leur capacité antioxydante et de chélation des métaux comme les acides phénoliques, les alkyresorcinols et l'acide phytique (Sapirstein., 2015). Ces résultats indiquent que le son de blé peut remplacer les antioxydants synthétiques dans les formulations alimentaires et jouer un rôle majeur dans la santé humaine (Abozed et al., 2014).

V.3.5. L'activité antibactérienne

Le test de sensibilité aux antimicrobiens a été utilisé pour évaluer la sensibilité des souches bactériennes à nos extraits hydroalcooliques du son de blé dur des trois variétés Chen's, Siméto et vitron et 5 Autres agents antimicrobiens couramment utilisés pour traiter les infections humaines. L'action bactériostatique se traduit par l'apparition d'une zone d'inhibition autour du disque de papier imprégné d'extraits bruts étudiés comme le montrent les photos de nos boites de test après incubation **(figure 43)**, les diamètres de croissance des bactéries ont été utilisés pour décider si la bactérie était sensible ou résistante aux extraits de son de blé dur et à chaque agent antimicrobien et les résultats du test de sensibilité microbienne sont regroupés dans le **Tableau 25**.

Tableau 25: Diamètres d'inhibition des souches bactérienne.

Extrait	E. coli	Klebsiella pneumoniae	Pseudomonas aeruginosa	Proteus mirabilis	Staphylococcus aureus
Chen's 500*	7.00	7.00	0.00	7.00	0.00
Chen's 250	7.00	7.00	0.00	7.00	0.00
Chen's 125	7.00	7.00	0.00	7.00	0.00
Chen's 72.5	8.00	7.00	0.00	7.00	0.00
Siméto 500	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Siméto 250	8.00	8.00	7.00	7.00	0.00
Siméto 125	9.00	0.00	8.00	8.00	0.00
Siméto 72.5	9.00	0.00	8.00	8.00	0.00
Vitron 500	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vitron 250	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Vitron 125	7.00	7.00	7.00	7.00	0.00
Vitron 72.5	8.00	8.00	8.00	7.00	0.00
PEN	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AMX	30.00	0.00	11.00	0.00	21.00
GEN	25.00	29.00	26.00	27.00	27.00
CMN	0.00	29.00	30.00	29.00	20.00
E	0.00	20.00	19.00	19.00	34.00

* Concentration en mg/ml, PNE : pénicilline 10 µg, AMX : amoxicilline 25 µg, GNE : gentamicine 10 µg, CMN : clindamycine 2 µg, E : érythromycine : 15 µg.

Les extraits de SBD n'ont révélé aucune activité inhibitrice vis-à-vis la souche de Gram+ staphylococcus aureus elle est parfaitement résistants à tous les niveaux de concentration des extraits. En revanche, elle été sensibles à certains antibiotiques de références. D'autre part, les autres souches ont révélé une sensibilité faible aux différentes concentrations d'extraits de SBD des trois variété Chen's, Siméto et Vitron. Nos résultats montrent donc une variabilité des qualités bactériostatiques des extraits vis-à-vis des différentes souches.

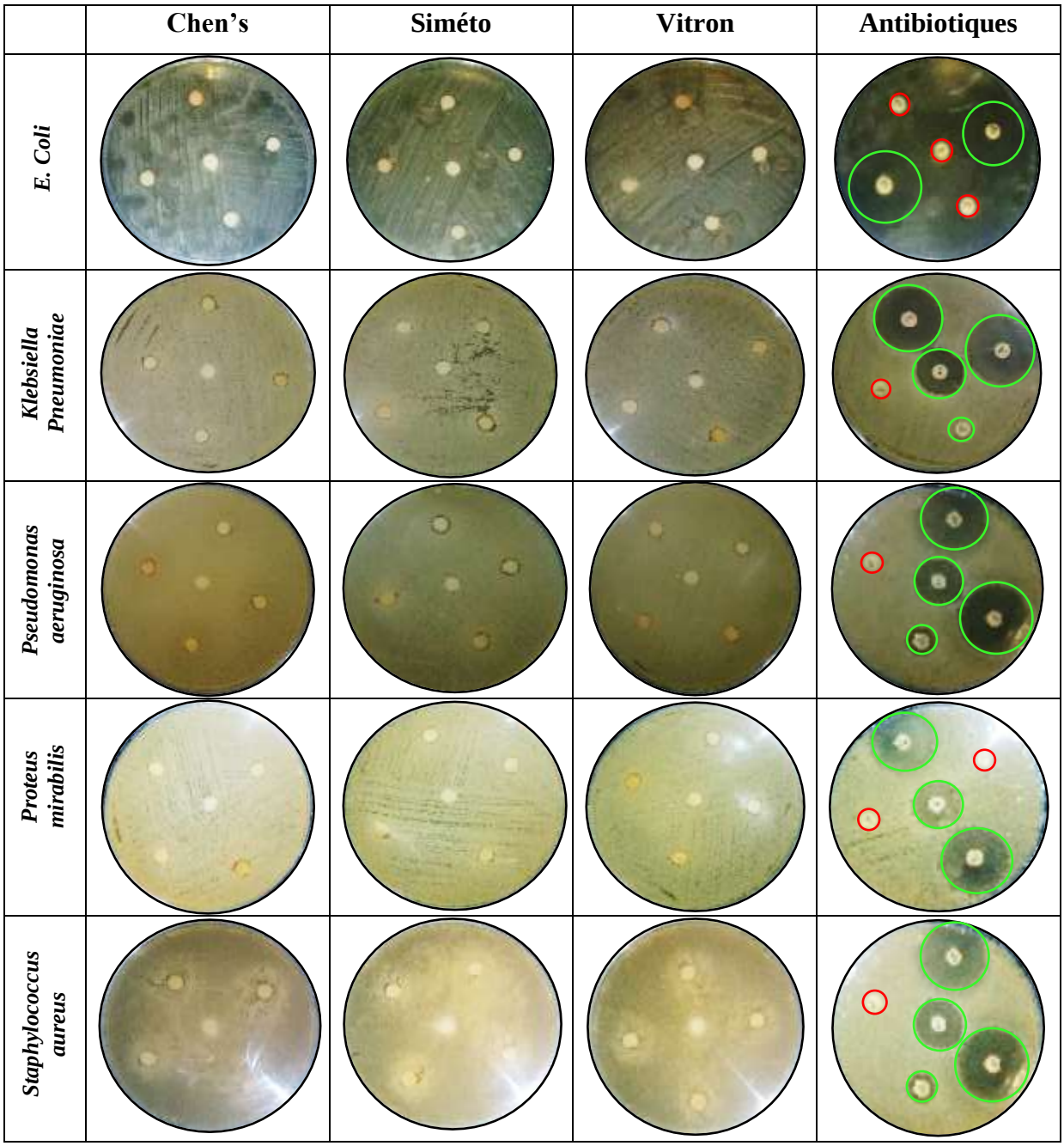


Figure 43: Photos des boites de Pétri après incubation.

Selon la littérature (Elhassan et Gadir., 2017), l'activité antimicrobienne de divers extraits de son de blé des variétés soudanais a été mise en évidence envers les bactéries gram-positives et gram-négatives et des champignons : Bacillus subtilis NCTC 8236 (Gram+), Escherichia coli ATCC 25922 (Gram-) Pseudomonas aeruginosa ATCC 27853 (Gram-), Staphylococcus aureus ATCC 25923 (Gram+), Candida albicans ATCC 7596, Aspergillus Niger ATCC 9763. Il est à noter que les extraits de son de blé sont une source potentielle d'activités antimicrobiennes qui agissent principalement sur les bactéries Gram-positives et Gram-négatives et les champignons. Ainsi, ils peuvent être un agent protecteur efficace en tant qu'additif antioxydant et antibactérien dans les systèmes alimentaires. Cependant les résultats obtenus montrent que ces sous-produits sont donc une très bonne source de composés bioactifs présentant des effets bénéfiques sur la santé (Elhassan et Gadir., 2017).

Des résultats plus intéressants ont été obtenus par (Guerrini et al, 2020) dans une étude antimicrobienne des extraits éthanolique a 65 % avec une extraction a ultrason du son de blé dur d'une variété Italienne contre la souche S. aureus avec des CMI de 16 µg/ml pour les extraits de son de blé dur. En ce qui concerne une autre souche de référence S. aureus ATCC, les CMI des extraits de son de blé son de 128 µg/ml, 521 µg/ml et 256 µg/ml. Les mêmes résultats ont été obtenus en comparant les extrait de son de blé sur la souche isolée clinique MSSA (128 µg/ml et 256 µg/ml). Ce test d'activité antimicrobienne a défini que le son de blé dur comme étant potentiellement de bonnes sources antimicrobiennes. Ils pourraient être utilisés comme ingrédients actifs dans des produits cosmétiques ou dermo-fonctionnels à activité antimicrobienne ou comme additifs pour la stabilité microbiologique et donc comme conservateurs naturels dans des préparations finies (Guerrini et al., 2020). En 2013, Borges et al., Ont expliqué que le mécanisme d'action antibactérien des féruliques acides (l'un des composés dominants dans les extraits de son de blé dur) est dû à l'hydrophobie, à la diminution de la charge superficielle négative et à l'apparition d'une rupture locale et de la formation de pores qui provoquent des changements irréversibles dans les membranes cellulaires (Borges et al., 2013). Il en ressort que, les activités antioxydantes et antimicrobiennes intéressantes des extraits du son de blé obtenus dans notre étude peuvent être revalorisées dans l'alimentation et la santé humaine, et ce, dans le cadre de la prévention et la thérapie de certaines pathologies. Le son de blé sous-produit largement disponible à l'échelle industrielle peut être exploité et utilisés par industries alimentaires et autres comme des conservateurs naturels, des agents de fortification et les différentes préparations des additifs alimentaires.

Conclusion

Le présent travail de recherche qui consiste à tester l'activité biologique du son de blé dur "*Triticum turgidum subsp. Durum (Desf.)*" de quelques variétés algériennes pour sa revalorisation dans l'alimentation et la santé humaine, nous a permis d'obtenir les résultats suivants :

1. L'enquête a révélé que les sujets enquêtés consomment moins de son de blé à l'état brute, c'est à dire que leurs structures de consommation quotidienne est largement pauvre en son de blé. Les données de l'enquête ont révélé aussi que ce sous-produit est utilisé rarement et uniquement dans le cas du traitement de quelque pathologies digestives et métaboliques notamment le syndrome de l'intestin irritable et le diabète de type 2, et ce, sur recommandation des herboristes.
2. Le son de blé est composé d'une quantité très importante en fibres alimentaires de nature et insolubles avec des concentrations considérables en composés phénoliques (phénols totaux, flavonoïdes et des tanins condensés).
3. Les extraits du son de blé ont présenté une activité antioxydante très importante, le pouvoir antioxydant avec le DPPH et le test de FRAP est moins important par rapport à celui du blanchissement du β-carotène et l'effet chélateur des ions ferreux (FIC). Les tests de l'activité antibactérienne ont révélé que les souches testées ne sont pas sensibles aux extraits du son de blé.

Le son de blé, sous-produit de l'industrie céréalière s'est avéré très riche en fibres alimentaires, en composés phénoliques et possède une activité antioxydante considérable. Cette richesse en fibres et ce pouvoir antioxydant témoignent de la présence de certains principes actifs qui peuvent être valorisés dans l'industrie pharmaceutique et alimentaire pour la prévention et la thérapie de certaines pathologies digestives et métaboliques.

Ces résultats peuvent être exploités à l'échelle industrielle pour la fabrication et la commercialisation de produits enrichis en fibres de son de blé sous forme d'ingrédients alimentaires, de médicaments ou de compléments alimentaires en vue de permettre aux consommateurs de bénéficier de ses effets nutritionnels et thérapeutiques de ce sous-produit qui présente un rôle important dans l'alimentation et la santé humaine

Références bibliographiques

1. Abdel-Aal El Sayed M., Young Christopher J., Rabalski Iwona., Hucl Pierre., Fregeau-Reid Judith., 2007. "Identification and Quantification of Seed Carotenoids in Selected Wheat Species." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55 (3): 787–94. https://doi.org/10.1021/jf062764p.

2. Abecassis Joël., 1991. "Nouvelles Possibilités d'apprécier La Valeur Meunière et La Valeur Semoulière Des Blés." *Ind. Céréales* 81: 25–37.

3. Abozed Safaa S., El-kalyoubi M., Abdelrashid A., Salama Manal F., 2014. "Total Phenolic Contents and Antioxidant Activities of Various Solvent Extracts from Whole Wheat and Bran." *Annals of Agricultural Sciences* 59 (1): 63–67. https://doi.org/10.1016/j.aoas.2014.06.009.

4. Adlercreutz Herman., 1990. "Western Diet and Western Diseases: Some Hormonal and Biochemical Mechanisms and Associations." *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation* 50 (s201): 3–23. https://doi.org/10.1080/00365519009085798.

5. Adom Kafui Kwami., Sorrells Mark E., Liu Rui Hai., 2003. "Phytochemical Profiles and Antioxidant Activity of Wheat Varieties." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51 (26): 7825–34. https://doi.org/10.1021/jf030404l.

6. Ben Ahmed Mohamed., 2018. "Impact Des Fibres Alimentaires et Des Acides Gras à Chaîne Courte Sur Le Dialogue Tube Digestif, Foie et Tissus Périphériques, Dans Le Cadre d'une Surnutrition." *Thèse de Doctorat, Université d'Auvergne*.

7. Ait-Kaki Sabrina., 2008. "Contribution à l'étude de l'interaction Génotype x Milieu, Pour La Qualité Technologiques Chez Le Blé Dur En Algérie." UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR ANNABA.

8. Ait kaki Y., 2007. "Etude Comparative Des Potentialités Technologiques Des Blés Durs Algériens Anciens et Récents : Relation de La Qualité de Ces Blés Par Différentes Stratégies d'études : Critèrestechnologiques (Infra Rouge), Biochimiques (Électrophorèse Bidimensionelle) Et." *Doctorat d'Etat En Sciences*, no. Université Badji Mokhtar Annaba: 1–21.

9. Almeida Eveline Lopes., Chang Yoon Kil., Steel Caroline Joy., 2013. "Dietary Fibre Sources in Bread: Influence on Technological Quality." *LWT - Food Science and Technology* 50 (2): 545–53. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.08.012.

10. Amthor Jeffrey S., 2003. "Efficiency of Lignin Biosynthesis: A Quantitative Analysis." *Annals of Botany* 91 (6): 673–95. https://doi.org/10.1093/aob/mcg073.

11. Andersson Annica A.M., Andersson Roger., Piironen Vieno., Maija Lampi Anna., Nyström Laura., Boros Danuta., Fraś Anna., 2013. "Contents of Dietary Fibre Components and Their Relation to Associated Bioactive Components in Whole Grain Wheat Samples from the HEALTHGRAIN Diversity Screen." *Food Chemistry* 136 (3–4): 1243–48. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.09.074.

12. Antoine Carole., Peyron Stéphane., Mabille Frédéric., Lapierre Catherine., Bouchet Brigitte, Abecassis Joël., Xavier Rouau., 2003. "Individual Contribution of Grain Outer Layers and Their Cell Wall Structure to the Mechanical Properties of Wheat Bran." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51 (7): 2026–33. https://doi.org/10.1021/jf0261598.

13. Armstrong D., Stratton R.D,. 2016. *Oxidative Stress and Antioxidant Protection*. Edited by John Wiley & Sons The Science of Free Radical Biology and Disease. *Oxidative Stress and Antioxidant Protection*. Ed. John W. New Jersey. https://doi.org/10.1002/9781118832431.

14. Atienza Sergio G., Ballesteros Juan., Martín Antonio., Hornero-Méndez Dámaso., 2007. "Genetic Variability of Carotenoid Concentration and Degree of Esterification among Tritordeum (XTritordeum Ascherson et Graebner) and Durum Wheat Accessions." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55 (10): 4244–51. https://doi.org/10.1021/jf070342p.

15. Aune Dagfinn., Chan Doris S.M., Lau Rosa., Vieira Rui., Greenwood Darren C., Kampman Ellen., Norat Teresa., 2011. "Dietary Fibre, Whole Grains, and Risk of Colorectal Cancer: Systematic Review and Dose-Response Meta-Analysis of Prospective Studies." *BMJ (Online)* 343 (7833): 1082. https://doi.org/10.1136/bmj.d6617.

16. Awika Joseph M., 2011. *Advances in Cereal Science: Implications to Food Processing and Health Promotion*. *Advances in Cereal Science: Implications to Food Processing and Health Promotion*. Vol. 1089. http://dx.doi.org/10.1021/bk-2011-1089.ch001.

17. Babu Chalamacharla Raghu., Ketanapalli Harsha, Khasim Beebi Sheik., Chaitanya Kolluru Viswanatha., 2018. "Wheat Bran-Composition and Nutritional Quality: A Review." *Advances in Biotechnology and Microbiology* 9 (1): 1–7. https://doi.org/10.19080/AIBM.2018.09.555754.

18. Bacic A., Stone B A., 1981. "Chemistry and Organization of Aleurone Cell Wall Components From Wheat and Barley." *Functional Plant Biology* 8 (5): 475. https://doi.org/10.1071/pp9810475.

19. Barnert J., Messmann H., 2008. "Management of Lower Gastrointestinal Tract Bleeding." *Best Practice and Research: Clinical Gastroenterology* 22 (2): 295–312. https://doi.org/10.1016/j.bpg.2007.10.024.

20. Barron C., Surget A., Rouau X., 2007. "Relative Amounts of Tissues in Mature Wheat (Triticum Aestivum L.) Grain and Their Carbohydrate and Phenolic Acid Composition." *Journal of Cereal Science* 45 (1): 88–96. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2006.07.004.

21. Beaugrand Johnny., 2004. "Bases Cytologiques et Moléculaires de La Dégradation Enzymatique Du Son de Blé Tendre A."

22. Benhammou Nabila., Atik Bekkara Fawzia., Kadifkova Panovska Tatjana., 2009. "Antioxidant Activity of Methanolic Extracts and Some Bioactive Compounds of Atriplex Halimus." *Comptes Rendus Chimie* 12 (12): 1259–66. https://doi.org/10.1016/j.crci.2009.02.004.

23. Benzie Iris F.F., Strain J.J., 1996. "The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of 'Antioxidant Power': The FRAP Assay." *Analytical Biochemistry* 239 (1): 70–76. https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292.

24. Bhalla P.L., Singh M. B., 2017. *Wheat Biotechnology: Methods and Protocols*. http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-7337-8.

25. Bhupathiraju Shilpa N., Tobias Deirdre K., Malik Vasanti S., Pan An., Hruby Adela., Manson Joann E., Willett Walter C., Hu Frank B., 2014. "Glycemic Index, Glycemic Load, and Risk of Type 2 Diabetes: Results from 3 Large US Cohorts and an Updated Meta-Analysis." *American Journal of Clinical Nutrition* 100 (1): 218–32. https://doi.org/10.3945/ajcn.113.079533.

26. Bingham Sheila A., 1990. "Mechanisms and Experimental and Epidemiological Evidence Relating Dietary Fibre (Non-Starch Polysaccharides) and Starch to Protection against Large Bowel Cancer." *Proceedings of the Nutrition Society* 49 (2): 153–71. https://doi.org/10.1079/pns19900021.

27. Boizot Nathalie., Charpentier Jean-Paul., 2006. "Méthode Rapide d'évaluation Du Contenu En Composés Phénoliques Des Organes d'un Arbre Forestier." *Le Cahier Technique de l'Inra*, 79–82.

28. Borges Anabela., Ferreira Carla., Saavedra Maria J., Simões Manuel., 2013. "Antibacterial Activity and Mode of Action of Ferulic and Gallic Acids against Pathogenic Bacteria." *Microbial Drug Resistance* 19 (4): 256–65. https://doi.org/10.1089/mdr.2012.0244.

29. Boudouma D., 2009. "Composition Chimique Du Son de Blé Dur Produit Par Les Moulins Industriels Algériens." *Livestock Research for Rural Development* 21.

30. Boudreau Armand., Menard Germain., 1992. *Le Blé : Elements Fondamentaux et Transformation*. Edited by Presses Université Laval.

31. Bozzini A., Fabriani G., Lintas C., 1988. "Origin, Distribution, and Production of Durum Wheat in the World.," 1–16. http://www.cabdirect.org/abstracts/19880715144.html;jsessionid=ECD1519E49F7964680D91C76E1C8DEC7.

32. Brandolini Andrea., Paolo Castoldi., Luca Plizzari., Alyssa Hidalgo., 2013. "Phenolic Acids Composition, Total Polyphenols Content and Antioxidant Activity of Triticum Monococcum, Triticum Turgidum and Triticum Aestivum: A Two-Years Evaluation." *Journal of Cereal Science* 58 (1): 123–31. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.03.011.

33. Brewer Lauren Renee., Jittawan Kubola., Sirithon Siriamornpun., Thomas J. Herald., Yong Cheng Shi., 2014. "Wheat Bran Particle Size Influence on Phytochemical Extractability and Antioxidant Properties." *Food Chemistry* 152: 483–90. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.128.

34. Brouns Fred., Youna Hemery., Ruth Price., Nuria Mateo Anson., 2012. "Wheat Aleurone: Separation, Composition, Health Aspects, and Potential Food Use." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 52 (6): 553–68. https://doi.org/10.1080/10408398.2011.589540.

35. Brown Lisa., Bernard Rosner., Walter W. Willett., Frank M., Sacks. 1999. "Cholesterol-Lowering Effects of Dietary Fiber: A Meta-Analysis." *American Journal of Clinical Nutrition* 69 (1): 30–42. https://doi.org/10.1093/ajcn/69.1.30.

36. Buksa Krzysztof., 2018. "Extraction and Characterization of Rye Grain Starch and Its Susceptibility to Resistant Starch Formation." *Carbohydrate Polymers* 194: 184–92. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.04.024.

37. Burkhard Susanne., Volker Böhm., 2007. "Development of a New Method for the Complete Extraction of Carotenoids from Cereals with Special Reference to Durum Wheat (Triticum Durum Desf.)." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 55 (21): 8295–8301. https://doi.org/10.1021/jf0712853.

38. Burkitt D. P., 1971. "Possible Relationships between Bowel Cancer and Dietary Habits." *Proc Res Soc Med* 64: 964–65.

39. Burton-Freeman., Britt Dhanesh Liyanage., Sajida Rahman., Indika Edirisinghe., 2017. "Ratios of Soluble and Insoluble Dietary Fibers on Satiety and Energy Intake in Overweight Pre- and Postmenopausal Women." *Nutrition and Healthy Aging* 4 (2): 157–68. https://doi.org/10.3233/NHA-160018.

40. Călinoiu Lavinia Florina., Dan Cristian Vodnar., 2018. "Whole Grains and Phenolic Acids: A Review on Bioactivity, Functionality, Health Benefits and Bioavailability." *Nutrients* 10 (11). https://doi.org/10.3390/nu10111615.

41. Carpenter D., 1993. "Methods of Analysis for Nutrition Labeling." *AOAC International*, 624. http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US9569369.

42. Carver Brett F., 2009. *Wheat Science and Trade*. *Wheat Science and Trade*. https://doi.org/10.1002/9780813818832.

43. Champ Martine., 2018. "Devrions-Nous Manger plus de Céréales Complètes ?" *Cahiers de Nutrition et de Dietetique* 53 (1): 22–33. https://doi.org/10.1016/j.cnd.2017.12.001.

44. Chen Cheng., Dongxue Jin., Xinping Ouyang., Lisha Zhao., Xueqing Qiu., Furong Wang., 2018. "Effect of Structural Characteristics on the Depolymerization of Lignin into Phenolic Monomers." *Fuel* 223: 366–72. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.03.041.

45. Chen G. C., Lv D. B., Pang Z., Dong J. Y., Liu Q. F., 2013. "Dietary Fiber Intake and Stroke Risk: A Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies." *European Journal of Clinical Nutrition* 67 (1): 96–100. https://doi.org/10.1038/ejcn.2012.158.

46. Cheng Wen., Yujie Sun., Mingcong Fan., Yan Li., Li Wang., Haifeng Qian., 2021. "Wheat Bran, as the Resource of Dietary Fiber: A Review." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1913399.

47. Cherbut C., 1995. "Fermentation Et Fonction Digestive Colique." *Cahiers de Nutrition et de Dietetique* 30 (3): 143–47.

48. Cheurfa M., Allem R., 2016. "Évaluation de l'activité Anti-Oxydante de Différents Extraits Des Feuilles d'Aloysia Triphylla (L'Hérit.) d'Algérie in Vitro." *Phytotherapie* 14 (3): 181–87. https://doi.org/10.1007/s10298-015-0969-4.

49. Chew Kia Yong., Iain A. Brownlee., 2018. "The Impact of Supplementation with Dietary Fibers on Weight Loss: A Systematic Review of Randomised Controlled Trials." *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre* 14: 9–19. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2017.07.010.

50. Chew Yik Ling., Joo Kheng Goh., Yau Yan Lim., 2009. "Assessment of in Vitro Antioxidant Capacity and Polyphenolic Composition of Selected Medicinal Herbs from Leguminosae Family in Peninsular Malaysia." *Food Chemistry* 116 (1): 13–18. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.091.

51. Chuang Shu Chun., Teresa Norat., Neil Murphy., Anja Olsen., Anne Tjønneland., Kim Overvad., Marie Christine Boutron-Ruault., et al. 2012. "Fiber Intake and Total and Cause-Specific Mortality in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition Cohort." *American Journal of Clinical Nutrition* 96 (1): 164–74. https://doi.org/10.3945/ajcn.111.028415.

52. Clarke J. M., Norvell W. A., Clarke F. R., Buckley W. T., 2002. "Concentration of Cadmium and Other Elements in the Grain of Near-Isogenic Durum Lines." *Canadian Journal of Plant Science* 82 (1): 27–33. https://doi.org/10.4141/P01-083.

53. Costabile Adele., Annett Klinder., Francesca Fava., Aurora Napolitano., Vincenzo Fogliano., Clare Leonard., Glenn R. Gibson., Kieran M. Tuohy., 2008. "Whole-Grain Wheat Breakfast Cereal Has a Prebiotic Effect on the Human Gut Microbiota: A Double-Blind, Placebo-Controlled, Crossover Study." *British Journal of Nutrition* 99 (1): 110–20. https://doi.org/10.1017/S0007114507793923.

54. Cruz-Requena M., Escobedo-García S., Salas-Tovar J. A., Mora-Cura Y., Chávez-González M. L., Castillo-Reyes F., Flores-Gallegos A. C., Rodríguez-Herrera R., 2019. "Definitions and Regulatory Perspectives of Dietary Fibers." *Dietary Fiber: Properties, Recovery, and Applications*, 1–25. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816495-2.00001-0.

55. Dahl Wendy J., Maria L. Stewart., 2015. "Position of the Academy of Nutrition and Dietetics: Health Implications of Dietary Fiber." *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics* 115 (11): 1861–70. https://doi.org/10.1016/j.jand.2015.09.003.

56. Davin Laurence B., Norman G. Lewis., 2005. "Lignin Primary Structures and Dirigent Sites." *Current Opinion in Biotechnology* 16 (4): 407–15. https://doi.org/10.1016/j.copbio.2005.06.011.

57. Delcour Jan A.,bCarl Hoseney R., 2010. "Principles of Cereal Science and Technology." *Principles of Cereal Science and Technology*. https://doi.org/10.1094/9781891127632.

58. Devries J. W., Prosky L., Li B., Cho S., 1999. "A Historical Perspective on Defining Dietary Fiber." *Cereal Foods World* 44 (5): 367–69.

59. Dey Estera Szwajcer., Konstantin Mikhailopulo., 2009. "A Food Grade Approach for the Isolation of Major Alkylresorcinols (ARs) from Rye Bran Applying Tailored Supercritical Carbon Dioxide (ScCO2) Extraction Combined with HPLC." *Journal of Supercritical Fluids* 51 (2): 167–73. https://doi.org/10.1016/j.supflu.2009.09.005.

60. Dietary Guidelines Advisory Committee., 2015. "Scientific Report of the 2015 Dietary Guidelines Advisory Committee. Advisory Report to the Secretary of Health and Human Services and the Secretary of Agriculture. Part D. Chapter 2: Dietary Patterns, Foods and Nutrients, and Health Outcomes."

61. Dikeman Cheryl L., Fahey George C., 2006. "Viscosity as Related to Dietary Fiber: A Review." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 46 (8): 649–63. https://doi.org/10.1080/10408390500511862.

62. Donato Paola Di., Annarita Poli., Valentina Taurisano., Barbara Nicolaus., 2015. "Polysaccharides from Bioagro-Waste for New Biomolecules." *Polysaccharides: Bioactivity and Biotechnology*, 603–37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0_16.

63. Dreher Mark L., 2018. *Dietary Fiber in Health and Disease*. *Dietary Fiber in Health and Disease*. Vol. 6. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50557-2.

64. DuPont M. Susan., Robert R. Selvendran., 1987. "Hemicellulosic Polymers from the Cell Walls of Beeswing Wheat Bran: Part I, Polymers Solubilised by Alkali at 2°." *Carbohydrate Research* 163 (1): 99–113. https://doi.org/10.1016/0008-6215(87)80169-6.

65. Earth Policy Institute., 2013. "From U.S. Department of Agriculture, Production, Supply, & Distribution." 2013. http://www.earth-policy.org/indicators/C54, 1.11.2013.

66. Edwards C A., 1995. "Dietary Fibre, Fermentation and the Colon." *Dietary Fibre - Mechanisms of Action in Human Physiology and Metabolism*, 51–60.

67. Elhassan F.A., Suad A. Gadir., 2017. "Antimicrobial Activities of Six Types of Wheat Bran." *IOSR Journal of Applied Chemistry* 10 (03): 61–69. https://doi.org/10.9790/5736-1003016169.

68. Elleuch Mohamed., Dorothea Bedigian., Olivier Roiseux., Souhail Besbes., Christophe Blecker., Hamadi Attia., 2011. "Dietary Fibre and Fibre-Rich by-Products of Food Processing: Characterisation, Technological Functionality and Commercial Applications: A Review." *Food Chemistry* 124 (2): 411–21. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.06.077.

69. Esposito Fabrizio., Guido Arlotti., Angela Maria Bonifati., Aurora Napolitano., Davide Vitale., Vincenzo Fogliano., 2005. "Antioxidant Activity and Dietary Fibre in Durum Wheat Bran By-Products." *Food Research International* 38 (10): 1167–73. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2005.05.002.

70. Eswaran Shanti., Jane Muir., William Chey D., 2013. "Fiber and Functional Gastrointestinal Disorders." *American Journal of Gastroenterology* 108 (5): 718–27. https://doi.org/10.1038/ajg.2013.63.

71. European Food Safety Authority., 2010. "Scientific Opinion on Dietary Reference Values for Carbohydrates and Dietary Fibre." *EFSA Journal* 8 (3): 1462. http://www.efsa.europa.eu/sites/default/files/scientific_output/files/main_documents/1462.pdf.

72. Evans Charlotte E.L., Greenwood Darren C., Threapleton Diane E., Cleghorn Christine L., Nykjaer Camilla., Woodhead Charlotte E., Gale Christopher P., Burley Victoria J., 2015. "Effects of Dietary Fibre Type on Blood Pressure: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials of Healthy Individuals." *Journal of Hypertension* 33 (5):

897–911. https://doi.org/10.1097/HJH.0000000000000515.

73. Fairweather-Tait Susan J., Wright A. J. A., 1990. "The Effects of Sugar-Beet Fibre and Wheat Bran on Iron and Zinc Absorption in Rats." *British Journal of Nutrition* 64 (2): 547–52. https://doi.org/10.1079/bjn19900054.

74. Farah Hosseinian B., Dave Oomah., Rocio Campos-Vega., 2017. *Dietary Fibre Functionality in Food Nutraceuticals : From Plant to Gut*. Functional. http://library1.nida.ac.th/termpaper6/sd/2554/19755.pdf.

75. Fardet Anthony., 2010. "New Hypotheses for the Health-Protective Mechanisms of Whole-Grain Cereals: What Is beyond Fibre?" *Nutrition Research Reviews* 23 (1): 65–134. https://doi.org/10.1017/S0954422410000041.

76. Farhat Wissam., Venditti Richard., Quick Ashley., Taha Mohamed., Mignard Nathalie., Becquart Frederic., Ayoub Ali., 2017. "Hemicellulose Extraction and Characterization for Applications in Paper Coatings and Adhesives." *Industrial Crops and Products* 107: 370–77. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.055.

77. Farvid Maryam S., Heather Eliassen A., Eunyoung Cho., Xiaomei Liao., Wendy Y. Chen., Walter C. Willett., 2016. "Dietary Fiber Intake in Young Adults and Breast Cancer Risk." *Pediatrics* 137 (3). https://doi.org/10.1542/peds.2015-1226.

78. Feillet Pierre., 2000. "Le Grain de Blé : Composition et Utilisation." *Journal of Chemical Information and Modeling* 53 (9): 316.

79. Ferrari Pietro., Sabina Rinaldi., Mazda Jenab., Annekatrin Lukanova., Anja Olsen., Anne Tjønneland., Kim Overvad., et al. 2013. "Dietary Fiber Intake and Risk of Hormonal Receptor-Defined Breast Cancer in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition Study." *American Journal of Clinical Nutrition* 97 (2): 344–53. https://doi.org/10.3945/ajcn.112.034025.

80. Frolich W., 1990. "Chelating Properties of Dietary Fiber and Phytate. The Role for Mineral Availability." *Advances in Experimental Medicine and Biology* 270: 83–93. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-5784-1_8.

81. Fuller Stacey., Eleanor Beck., Salman Hayfa., Tapsell Linda., 2016. "New Horizons for the Study of Dietary Fiber and Health: A Review." *Plant Foods for Human Nutrition* 71 (1). https://doi.org/10.1007/s11130-016-0529-6.

82. Furda I., Brine C. J., 1990. "New Developments in Dietary Fiber: Preface." *Advances in Experimental Medicine and Biology* 270 (1981).

83. Galanakis Charis M., 2019. *Dietary Fiber: Properties, Recovery and Applications*. Elsevier.

84. Gallagher Emily Jane., Derek LeRoith., 2015. "Obesity and Diabetes: The Increased Risk of Cancer and Cancer-Related Mortality." *Physiological Reviews* 95 (3): 727–48. https://doi.org/10.1152/physrev.00030.2014.

85. Gassner G., 1973. "Mikroskopische Untersuchung Planzlicher Lebensmittel. Stuttgard." *Gustav Fisher Verlag*, 865.

86. Ghodrat Ali., Akbar Yaghobfar., Yahya Ebrahimnezhad., Habib Aghdam Shahryar., Abolfazl Ghorbani., 2017. "In Vitro Binding Capacity of Organic (Wheat Bran and Rice Bran) and Inorganic (Perlite) Sources for Mn, Zn, Cu, and Fe." *Journal of Applied Animal Research* 45 (1): 80–84. https://doi.org/10.1080/09712119.2015.1124338.

87. Giet Jean Michel., Roiseux Olivier., Christophe Blecker Christophe., 2010. "Enzymatic Process Development for the Extraction of Ferulic from Wheat Bran." *Biotechnology, Agronomy and Society and Environment* 14 (SPEC. ISSUE 2): 539.

88. Gilhooly Cheryl H., Sai Krupa Das., Golden Julie K., McCrory Megan A., Rochon James., DeLany James P., Freed Alicia M., 2008. "Use of Cereal Fiber to Facilitate Adherence to a Human Caloric Restriction Program." *Aging Clinical and Experimental Research* 20 (6): 513–20. https://doi.org/10.1007/BF03324878.

89. Gill Samantha K., Megan Rossi., Balazs Bajka., Kevin Whelan., 2021. "Dietary Fibre in Gastrointestinal Health and Disease." *Nature Reviews Gastroenterology and Hepatology* 18 (2): 101–16. https://doi.org/10.1038/s41575-020-00375-4.

90. Graham R. D., Welch R. M., 2000. "Plant Food Micronutrient Composition and Human Nutrition." *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 31 (11–14): 1627–40. https://doi.org/10.1080/00103620009370529.

91. Grant Cynthia., Cubadda Francesco., Carcea Marina., Pogna Norberto E., Gazza Laura., 2012. "Vitamins, Minerals, and Nutritional Value of Durum Wheat." In *Durum Wheat Chemistry and Technology: Second Edition*, Second Edi, 125–37. AACC International, Inc. https://doi.org/10.1016/B978-1-891127-65-6.50012-X.

92. Guerrini Alessandra., Burlini Ilaria., Lorenzo Belén Huerta., Grandini Alessandro., Vertuani Silvia., Tacchini Massimo., Sacchetti Gianni., 2020. "Antioxidant and Antimicrobial Extracts Obtained from Agricultural By-Products: Strategies for a Sustainable Recovery and Future Perspectives." *Food and Bioproducts Processing* 124: 397–407. https://doi.org/10.1016/j.fbp.2020.10.003.

93. Guillon F., Auffret A., Robertson J. A., Thibault J. F., Barry J. L., 1998. "Relationships between Physical Characteristics of Sugar-Beet Fibre and Its Fermentability by Human Faecal Flora." *Carbohydrate Polymers* 37 (2): 185–97. https://doi.org/10.1016/S0144-8617(98)00053-8.

94. Guillon F., Champ M., 2000. "Structural and Physical Properties of Dietary Fibres, and Consequences of Processing on Human Physiology." *Food Research International* 33 (3–4): 233–45. https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00038-7.

95. Gülçin Ilhami., 2006. "Antioxidant Activity of Caffeic Acid (3,4-Dihydroxycinnamic Acid)." *Toxicology* 217 (2–3): 213–20. https://doi.org/10.1016/j.tox.2005.09.011.

96. Guo Qingbin., Douglas Goff H., Cui Steve W., 2018. "Structural Characterisation of Galacto-Oligosaccharides Sythesized by Transgalactosylation of Lactose." *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre* 14: 33–38. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2017.07.007.

97. Gupta Sumit., Saurabh Chaturbhuj K., Variyar Prasad S., Sharma Arun., 2015. "Comparative Analysis of Dietary Fiber Activities of Enzymatic and Gamma Depolymerized Guar Gum." *Food Hydrocolloids* 48: 149–54. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.02.013.

98. Hacini Nesrine., 2014. "Etude de l'interaction Génotype X Environnement et Effet de l'origine de Quelques Cultivars de Blé Dur (Triticum Durum Desf.) Sur Les Aptitudes Adaptatives et Qualitatives." *FACULTE DES SCIENCES DEPARTEMENT DE BIOLOGIE*, no. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA: 135.

99. Hafiz Ansar Rasul Suleria., Barrow Colin., 2020. *Bioactive Compounds from Plant Origin*. Edited by Apple Academic Press. *Bioactive Compounds from Plant Origin*. https://doi.org/10.1201/9780429029288.

100. Harmon Brook E., Boushey Carol J., Shvetsov Yurii B., Reynolette Ettienne., Jill Reedy., Wilkens Lynne R., Le Marchand Loic., Henderson Brian E., Kolonel Laurence N., 2015. "Associations of Key Diet-Quality Indexes with Mortality in the Multiethnic Cohort: The Dietary Patterns Methods Project." *American Journal of Clinical Nutrition* 101 (3): 587–97. https://doi.org/10.3945/ajcn.114.090688.

101. Haskå L., Nyman M., Andersson R., 2008. "Distribution and Characterisation of Fructan in Wheat Milling Fractions." *Journal of Cereal Science* 48 (3): 768–74. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.05.002.

102. Hassan Mohamed I., 2016. "Identification and Characterization of QTLs for Grain Protein Content in Durum Wheat." *UNIVERSITY OF BARI " ALDO MORO "*, no. Curriculum : Genetics and Plant Breeding Scientific Sector : AGR. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4300.0721.

103. He Shudong., Li Jing., He Qian., Jian Huifang., Zhang Yi., Wang Jialiang., Sun Hanju., 2018. "Physicochemical and Antioxidant Properties of Hard White Winter Wheat (Triticum Aestivm L.) Bran Superfine Powder Produced by Eccentric Vibratory Milling." *Powder Technology* 325: 126–33. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.10.054.

104. Hemery Youna., Lullien-Pellerin Valérie., Rouau Xavier., Abecassis Joël., Samson Marie Françoise., Åman Per., Reding Walter von., Spoerndli Cäcilia., Barron Cécile., 2009. "Biochemical Markers: Efficient Tools for the Assessment of Wheat Grain Tissue Proportions in Milling Fractions." *Journal of Cereal Science* 49 (1): 55–64. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2008.07.006.

105. Hemery Youna., Rouau Xavier., Lullien-Pellerin Valérie., Barron Cécile., Abecassis Joël., 2007. "Dry Processes to Develop Wheat Fractions and Products with Enhanced Nutritional Quality." *Journal of Cereal Science* 46 (3): 327–47. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2007.09.008.

106. Higuchi Masashi., 2014. "Antioxidant Properties of Wheat Bran against Oxidative Stress." In *Wheat and Rice in Disease Prevention and Health*, 181–99. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401716-0.00015-5.

107. Hossain K., Ulven C., Glover K., Ghavami F., Simsek S., Alamri M. S., Kumar A., Mergoum M., 2013. "Interdependence of Cultivar and Environment on Fiber Composition in Wheat Bran." *Australian Journal of Crop Science* 7 (4): 525–31.

108. Institute of Medicine., 2002. "Dietary Reference Intakes for Energy,Carbohydrates,Fiber,Fat,Fatty Acids,Cholesterol,Protein and Amino Acids." *National Academies Press*, 1–1357.

109. Iqbal Shahid., Bhanger M. I., Farooq Anwar., 2007. "Antioxidant Properties and Components of Bran Extracts from Selected Wheat Varieties Commercially Available in Pakistan." *LWT - Food Science and Technology* 40 (2): 361–67. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.10.001.

110. Jiménez-Escrig A., Sánchez-Muniz F. J., 2000. "Dietary Fibre from Edible Seaweeds: Chemical Structure, Physicochemical Properties and Effects on Cholesterol Metabolism." *Nutrition Research* 20 (4): 585–98. https://doi.org/10.1016/S0271-5317(00)00149-4.

111. Jones Julie Miller., 2014. "CODEX-Aligned Dietary Fiber Definitions Help to Bridge the 'Fiber Gap.'" *Nutrition Journal* 13 (1): 1–10. https://doi.org/10.1186/1475-2891-13-34.

112. Jorgensen James H., Pfaller Michael A., 2015. *The 11th Edition of the Manual of Clinical Microbiology*. *Manual of Clinical Microbiology*. https://doi.org/10.1128/9781555817381.ch1.

113. Jung Go-woon., Kang Hee-moon., Chun Byung-soo., 2012. "Journal of Industrial and Engineering Chemistry Characterization of Wheat Bran Oil Obtained by Supercritical Carbon Dioxide and Hexane Extraction." *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 18 (1): 360–63. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2011.11.094.

114. Kamal-Eldin Afaf., Helle Nygaard Lærke., Knud Erik Bach Knudsen., Anna Maija Lampi., Vieno Piironen., Herman Adlercreutz., Kati Katina., Kaisa Poutanen., Per Åman., 2009. "Physical, Microscopic and Chemical Characterisation of Industrial Rye and Wheat Brans from the Nordic Countries." *Food and Nutrition Research* 53: 1–11. https://doi.org/10.3402/fnr.v52i0.1912.

115. Kasubuchi Mayu., Sae Hasegawa., Takero Hiramatsu., Atsuhiko Ichimura., Ikuo Kimura., 2015. "Dietary Gut Microbial Metabolites, Short-Chain Fatty Acids, and Host Metabolic Regulation." *Nutrients* 7 (4): 2839–49. https://doi.org/10.3390/nu7042839.

116. Kennedy J.F., Knill C.J., 2002. *High-Fiber Ingredients*. *Carbohydrate Polymers*. American A. Vol. 47. https://doi.org/10.1016/s0144-8617(01)00280-6.

117. Kersten R. T., 2016. *Fiber Plant*. *Journal of Optical Communications*. Vol. 7. https://doi.org/10.1515/JOC.1986.7.3.81.

118. Khan Khalil., Shewry Peter R., 2013. *WHEAT CHEMISTRY AND TECHNOLOGY*. *Journal of Chemical Information and Modeling*. Vol. 53. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004.

119. Khennaoui Amina., 2018. "Diversité Phénotypique et Moléculaire Du Blé Dur Cultivé En Algérie : Identification et Caractérisation Des Accessions." Université des Frères Mentouri Constantine.

120. Kian Lau Kia., Jawaid Mohammad., Ariffin Hidayah., Zoheb Karim., 2018. "Isolation and Characterization of Nanocrystalline Cellulose from Roselle-Derived Microcrystalline Cellulose." *International Journal of Biological Macromolecules* 114: 54–63. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.03.065.

121. Kim Hyun Wook., Miller Danika K., Lee Yong Jae., Kim Yuan H.Brad., 2016. "Effects of Soy Hull Pectin and Insoluble Fiber on Physicochemical and Oxidative Characteristics of Fresh and Frozen/Thawed Beef Patties." *Meat Science* 117: 63–67. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2016.02.035.

122. Kim Youngyo., Youjin Je., 2015. "Dietary Fiber Intake and Mortality from Cardiovascular Disease and All Cancers; a Meta-Analysis of Prospective Cohort Studies." *Arch Cardiovasc Dis*.

123. Klemm Dieter., Heublein Brigitte., Fink Hans Peter., Bohn Andreas., 2005. "Cellulose: Fascinating Biopolymer and Sustainable Raw Material." *Angewandte Chemie - International Edition* 44 (22): 3358–93. https://doi.org/10.1002/anie.200460587.

124. Kruk Joanna., Basil Aboul-Enein., Bernstein Joshua., Marchlewicz Mariola., 2017. "Dietary Alkylresorcinols and Cancer Prevention:A Systematic Review."*European Food Research and Technology"* 243 (10): 1693–1710. https://doi.org/10.1007/s00217-017-2890-6.

125. Kuijsten Anneleen., Aune Dagfinn., Schulze Matthias B., Norat Teresa., van Woudenbergh Geertruida J., Beulens Joline W.J., Sluijs Ivonne., 2015. "Dietary Fibre and Incidence of Type 2 Diabetes in Eight European Countries: The EPIC-InterAct Study and a Meta-Analysis of Prospective Studies." *Diabetologia* 58 (7): 1394–1408. https://doi.org/10.1007/s00125-015-3585-9.

126. Kuo Ching Chuan., Chen Huang Hui., Chiang Wenchang., 2012. "Adlay (Yì y; Soft-Shelled Job′s Tears; The Seeds of Coix Lachryma-Jobi L. Var. Ma-Yuen Stapf) Is a Potential Cancer Chemopreventive Agent toward Multistage Carcinogenesis Processes." *Journal of Traditional and Complementary Medicine* 2 (4): 267–75. https://doi.org/10.1016/S2225-4110(16)30112-2.

127. Ladjal L., Azouzi B., 2014. "Etude Du Comportement Varietal De Cinq Varietes De Ble Dur Sous L ' Effet Des Deux Doses De Semis Differentes En Environnement Semi-Aride De Djelfa." *Sciences & Technologie* 2014: 25–31.

128. Laguerre M., Lecomte J., Villeneuve P., 2007. "Evaluation of the Ability of Antioxidants to Counteract Lipid Oxidation: Existing Methods, New Trends and Challenges." *Progress in Lipid Research* 46 (5): 244–82. https://doi.org/10.1016/j.plipres.2007.05.002.

129. Lans Alexa M., Vodovotz Yael., 2018. "Effect of Galacto-Oligosaccharide Purity on Water Sorption and Plasticization Behavior." *Food Chemistry* 268: 9–14. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.008.

130. Li Xiang., Mi Li., Yunqiao Pu., Ragauskas Arthur J., Klett Adam S., Thies Mark., Zheng Yi., 2018. "Inhibitory Effects of Lignin on Enzymatic Hydrolysis: The Role of Lignin Chemistry and Molecular Weight." *Renewable Energy* 123: 664–74. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.079.

131. Liangli Yu., 2007. *Wheat Antioxidants*. *Wheat Antioxidants*. https://doi.org/10.1002/9780470228333.

132. Liyana-Pathirana Chandrika M., Shahidi Fereidoon., 2006. "Importance of Insoluble-Bound Phenolics to Antioxidant Properties of Wheat." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54 (4): 1256–64. https://doi.org/10.1021/jf052556h.

133. Liyana-Pathirana Chandrika M., Shahidi Fereidoon., 2007. "Antioxidant and Free Radical Scavenging Activities of Whole Wheat and Milling Fractions." *Food Chemistry* 101 (3): 1151–57. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.03.016.

134. Luthria Devanand L., Yingjian Lu., M.Maria John K., 2015. "Bioactive Phytochemicals in Wheat: Extraction, Analysis, Processing, and Functional Properties." *Journal of Functional Foods* 18: 910–25. https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.001.

135. Marco Gino J., 1968. "A Rapid Method for Evaluation of Antioxidants." *Journal of the American Oil Chemists' Society* 45 (9): 594–98. https://doi.org/10.1007/BF02668958.

136. Mares D. J., Stone B. A., 1973. "Studies on Wheat Endosperm i. Chemical Composition and Ultrastructure of the Cell Walls." *Australian Journal of Biological Sciences* 26 (4): 793–812. https://doi.org/10.1071/BI9730793.

137. Marine Faure., 2016. "Implications Physiologiques Des Fibres Alimentaires, Interactions Dans La Physiopathologie Du Diabète de Type II et Rôle Du Pharmacien d'officine." UNIVERSITÉ DE LIMOGES.

138. Martin Gary J., 2004. "Ethnobotany: A Methods Manual." *Ethnobotany: A Methods Manual*, 1–268. https://doi.org/10.4324/9781849775854.

139. Martínez-Tomé Magdalena., Murcia M. Antonia., Frega Natale., Ruggieri Silverio., Jiménez Antonia M., Roses Francisco., Parras Pilar., 2004. "Evaluation of Antioxidant Capacity of Cereal Brans." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52 (15): 4690–99. https://doi.org/10.1021/jf049621s.

140. Martini Daniela., Taddei Federica., Ciccoritti Roberto., Pasquini Marina., Nicoletti Isabella., Corradini Danilo., D'Egidio Maria Grazia., 2015. "Variation of Total Antioxidant Activity and of Phenolic Acid, Total Phenolics and Yellow Coloured Pigments in Durum Wheat (Triticum Turgidum L. Var. Durum) as a Function of Genotype, Crop Year and Growing Area." *Journal of Cereal Science* 65: 175–85. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2015.06.012.

141. McCarty Mark F., 2005. "Nutraceutical Resources for Diabetes Prevention - An Update." *Medical Hypotheses* 64 (1): 151–58. https://doi.org/10.1016/j.mehy.2004.03.036.

142. McCleary Barry V., DeVries Jonathan W., Rader Jeanne I., Cohen Gerald., Prosky Leon., Mugford David C., Champ Martine., Okuma Kazuhiro., 2012. "Determination of Insoluble, Soluble, and Total Dietary Fiber (CODEX Definition) by Enzymatic-Gravimetric Method and Liquid Chromatography: Collaborative Study." *Journal of AOAC International* 95 (3): 824–44. https://doi.org/10.5740/jaoacint.CS2011_25.

143. McKevith Brigid., 2004. "Nutritional Aspects of Cereals." *Nutrition Bulletin* 29 (2): 111–42. https://doi.org/10.1111/j.1467-3010.2004.00418.x.

144. McRorie Johnson W., McKeown Nicola M., 2017. "Understanding the Physics of Functional Fibers in the Gastrointestinal Tract: An Evidence-Based Approach to Resolving Enduring Misconceptions about Insoluble and Soluble Fiber." *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics* 117 (2): 251–64. https://doi.org/10.1016/j.jand.2016.09.021.

145. Menadi N., Meziani S., Zairi M., Bouazza S., Demmouche A., Djadel T., Benabdeli K., Belbraouet S., 2021. "Effet Du Son de Blé Dur Dans Le Traitement Du Syndrome de l'intestin Irritable." *Phytothérapie* 19 (5–6): 348–54. https://doi.org/10.3166/phyto-2021-0254.

146. Mongeau R., Brooks S. P.J., 2015. "Dietary Fiber: Determination." *Encyclopedia of Food and Health*, 383–91. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00228-2.

147. Mongeau Roger., Brooks Stephen., 2001. *Chemistry and Analysis of Lignin*. *Handbook of Dietary Fiber*. https://doi.org/10.1201/9780203904220.ch20.

148. Moore Jeffrey., Liu Jian Guo., Zhou Kequan., Liangli Yu., 2006. "Effects of Genotype and Environment on the Antioxidant Properties of Hard Winter Wheat Bran." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54 (15): 5313–22. https://doi.org/10.1021/jf060381l.

149. Mora Yesica N., Contreras Juan C., Aguilar Cristóbal N., Meléndez Paola., De la Garza Ileana., Rodríguez Raúl., 2013. "Chemical Composition and Functional Properties from Different Sources of Dietary Fiber." *American Journal of Food and Nutrition* 1 (3): 27–33. http://pubs.sciepub.com/ajfn/1/3/2/index.html.

150. Morris E. R., Norton I. T., 1983. "Polysaccharide Aggregation in Solutions and Gels." *Aggregation Processes in Solution*, 548–93.

151. Morris Edwin R., 1990. "Shear-Thinning of 'random Coil' Polysaccharides: Characterisation by Two Parameters from a Simple Linear Plot." *Carbohydrate Polymers* 13 (1): 85–96. https://doi.org/10.1016/0144-8617(90)90053-U.

152. Mosoni Pascale., 2014. "Dégradation Des Fibre Alimentaires Par Le Microbiote Colique de l'homme." *Innovations Agronomiques (2014)* 36: 83–96.

153. Mudgil Deepak., Barak Sheweta., 2013. "Composition, Properties and Health Benefits of Indigestible Carbohydrate Polymers as Dietary Fiber: A Review." *International Journal of Biological Macromolecules* 61: 1–6. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2013.06.044.

154. Murphy Neil., Norat Teresa., Ferrari Pietro., Jenab Mazda., Bueno-de-Mesquita Bas., Skeie Guri., Dahm Christina C., 2012. "Dietary Fibre Intake and Risks of Cancers of the Colon and Rectum in the European Prospective Investigation into Cancer and Nutrition (EPIC)." *PLoS ONE* 7 (6). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0039361.

155. Centre National des semences,. 2015. "Bulletin Des Variétés de Céréales Autogames."

156. Nedjah Imene., 2015. "Changements Physiologiques Chez Des Plantes (Blé Dur Triticum Durum Desf .) Exposées à Une Pollution Par Un Métal Lourd (Plomb)." *Spécialité: BIOLOGIE VEGETALE ET ENVIRONNEMENT Option : Ecophysiologie Végétale* UNIVERSITE (BADJI MOKHTAR-ANNABA).

157. Nelson A. L., 2001. *Higher Fiber Ingredients*. Edited by St. Paul: American Association of Cereal Chemists.

158. Ng Jowee., Brownlee Iain A., 2017. "The Effect of High β-Glucan Flour Incorporation into Instant Rice Porridge on Satiety and Energy Intake." *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre* 11: 60–66. https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2017.07.011.

159. Ngouémazong Doungla E., Tengweh Forkwa F., Duvetter Thomas., Fraeye Ilse., Van Loey Ann., Moldenaers Paula., Hendrickx Marc., 2011. "Quantifying Structural Characteristics of Partially De-Esterified Pectins." *Food Hydrocolloids* 25 (3): 434–43. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2010.07.015.

160. Ning L., Villota R., Artz W. R., 1991. "Modification of Corn Fiber through Chemical Treatments in Combination with Twin-Screw Extrusion." *Cereal Chemistry*.

161. Nyström Laura., Mäkinen Marjukka., Lampi Anna Maija., Piironen Vieno., 2005. "Antioxidant Activity of Steryl Ferulate Extracts from Rye and Wheat Bran." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (7): 2503–10. https://doi.org/10.1021/jf048051t.

162. Okarter Neal., Liu Chang Shu., Sorrells Mark E., Liu Rui Hai., 2010. "Phytochemical Content and Antioxidant Activity of Six Diverse Varieties of Whole Wheat." *Food Chemistry* 119 (1): 249–57. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.06.021.

163. Olson A., Gray G M., Chiu M., 1987. "Chemistry and Analysis of Soluble Dietary Fiber." *Food Technology (USA)* 41: 71–80.

164. Onipe Oluwatoyin O., Jideani Afam I.O., Beswa Daniso., 2015. "Composition and Functionality of Wheat Bran and Its Application in Some Cereal Food Products." *International Journal of Food Science and Technology* 50 (12): 2509–18. https://doi.org/10.1111/ijfs.12935.

165. Onyeneho Sylvester N., Hettiarachchy Navam S., 1992. "Antioxidant Activity of Durum Wheat Bran." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 40 (9): 1496–1500. https://doi.org/10.1021/jf00021a005.

166. Ouyed G. Lounaouci., Berchiche M., GIDENNE T., 2011. "Mortalité , La Digestibilité , La Croissance Et La Composition Corporelle De Lapins De Population Blanche Dans Les Conditions De Production Algériennes," 22–23.

167. Papathanasopoulos Athanasios., Camilleri Michael., 2010. "Dietary Fiber Supplements: Effects in Obesity and Metabolic Syndrome and Relationship to Gastrointestinal Functions." *Gastroenterology* 138 (1). https://doi.org/10.1053/j.gastro.2009.11.045.

168. Parikka Kirsti., Rowland Ian R., Welch Robert W., Wähälä Kristiina., 2006. "In Vitro Antioxidant Activity and Antigenotoxicity of 5-n-Alkylresorcinols." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 54 (5): 1646–50. https://doi.org/10.1021/jf052486e.

169. Parisi G. C., Zilli M., Miani M. P., Carrara M., Bottona E., Verdianelli G., Battaglia G., 2002. "High-Fiber Diet Supplementation in Patients with Irritable Bowel Syndrome (IBS): A Multicenter, Randomized, Open Trial Comparison between Wheat Bran Diet and Partially Hydrolyzed Guar Gum (PHGG)." *Digestive Diseases and Sciences* 47 (8): 1697–1704. https://doi.org/10.1023/A:1016419906546.

170. Park Eun Young., Sung Bum Jang., Seung Taik Lim., 2016. "Effect of Fructo-Oligosaccharide and Isomalto-Oligosaccharide Addition on Baking Quality of Frozen Dough." *Food Chemistry* 213: 157–62. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.067.

171. Pietinen Pirjo., Rimm Eric B., Korhonen Pasi., Hartman Anne M., Willett Walter C., Albanes Demetrius., Virtamo Jarmo., 1996. "Intake of Dietary Fiber and Risk of Coronary Heart Disease in a Cohort of Finnish Men: The Alpha-Tocopherol, Beta-Carotene Cancer Prevention Study." *Circulation* 94 (11): 2720–27. https://doi.org/10.1161/01.CIR.94.11.2720.

172. Povilaitis Darius., Šulniute Vaida., Venskutonis Petras Rimantas., Kraujaliene Vaida., 2015. "Antioxidant Properties of Wheat and Rye Bran Extracts Obtained by Pressurized Liquid Extraction with Different Solvents." *Journal of Cereal Science* 62: 117–23. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.11.004.

173. Price Martin L., Van Scoyoc Steve., Butler Larry G., 1978. "A Critical Evaluation of the Vanillin Reaction as an Assay for Tannin in Sorghum Grain." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 26 (5): 1214–18. https://doi.org/10.1021/jf60219a031.

174. Price Ruth K., Welch Robert W., Lee-Manion Alison M., Bradbury Ian., Strain J. J., 2008. "Total Phenolics and Antioxidant Potential in Plasma and Urine of Humans after Consumption of Wheat Bran." *Cereal Chemistry* 85 (2): 152–57. https://doi.org/10.1094/CCHEM-85-2-0152.

175. Prior Ronald L., Wu Xianli., Schaich Karen., 2005. "Standardized Methods for the Determination of Antioxidant Capacity and Phenolics in Foods and Dietary Supplements." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (10): 4290–4302. https://doi.org/10.1021/jf0502698.

176. Prückler Michael., Siebenhandl-Ehn Susanne., Apprich Silvia., Höltinger Stefan., Haas Cornelia., Schmid Erwin., Kneifel Wolfgang., 2014. "Wheat Bran-Based Biorefinery 1: Composition of Wheat Bran and Strategies of Functionalization." *LWT - Food Science and Technology* 56 (2): 211–21. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2013.12.004.

177. Rebolleda Sara., Beltrán Sagrario., Sanz M. Teresa., González-Sanjosé María Luisa., Solaesa Ángela García., 2013. "Extraction of Alkylresorcinols from Wheat Bran with Supercritical CO 2." *Journal of Food Engineering* 119 (4): 814–21. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.008.

178. Rebolleda Sara., Beltrán Sagrario., Sanz María Teresa., González-Sanjosé María Luisa., 2014. "Supercritical Fluid Extraction of Wheat Bran Oil: Study of Extraction Yield and Oil Quality." *European Journal of Lipid Science and Technology* 116 (3): 319–27. https://doi.org/10.1002/ejlt.201300323.

179. Rebolleda Sara., González-SanJosé María Luisa., Sanz María Teresa., Beltrán Sagrario., Solaesa Ángela G., 2020. "Bioactive Compounds of a Wheat Bran Oily Extract Obtained with Supercritical Carbon Dioxide." *Foods* 9 (5). https://doi.org/10.3390/foods9050625.

180. Reddy N. Rukma., Sathe Shridhar K., 2001. *Food Phytates*. *Food Phytates*. https://doi.org/10.1201/9781420014419.

181. Rey D. K., Labuza T. P., 1981. "Characterization of the Effect of Solutes on the Water-Binding and Gel Strength Properties of Carrageenan." *Journal of Food Science* 46 (3): 786–89. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1981.tb15348.x.

182. Roberfroid M., 1993. "Dietary Fiber, Inulin, and Oligofructose: A Review Comparing Their Physiological Effects." *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 33 (2): 103–48. https://doi.org/10.1080/10408399309527616.

183. Robertson J. A., Eastwood M. A., 1981. "An Examination of Factors Which May Affect the Water Holding Capacity of Dietary Fibre." *British Journal of Nutrition* 45 (1): 83–88. https://doi.org/10.1079/bjn19810079.

184. Rodney A., Samaan M., 2017. *Dietary Fiber in the Prevention of Cardiovascular Disease*. Edited by ELSEVIER. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. Academic P. Los Angeles, CA, United States.

185. Rosa Natalia N., Barron Cécile., Gaiani Claire., Dufour Claire., Micard Valérie., 2013. "Ultra-Fine Grinding Increases the Antioxidant Capacity of Wheat Bran." *Journal of Cereal Science* 57 (1): 84–90. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.10.002.

186. Roudier A., Charlet K., Moreno F., Toussaint E., Géneau-Sbartaï C., Commereuc S., Verney V., Béakou A., 2012. "Characterization of Biochemical and Hygroscopic Properties of Flax Fibres." *Materiaux et Techniques* 100 (5): 525–35.

187. Saldivar S. O. Serna., 2015. "Cereals: Dietary Importance." In *Encyclopedia of Food and Health*, 1st ed., 703–11. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00130-6.

188. Salminen S., Bouley C., Boutron M. C., Cummings J. H., Franck A., Gibson G. R., Isolauri E., Moreau M. C., Roberfroid M., Rowland I., 1998. "Functional Food Science and Gastrointestinal Physiology and Function." *British Journal of Nutrition* 80 (S1): S147–71. https://doi.org/10.1079/bjn19980108.

189. Sang Shengmin., Zhu Yingdong., 2014. *Bioactive Phytochemicals in Wheat Bran for Colon Cancer Prevention*. *Wheat and Rice in Disease Prevention and Health*. Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-401716-0.00010-6.

190. Santala Outi., 2014. *Impact of Water Content on Enzymatic Modification of Wheat Bran*.

191. Santala Outi., Kiran Anish., Sozer Nesli., Poutanen Kaisa., Nordlund Emilia., 2014. "Enzymatic Modification and Particle Size Reduction of Wheat Bran Improves the Mechanical Properties and Structure of Bran-Enriched Expanded Extrudates." *Journal of Cereal Science* 60 (2): 448–56. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.04.003.

192. Sapirstein H. D., 2015. *Bioactive Compounds in Wheat Bran*. *Encyclopedia of Food Grains: Second Edition*. 2nd ed. Vol. 2–4. Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394437-5.00109-1.

193. Saulnier Luc., 2012. "Les Grains de Céréales: Diversité et Compositions Nutritionnelles." *Cahiers de Nutrition et de Dietetique* 47 (1 SUPPL. 1): S4–15. https://doi.org/10.1016/S0007-9960(12)70292-4.

194. Saunders R. M., 1980. *Wheat Bran As a Dietary Fiber*. *Cereals for Food and Beverages*. ACADEMIC PRESS, INC. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-370960-8.50013-8.

195. Schlienger J. L., 2008. "Fibres Alimentaires." *Manuel De Nutrition Pour Le Patient Diabétique, Elsevier*, 1–3. https://doi.org/10.1016/B978-2-294-75606-1.00009-9.

196. Schneeman B. O., 1986. "Dietary Fiber - Physical and Chemical-Properties, Methods of Analysis, and Physiological-Effects." *Food Technology* 40 (2): 104–10.

197. Science Cereal Food Processing Health Promotion, A C S Symposium Series, and American Chemical Society. 2011. *Advances in Cereal Science : Implications to Food Processing*. American C.

198. Sengupta Shomik., Muir Jane G., Gibson Peter R., 2006. "Does Butyrate Protect from Colorectal Cancer?" *Journal of Gastroenterology and Hepatology (Australia)* 21 (1 PART2): 209–18. https://doi.org/10.1111/j.1440-1746.2006.04213.x.

199. Serna-Saldivar Sergio O., 2010. *Cereal Grains: Properties, Processing, and Nutritional Attributes*. Edited by Taylor & Francis Group. *FOOD PRESERVATION TECHNOLOGY SERIES*.

200. Shewry Peter R., Piironen Vieno., Lampi Anna Maija., Edelmann Minnamari., Kariluoto Susanna., Nurmi Tanja., Fernandez-Orozco Rebeca., 2010. "The HEALTHGRAIN Wheat Diversity Screen: Effects of Genotype and Environment on Phytochemicals and Dietary Fiber Components." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 58 (17): 9291–98. https://doi.org/10.1021/jf100039b.

201. Shiferaw Bekele., Smale Melinda., Braun Hans Joachim., Duveiller Etienne., Reynolds Mathew., Muricho Geoffrey., 2013. "Crops That Feed the World 10. Past Successes and Future Challenges to the Role Played by Wheat in Global Food Security." *Food Security* 5 (3): 291–317. https://doi.org/10.1007/s12571-013-0263-y.

202. Silventoinen Pia., 2021. "Dry Fractionation and Functionalisation of Cereal Side Streams for Their Improved Food Applicability." *Doctoral Programme in Food Chain and Health*, no. University of Helsinki, Finland.

203. Singh Barinderjit., Sharma Harish K., Sarkar Bhavesh C., 2012. "Optimization of Extraction of Antioxidants from Wheat Bran (Triticum Spp.) Using Response Surface Methodology." *Journal of Food Science and Technology* 49 (3): 294–308. https://doi.org/10.1007/s13197-011-0276-5.

204. Singh Narpinder., 2011. *Wheat Chemistry and Technology*. *International Journal of Food Science & Technology*. Second Edi. Vol. 46. AACC International. https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2010.02539.x.

205. Singleton V. L., Rossi J. A., 1965. "Colorimetry of Total Phenolics With Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents." *American Journal of Enology and Viticulture* 16 (3): 144–58.

206. Sjostrom E., 1993. *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*. Academic P.

207. Slavin Joanne., 2013. "Fiber and Prebiotics: Mechanisms and Health Benefits." *Nutrients* 5 (4): 1417–35. https://doi.org/10.3390/nu5041417.

208. Slavin Joanne L., 2005. "Dietary Fiber and Body Weight." *Nutrition* 21 (3): 411–18. https://doi.org/10.1016/j.nut.2004.08.018.

209. Soest Van P. J., 1963. "Use of Detergents in the Analysis of Fibrous Feeds. II. A Rapid Method for the Determination of Fiber and Lignin." *Journal of AOAC INTERNATIONAL* 46 (5): 829–35. https://doi.org/10.1093/jaoac/46.5.829.

210. Saidani Souad., Zairi Mohamed., Meziani Samira., Labga Lahouaria., Tiboura Ghania., Menadi Noreddine., Demmouche Abassia., 2022. "Bioactive compounds and antioxidant activity of peripheral layers of soft wheat grown in algeria during seed filling." *Journal of Faculty of Food Engineering, Ştefan Cel Mare University of Suceava, Romania* 21 (1): 82–93. https://doi.org/10.4316/fens.2022.009.

211. Stephen Alison M., Martine Champ M. J., Cloran Susan J., Fleith Mathilde., Van Lieshout Lilou., Mejborn Heddie., Burley Victoria J., 2017. "Dietary Fibre in Europe: Current State of Knowledge on Definitions, Sources, Recommendations, Intakes and Relationships to Health." *Nutrition Research Reviews* 30 (2): 149–90. https://doi.org/10.1017/S095442241700004X.

212. Stevenson Leo., Phillips Frankie., O'sullivan Kathryn., Walton Jenny., 2012. "Wheat Bran: Its Composition and Benefits to Health, a European Perspective." *International Journal of Food Sciences and Nutrition* 63 (8): 1001–13. https://doi.org/10.3109/09637486.2012.687366.

213. Sun Ting., Ho Chi Tang., 2005. "Antioxidant Activities of Buckwheat Extracts." *Food Chemistry* 90 (4): 743–49. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.04.035.

214. Sun Xiaochun., Marza Felix., Ma Hongxiang., Carver Brett F., Bai Guihua., 2010. "Mapping Quantitative Trait Loci for Quality Factors in an Inter-Class Cross of US and Chinese Wheat." *Theoretical and Applied Genetics* 120 (5): 1041–51. https://doi.org/10.1007/s00122-009-1232-x.

215. Surget Anne., Barron Cécile., 2005. "Histologie Du Grain de Blé." *Industries Des Céréales* 145: 3–7.

216. Szarc Vel Szic Katarzyna., Ken Declerck., Melita Vidaković., Wim Vanden Berghe., 2015. "From Inflammaging to Healthy Aging by Dietary Lifestyle Choices: Is Epigenetics the Key to Personalized Nutrition?" *Clinical Epigenetics* 7 (1). https://doi.org/10.1186/s13148-015-0068-2.

217. Tarfaoui Louiza., Menadi Noreddine., Meziani Samira., Zairi Mohamed., Bekhaled Iméne., Benalia Abdelkrim., Boukhatmi Fafa., Sennous Kouider., Demmouche Abassia., 2020. "Effect of Durum Wheat Bran on Glucose and Lipid Metabolism in Diabetic Rats." *Journal of Drug Delivery and Therapeutics* 10 (2-s): 30–34. https://doi.org/10.22270/jddt.v10i2-s.4000.

218. Thangaraj Parimelazhagan., 2015. "Pharmacological Assays of Plant-Based Natural Products." *Springer* 71: 21–31. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-26811-8.

219. Thompson Sharon V., Hannon Bridget A., An Ruopeng., Holscher Hannah D., 2017. "Effects of Isolated Soluble Fiber Supplementation on Body Weight, Glycemia, and Insulinemia in Adults with Overweight and Obesity: A Systematic Review and Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials." *American Journal of Clinical Nutrition* 106 (6): 1514–28. https://doi.org/10.3945/ajcn.117.163246.

220. Torres Alexia., Juana Frias., Marisela Granito., Marisa Guerra., Concepción Vidal-Valverde., 2007. "Chemical, Biological and Sensory Evaluation of Pasta Products Supplemented with α-Galactoside-Free Lupin Flours." *Journal of the Science of Food and Agriculture* 87 (1): 74–81. https://doi.org/10.1002/jsfa.2673.

221. Truswell A. S., 2002. "Cereal Grains and Coronary Heart Disease." *European Journal of Clinical Nutrition* 56 (1): 1–14. https://doi.org/10.1038/sj.ejcn.1601283.

222. Tsubaki Shuntaro., Azum Jun-Ichi., 2011. "Application of Microwave Technology for Utilization of Recalcitrant Biomass." *Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials*. https://doi.org/10.5772/14040.

223. Tsuzuki Wakako., Mogushi Hiroyuki., Kawahara Shuji., Kotake-Nara Eiichi., Komba Shiro., Kanai Yoshikazu., Yamada Sumiyo., Horigane Akira., 2017. "The Content and Distribution of Steryl Ferulates in Wheat Produced in Japan." *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry* 81 (3): 573–80. https://doi.org/10.1080/09168451.2016.1259549.

224. Tungland Bryan C., Meyer Diederick., 2002. "Nondigestible Oligo-and Polysaccharides (Dietary Fiber): Their Physiology and Role in Human Health and Food." *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* 1 (3): 90–109. https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2002.tb00009.x.

225. Tuomilehto Jaakko., Lindström Jaana., Eriksson Johan G., Valle Timo T., Hämäläinen Helena., Ilanne-Parikka Pirjo., Keinänen-Kiukaanniemi Sirkka., 2001. "Prevention of Type 2 Diabetes Mellitus by Changes in Lifestyle among Subjects with Impaired Glucose Tolerance." *New England Journal of Medicine* 344 (18): 1343–50. https://doi.org/10.1056/nejm200105033441801.

226. Vaher Merike., Kersti Matso., Tuuli Levandi., Helmja Kati., Kaljurand Mihkel., 2010. "Phenolic Compounds and the Antioxidant Activity of the Bran, Flour and Whole Grain of Different Wheat Varieties." *Procedia Chemistry* 2 (1): 76–82. https://doi.org/10.1016/j.proche.2009.12.013.

227. Velioglu Y. S., Mazza G., Gao L., Oomah B. D., 1998. "Antioxidant Activity and Total Phenolics in Selected Fruits, Vegetables, and Grain Products." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46 (10): 4113–17. https://doi.org/10.1021/jf9801973.

228. Verkempinck S. H. E., Salvia-Trujillo L., Denis S., Van Loey A. M., Hendrickx M. E., Grauwet T., 2018. "Pectin Influences the Kinetics of in Vitro Lipid Digestion in Oil-in-Water Emulsions." *Food Chemistry* 262: 150–61. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.04.082.

229. Vermeulen Karen., 2017. "Wheat Bran with Reduced Particle Size as Carrier for Microbial Networks That Affect Salmonella Colonization." GHENT UNIVERSITY.

230. Vitaglione Paola., Napolitano Aurora., Fogliano Vincenzo., 2008. "Cereal Dietary Fibre: A Natural Functional Ingredient to Deliver Phenolic Compounds into the Gut." *Trends in Food Science and Technology* 19 (9): 451–63. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.02.005.

231. Wang Jing., Sun Baoguo., 2019. *Bioactive Factors and Processing Technology for Cereal Foods*. *Bioactive Factors and Processing Technology for Cereal Foods*. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6167-8.

232. Wang Jing., Sun Baoguo., Yanping Cao., Yuan Tian., 2009. "Protection of Wheat Bran Feruloyl Oligosaccharides against Free Radical-Induced Oxidative Damage in Normal Human Erythrocytes." *Food and Chemical Toxicology* 47 (7): 1591–99. https://doi.org/10.1016/j.fct.2009.04.006.

233. Wang Tao., He Fuli., Chen Guibing., 2014. "Improving Bioaccessibility and Bioavailability of Phenolic Compounds in Cereal Grains through Processing Technologies: A Concise Review." *Journal of Functional Foods* 7 (1): 101–11. https://doi.org/10.1016/j.jff.2014.01.033.

234. Wang Tao., Raddatz Julia., Chen Guibing., 2013. "Effects of Microfluidization on Antioxidant Properties of Wheat Bran." *Journal of Cereal Science* 58 (3): 380–86. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2013.07.010.

235. Wang Zhong Q., Zuberi Aamir R., Zhang Xian H., Jacalyn Macgowan., Jianhua Qin., Xin Ye., Leslie Son., Qinglin Wu., Kun Lian., Cefalu William T., 2007. "Effects of Dietary Fibers on Weight Gain, Carbohydrate Metabolism, and Gastric Ghrelin Gene Expression in Mice Fed a High-Fat Diet." *Metabolism: Clinical and Experimental* 56 (12): 1635–42. https://doi.org/10.1016/j.metabol.2007.07.004.

236. Waterhouse A. L., Chatterton N. J., 1993. "Glossary of Fructans Terms, in Science and Technology of Fructans." *Agricultural and Food Chemistry*, 2–7. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.1993.tb03848.x/abstract.

237. Watson Ronald Ross., Preedy Victor R., Zibadi Sherma., 2014. *Wheat and Rice in Disease Prevention and Health: Benefits, Risks and Mechanisms of Whole Grains in Health Promotion*. https://books.google.com/books?id=MzJXAgAAQBAJ&pgis=1.

238. Wolever Thomas M.S., Tosh Susan M., Gibbs Alison L., Jennie Brand-Miller., Duncan Alison M., Valerie Hart., Benoît Lamarche., Thomson Barbara A., Ruedi Duss., Wood Peter J., 2010. "Physicochemical Properties of Oat β-Glucan Influence Its Ability to Reduce Serum LDL Cholesterol in Humans: A Randomized Clinical Trial." *American Journal of Clinical Nutrition* 92 (4): 723–32. https://doi.org/10.3945/ajcn.2010.29174.

239. World Health Organisation. 2003. "FAO/WHO Expert Consultation. Diet, Nutrition and the Prevention of Chronic Diseases: Report of a Joint WHO/FAO Expert Consultation, Geneva, 28 January," no. 2: 61–71.

240. Wu Yihua., Qian Yufeng., Pan Yiwen., Li Peiwei., Yang Jun., Ye Xianhua., Xu Geng., 2015. "Association between Dietary Fiber Intake and Risk of Coronary Heart Disease: A Meta-Analysis." *Clinical Nutrition* 34 (4): 603–11. https://doi.org/10.1016/j.clnu.2014.05.009.

241. Xu Youjie., Sun Xiuzhi S., Wang Donghai., 2019. "Wheat." In *Integrated Processing Technologies for Food and Agricultural By-Products*, 3–20. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814138-0.00001-0.

242. Yang Meng., Kenfield Stacey A., Van Blarigan Erin L., Batista Julie L., Sesso Howard D., Jing Ma., Stampfer Meir J., Chavarro Jorge E., 2015. "Dietary Patterns after Prostate Cancer Diagnosis in Relation to Disease-Specific and Total Mortality." *Cancer Prevention Research* 8 (6): 545–51. https://doi.org/10.1158/1940-6207.CAPR-14-0442.

243. Yang Shu hua., Jinchyau Peng., Wai Bun Lui., Jenshinn Lin., 2008. "Effects of Adlay Species and Rice Flour Ratio on the Physicochemical Properties and Texture Characteristic of Adlay-Based Extrudates." *Journal of Food Engineering* 84 (3): 489–94. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.06.010.

244. Yao Baodong., Fang Hong., Xu Wanghong., Yan Yujie., Xu Huilin., Liu Yinan., Mo Miao., Zhang Hua., Zhao Yanping., 2014. "Dietary Fiber Intake and Risk of Type 2 Diabetes: A Dose-Response Analysis of Prospective Studies." *European Journal of Epidemiology* 29 (2): 79–88. https://doi.org/10.1007/s10654-013-9876-x.

245. Ye Guodong., Wu Yuanning., Wang Liping., Tan Bin., Shen Wangyang., Li Xiaoning., Liu Yanxiang., Tian Xiaohong., Zhang Duqin., 2021. "Comparison of Six Modification Methods on the Chemical Composition, Functional Properties and Antioxidant Capacity of Wheat Bran." *Lwt* 149 (February): 111996. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111996.

246. Zhang Zhizhong., Xu Gelin., Minmin Ma., Jie Yang., Xinfeng Liu., 2013. "Dietary Fiber Intake Reduces Risk for Gastric Cancer: A Meta-Analysis." *Gastroenterology* 145 (1). https://doi.org/10.1053/j.gastro.2013.04.001.

247. Zhang Zhizhong., Xu Gelin., Yongyue Wei., Wusheng Zhu., Xinfeng Liu., 2013. "Dietary Fiber Consumption and Risk of Stroke." *European Journal of Epidemiology* 28: 119–30. https://doi.org/10.1007/s10654-015-9999-3.

248. Zhao Chao., Wu Yijing., Liu Xiaoyan., Liu Bin., Cao Hui., Yu Hua., Sarker Satyajit D., Lutfun Nahar., Xiao Jianbo., 2017. "Functional Properties, Structural Studies and Chemo-Enzymatic Synthesis of Oligosaccharides." *Trends in Food Science and Technology* 66: 135–45. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.06.008.

249. Zhao Xue., Andersson., Andersson Roger., 2018. "Resistant Starch and Other Dietary Fiber Components in Tubers from a High-Amylose Potato." *Food Chemistry* 251: 58–63. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.028.

250. Zhao Yantao., Shi Lei., Hu Changling., Sang Shengmin., 2019. "Wheat Bran for Colon Cancer Prevention: The Synergy between Phytochemical Alkylresorcinol C21 and Intestinal Microbial Metabolite Butyrate." *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 67 (46): 12761–69. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b05666.

251. Zhishen Jia., Tang Mengcheng., Wu Jianming., 1999. "The Determination of Flavonoid Contents in Mulberry and Their Scavenging Effects on Superoxide Radicals." *Food Chemistry* 64 (4): 555–59. https://doi.org/10.1016/S0308-8146(98)00102-2.

252. Zhou Kequan., Yu Liangli., 2004. "Effects of Extraction Solvent on Wheat Bran Antioxidant Activity Estimation." *LWT - Food Science and Technology* 37 (7): 717–21. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2004.02.008.

253. Zhu Ke Xue., Huang Sheng., Peng Wei., Qian Hai Feng., Zhou Hui Ming., 2010. "Effect of Ultrafine Grinding on Hydration and Antioxidant Properties of Wheat Bran Dietary Fiber." *Food Research International* 43 (4): 943–48. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.01.005.

254. Žilić Sladana., Serpen Arda., Akillioğlu Gül., Janković Marijana., Gökmen Vural., 2012. "Distributions of Phenolic Compounds, Yellow Pigments and Oxidative Enzymes in Wheat Grains and Their Relation to Antioxidant Capacity of Bran and Debranned Flour." *Journal of Cereal Science* 56 (3): 652–58. https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.07.014.

255. Žilić Sladana., Taškovic Šukalović Vesna Hadži., Dodig Dejan., Maksimović Vuk., Kandić Vesna., 2013. "Soluble Free Phenolic Compound Contents and Antioxidant Capacity of Bread and Durum Wheat Genotypes." *Genetika* 45 (1): 87–100. https://doi.org/10.2298/GENSR1301087Z.

ANNEXES

Annexe 1

QUESTIONNAIRE DE L'ENQUETE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de l'**E**nseignement **S**upérieur et de La **R**echerche **S**cientifique
Université **D**jillali **L**iabes de **S**idi **B**el **A**bbes

Enquête sur le son de blé dur

Lieu _____ مكان الاستبيان
Date _____ تاريخ الاستبيان
Enquêteur _____ الباحث

Informations personnelles

Numéro d'identification _____ **رقم التعريف**
Sexe ☐ Féminin(أنثى) ① ☐ Masculin(ذكر) ② **الجنس**
Âge _____ **السن**
Interrogé **المستجوب**
☐ Ménages (البيت) ① ☐ Herboristes (بائع أعشاب) ③
☐ Scientifique (علمي) ② ☐ Tradithérapeutes (طب تقليدي) ④
Niveau d'instruction _____ **مستوى التعليم**
☐ Analphabète (دون مستوى) ① ☐ Secondaire (ثانوي) ④
☐ Primaire (ابتدائي) ② ☐ universitaire (التدرج) ⑤
☐ Moyen (متوسط) ③ ☐ Poste graduation (بعد التدرج) ⑥

Information sur le son de blé

Utilisez-vous le son de blé dur? ☐Non ⓪ ☐Oui ① **هل تستعمل نخالة القمح الصلب**
☐ Jamais (أبدا) ① ☐ Fréquemment (عادة) ③
☐ Rarement (نادرا) ② ☐ Tous le temps (دائما) ④
Connaissez-vous sol[illegible] ☐Non ⓪ ☐Oui ①
D'où es que l'obtenez-vous ?
☐ Épicerie (محل بهارات) ① ☐ les moulins (الطواحين) ④
☐ Alimentation générale ( ) ② ☐ Votre production ( ) ⑤
☐ Marché (السوق) ③ ☐ Autres _____ (أخرى) ⑥
Comment est-il conservé ? **كيف تحفظها؟**
☐ Avec emballage (مغلفة) ① ☐ Sans emballage (غير مغلفة) ②
Comment le stockez-vous ? **كيف تخزنها؟**
☐ À l'abris de la lumière (في الظل) ① ☐ Congélateur (مجمد) ③
☐ Réfrigérateur (الثلاجة) ②
Dans quel intérêt l'utiliser-vous **ما الغرض من استعمالها؟**
☐ Alimentaire (الطبخ) ① ☐ Thérapeutique (التداوي) ③
☐ autre.....

Utilisation Alimentaire

Quelle quantité prenez-vous ? **ما المقدار الذي تتناوله؟**
☐Pincée _____ (قرصة) ① ☐Petite cuillère (ملعقة صغيرة) ⑤
☐Petit verre _____ (كوب صغير) ② ☐Grande cuillère (ملعقة كبيرة) ⑥
☐Grand verre _____ (كوب كبير) ③ ☐Autres _____ (أخرى) ⑦
☐Poignée _____ (قبضة) ④
À quoi l'joutez-vous ? **إلى ما تضيفه؟**
☐ Lais (حليب) ① ☐ Yahourt (ياغورت) ④
☐ Jus (عصير) ② ☐ Confiture (مربى) ⑤
☐ Miel (عسل) ③ ☐ Autres _____ (أخرى) ⑥
Combien de fois le prenez-vous **كم مرة تتناولها؟**

Utilisation thérapeutique

Quelle quantité prenez-vous **ما المقدار الذي تتناوله؟**
☐Pincée _____ (قرصة) ① ☐Petite cuillère (ملعقة صغيرة) ⑤
☐Petit verre _____ (كوب صغير) ② ☐Grande cuillère (ملعقة كبيرة) ⑥
☐Grand verre _____ (كوب كبير) ③ ☐Autres _____ (أخرى) ⑦
☐Poignée _____ (قبضة) ④
Comment l'utiliser-vous ? **كيف تحضره؟**
☐ Fumigation (التدخين) ① ☐ Décoction (الغلي) ④
☐ Cataplasme (الكمادة) ② ☐ Macération (النقع) ⑤
☐ Infusion (الانحلال) ③ ☐ Autre (أخرى) ⑥
Combien de fois le prenez-vous _____ **كم مرة تتناوله؟**
Pour quelle maladies l'utilisez-vous ? **لأي مرض تستعمله؟**
Maladie thyroïdienne ☐Non ⓪ ☐Oui ① أمراض الغدة الدرقية
Maladie de la drépanocytose ☐Non ⓪ ☐Oui ① فقر الدم المنجلي
Daltonisme ☐Non ⓪ ☐Oui ① عمى الألوان

Tuberculose	☐Non ⓪ ☐Oui ①	السل
Problèmes cardiaques	☐Non ⓪ ☐Oui ①	أمراض القلب
Infertilité	☐Non ⓪ ☐Oui ①	العقر
Diabète	☐Non ⓪ ☐Oui ①	السكري
Hypertension artérielle	☐Non ⓪ ☐Oui ①	ارتفاع ضغط الدم
Changement de poids	☐Non ⓪ ☐Oui ①	تغير مفاجئ في الوزن
Fatigue non usuelle	☐Non ⓪ ☐Oui ①	تعب غير اعتيادي
Fièvre	☐Non ⓪ ☐Oui ①	حمى
Perte d'appétit	☐Non ⓪ ☐Oui ①	فقدان الشهية
Réveil dû à la douleur	☐Non ⓪ ☐Oui ①	نهوض من النوم بسبب ألم
Changements de vue	☐Non ⓪ ☐Oui ①	تغير في النظر
Voix rauque	☐Non ⓪ ☐Oui ①	صوت أجش (بح)
Difficulté d'ingestion	☐Non ⓪ ☐Oui ①	عسر هضم
Difficulté d'audition	☐Non ⓪ ☐Oui ①	صعوبة في السمع
Saignement	☐Non ⓪ ☐Oui ①	دم
Palpitation	☐Non ⓪ ☐Oui ①	خفقان
Douleur de poitrine	☐Non ⓪ ☐Oui ①	ألم في الصدر
Hypertension	☐Non ⓪ ☐Oui ①	ارتفاع الضغط
Manque de souffle	☐Non ⓪ ☐Oui ①	نقص التنفس
Toux	☐Non ⓪ ☐Oui ①	السعال
Cracher le sang	☐Non ⓪ ☐Oui ①	بصق الدم
Sang dans les selles	☐Non ⓪ ☐Oui ①	دم في البراز
Constipation	☐Non ⓪ ☐Oui ①	الإمساك
Douleurs abdominales	☐Non ⓪ ☐Oui ①	آلام البطن
Boursouflage abdominal	☐Non ⓪ ☐Oui ①	انتفاخ في البطن
Diarrhée	☐Non ⓪ ☐Oui ①	اسهال
Nœuds de lymphe gonflés	☐Non ⓪ ☐Oui ①	عقد لمفاوية منتفخة
Morceau ou masse ailleurs	☐Non ⓪ ☐Oui ①	أورام أو كتل أخرى
Blessure Non-curative	☐Non ⓪ ☐Oui ①	جرح لم يشفى
Taupe changeante	☐Non ⓪ ☐Oui ①	تغير إلى لون داكن
Douleur osseuse ou musculaire	☐Non ⓪ ☐Oui ①	آلام في العظام و العضلات
Articulations douloureuses	☐Non ⓪ ☐Oui ①	آلام المفاصل
Chevilles gonflées	☐Non ⓪ ☐Oui ①	كعب منتفخ
Perte de mémoire	☐Non ⓪ ☐Oui ①	فقدان الذاكرة
Faiblesse dans des membres	☐Non ⓪ ☐Oui ①	تعب في لأطراف
Vertige ou dépassement dehors	☐Non ⓪ ☐Oui ①	دوخة
Engourdissement ou tintement	☐Non ⓪ ☐Oui ①	تخدر
Attaques d'inquiétude/panique	☐Non ⓪ ☐Oui ①	أزمات قلق و هلع
Dépression ou modes bleus	☐Non ⓪ ☐Oui ①	اكتئاب
Altéré	☐Non ⓪ ☐Oui ①	ضمور
Ne peut pas tenir la température	☐Non ⓪ ☐Oui ①	عدم ثبات الحرارة
Autre :	☐Non ⓪ ☐Oui ①	أخرى

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....

Annexe 2

EXTRACTION DU MATERIEL VEGETAL

Les extraits des différentes variétés du son de blé dur ont été préparés par la macération de la poudre de ce dernier dans l'éthanol 80% en utilisant un ratio poudre/solvant de 5% pendant 24h avec une agitation vigoureuse. Après filtration Les phases organiques obtenues ont été conservée à 4 °C pour être utilisées dans les différentes analyses décrites par la suite.

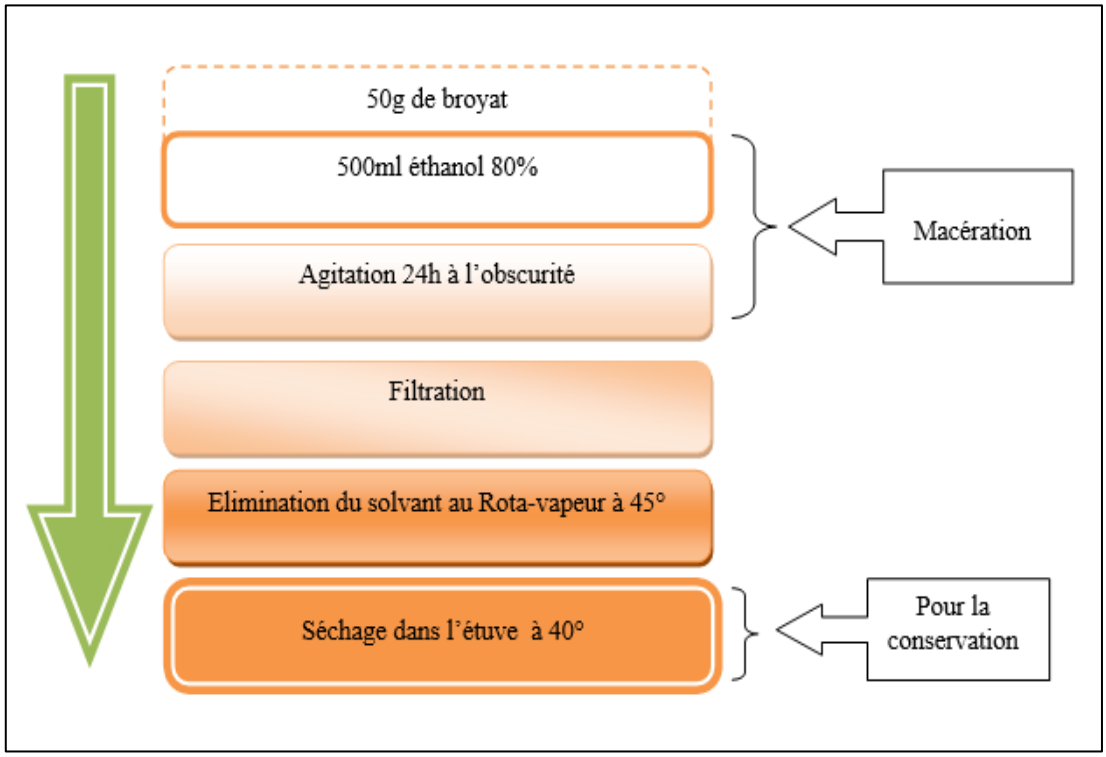


Figure 44: Procédure d'extraction par macération.

Le rendement d'extraction

Après l'étape d'extraction, on calcule le rendement d'extraction, qui s'exprime en pourcentage par rapport au poids du matériel de départ, et est déterminé par l'équation suivante :

$$R = (P_1) \times 100 / P_0$$

R : Rendement (en %).

P_1 : Est la masse de l'extrait après l'évaporation du solvant en g.

P_0 : Est la masse de l'échantillon végétale en g

Annexe 3

DETERMINATION DU TAUX D'HUMIDITE (NA : 1333/1990)

La teneur en eau a été réalisée selon la méthode décrite par la norme algérienne NA 1333/1990.

Principe

On procède à un séchage de l'échantillon à analyser dans une étuve « Chopin » à la température de 103 ±2°C jusqu'à l'obtention d'une masse pratiquement constante. Pour éviter toute prise d'humidité, il convient d'utiliser un dessiccateur.

La teneur en eau est la différence entre le Poids de l'échantillon avant et après la dessiccation lorsque leur poids soit constant.

Expression des résultats

La teneur en eau (%) est donnée par la formule suivante :

$$\mathbf{H\ \% = (m_1 – m_2 / m_1 - m_0) \times 100}$$

- m_0 : masse de la coupelle en g
- m_1 : masse de la coupelle + la prise d'essai en g avant séchage.
- m_2 : masse de la coupelle + la prise d'essai en g après séchage.

Le taux de matière sèche (MS%) est donné par la formule suivante :

$$\mathbf{MS\% = 100 - H\%}$$

Annexe 4

DOSAGE DES FIBRES AVEC UN DETERGENT NEUTRE (NDF)

Prétraitement des échantillons

Pour doser les fibres alimentaires dans les échantillons secs, les composants ont été tamisés sur une grille avec des ouvertures de 1 mm avec un broyage à sec de la partie de l'échantillon qui ne passe pas à travers le tamis. Le séchage des échantillons est obtenu en les chauffant dans un four à 105-110°C pendant quelques heures ou dans des fours à vide à des températures plus basses (par exemple 70°C). La plupart des matériaux perdent de l'eau pendant le broyage. Si les résultats doivent être exprimés en poids frais, le contenu en humidité doit être déterminé sur un échantillon non broyé prélevé avec celui destiné au dosage des fibres (Carpenter., 1993).

Dosage des fibres avec un détergent neutre (NDF selon Van Soest)

La méthode de **Van Soest** est la méthode de référence pour le dosage des fibres avec un détergent neutre (Soest., 1963). La technique repose sur une solubilisation progressive du tissu lignocellulosique. La masse des résidus permet de déterminer les quantités de matières solubilisées. La méthode permet d'estimer les teneurs en composés solubles, hémicelluloses, cellulose, lignines et cendres.

La méthode est basée sur la solubilisation, par une solution neutre d'un agent tensioactif, de : hydrates de carbone y compris les pectines, la plupart des protéines**,** lipides**,** substances minérales solubles y compris une partie de la silice. Le contenu soluble est défini comme étant soluble dans les détergents neutres (NDS). Le résidu est constitué des composés fibreux des cellules végétales, hémicelluloses, cellulose, lignine, cutine, substances minérales insolubles et certaines protéines de la paroi cellulaire.

La Solution de détergent neutre (NDS) a été préparé en versant 6,81 g de Borate de sodium décahydrate (Na2B4O7 • 10 H2O) et 18,61 g de Ethylènediaminetétraacétate disodium (EDTA, C10H14N2Na2O8) dans un bécher et les dissoudre avec de l'eau distillée en chauffant jusqu'à solubilisation complète, ensuite en ajoutons 30 g de Lauryl sulfate de sodium neutre ($C_{12}H_{25}NaO_4S$) et 10 ml 2-éthoxyéthanol (éthylène glycol monoéthyle éther, Cellosolve, $C_4H_{10}O_2$). Après la dissolution à part de 4.56 g phosphate di-sodium anhydre (Na_2HPO_4) dans une partie de l'eau distillée en chauffant jusqu'à solubilisation complète. En Mélangeons les deux solutions et l'eau distillée pour compléter un volume d'1 L. Le pH de la solution (NDS) doit se situer entre 6,9 et 7,1.

Procédure pour le dosage NDF (Neutral Detergent Fiber)

100 ml de solution de détergent neutre (DNS) été ajouté à 1g de chaque échantillon pesé dans les creusets à température ambiante ainsi que 0,5 g de sulfite de sodium et 3-5 gouttes de l'agent anti-mousse n-octanol. Les échantillons ont été Chauffer à ébullition sous reflux pendant 60 minutes à partir du début de l'ébullition, puis ils ont été filtrés et lavés 3 fois avec de l'eau distillée bouillante, puis 2 fois avec de l'acétone froid. Les creusets ont été retirés puis pesés après séchage à 105° pendant 8 heure et laisser refroidir dans un dessiccateur. La teneur représente les fibres insolubles dans le détergent neutre plus la teneur en cendres (F_1). Pour éliminer les cendres, les creusets ont été placés dans un four à moufle à 550° pendant 2 heures et repesés après refroidissement dans un dessiccateur (F_2) et les résultats ont été exprimés en % selon l'équation suivante :

$$\textbf{\% de fibres insolubles NDF} = (F_1 - F_2 / F0) \times 100$$

Où :

F_1 : Poids des fibres insolubles NDF + cendres

F_2 : Poids des cendres

F_0 : Poids initial de l'échantillon

Les cendres insolubles dans le détergent neutre ont été calculer selon l'équation suivante :

$$(F_2 / F_0) \times 100$$

Le dosage a été effectuer à l'aide d'un extracteur de fibre fiwe n°6 **(Figure 45)**.



Figure 45: Appareil réflecteur pour le dosage des fibres alimentaires (ref : fiwe 6).

Méthode de Dosage des fibres avec un détergent neutre (NDF selon van soest)

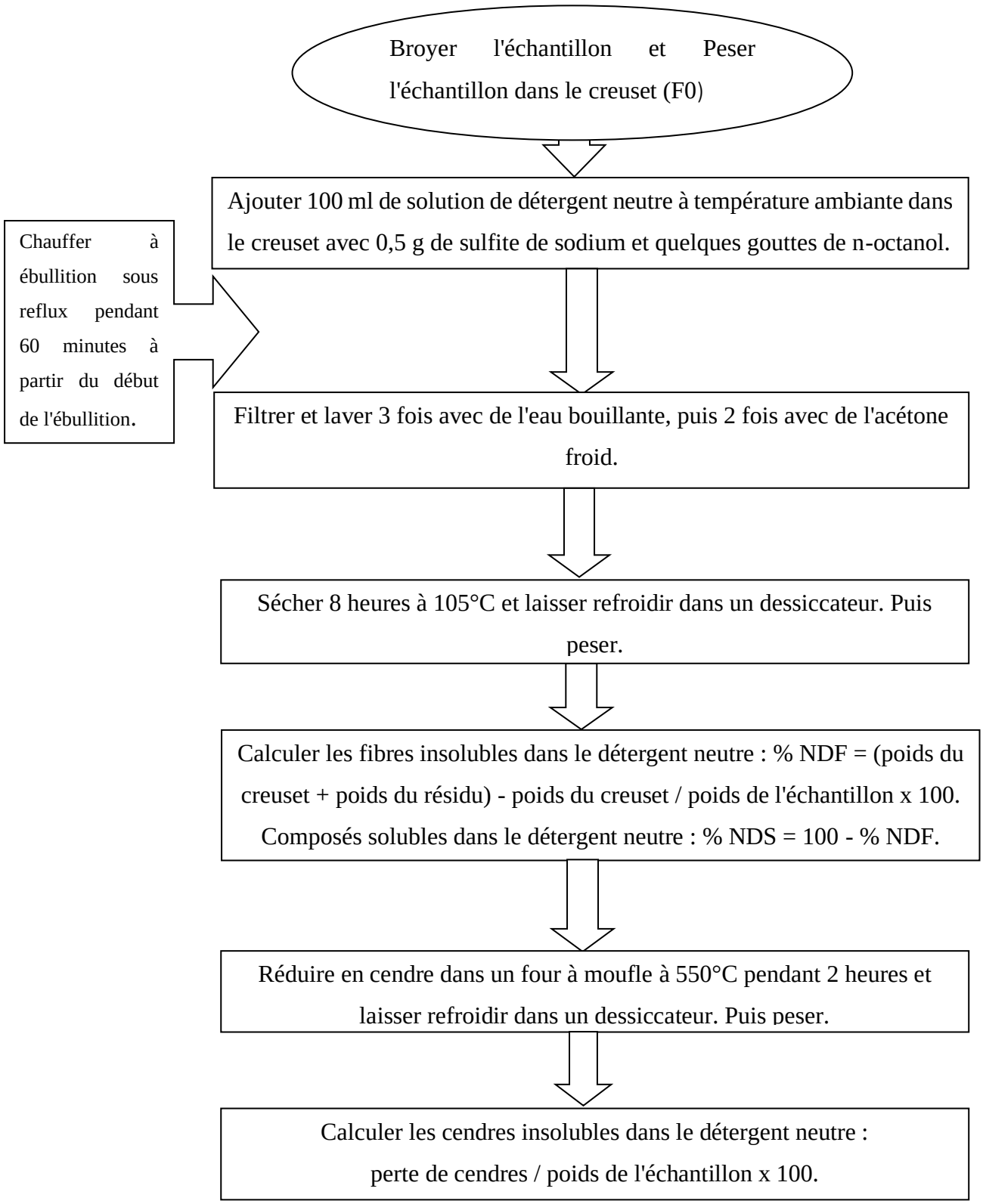




Figure 46: Résidus fibreux dans les creusets après extraction.

Annexe 5

DOSAGE DES FIBRES AVEC UN DETERGENT ACIDE (ADF)

Le composé lignocellulose « **ADF** » est obtenue après traitement de la prise d'essai au détergent acide.

La méthode est basée sur la solubilisation de hydrates de carbone solubles, protéines, lipides, hémicelluloses et substances minérales solubles par une solution acide d'un agent tensioactif. Le résidu fibreux est constitué par la cellulose, la lignine, la cutine et par les substances minérales insolubles dans un environnement acide (silice) et est défini comme étant l'ADF. La différence entre le NDF et l'ADF est constitué essentiellement par l'hémicellulose (Soest 1963).

La Solution de détergent acide (ADF) a été préparé en versant 20 g Bromure de cétyltriméthylammonium de qualité technique ($C_{19}H_{42}BrN$) dans 1L d'acide sulfurique (H_2SO_4) 1 N, tout en remuant pour favoriser la dissolution.

Procédure pour le dosage ADF (Acid Detergent Fiber)

100 ml de solution de détergent acide (ADF) été ajouté à 1g de chaque échantillon pesé dans les creusets à température ambiante ainsi que 0,5 g de sulfite de sodium et 3-5 gouttes de l'agent anti-mousse n-octanol. Les échantillons ont été Chauffer à ébullition sous reflux pendant 60 minutes à partir du début de l'ébullition, puis ils ont été filtrés et lavés 3 fois avec de l'eau distillée bouillante, puis 2 fois avec de l'acétone froid. Les creusets ont été retirés puis pesés après séchage à 105° pendant 8 heure et laisser refroidir dans un dessiccateur. La teneur représente les fibres insolubles dans le détergent acide plus la teneur en cendres (F_1). Pour éliminer les cendres, les creusets ont été placés dans un four à moufle à 550° pendant 2 heures et repesés après refroidissement dans un dessiccateur (F_2) et les résultats ont été exprimés en % selon l'équation suivante :

$$\textbf{\% de fibres insolubles ADF} = (F_1 - F_2 / F_0) \times 100$$

Où :

F_1 : Poids des fibres insolubles ADF + cendres

F_2 : Poids des cendres

F_0 : Poids initial de l'échantillon

Les cendres insolubles dans le détergent acide ont été calculer selon l'équation suivante :

$$(F_2 / F_0) \times 100$$

Annexe 6

DOSAGE DE LA LIGNINE AVEC DETERGENT ACIDE (ADL)

Lignine : « ADL » Van Soest 1963

La lignine « **ADL** » est obtenue à partir du résidu **ADF** par solubilisation de la cellulose en milieu acide concentré.

ADL = ADF - Cellulose

Cellulose = ADF - ADL

Annexe 7

DOSAGE DES HEMICELLULOSES

Hémicelluloses

Il n'existe pas de méthode spécifique permettant de doser l'ensemble des hémicelluloses Les hémicelluloses ont été obtenus par défalcations des valeurs de ligno- cellulose obtenues avec le détergent acide « **ADF** » a partir des fibres totales **NDF**.

Hémicelluloses = NDF - ADF

.

Annexe 8

DOSAGE DES POLYPHENOLS

8.1 Dosage des phénols totaux

Les composés phénoliques ou polyphénols sont des métabolites secondaires caractérisés par la présence d'un cycle aromatique portant des groupements hydroxyles libres ou engagés avec un glucide. Les plus représentés sont les anthocyanes, les flavonoïdes et les tannins. Le dosage des polyphénols totaux par le réactif de Folin-Ciocalteu a été décrit dès 1965 par Singleton et Rossi.

Le réactif est constitué par un mélange d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$) et d'acide phosphomolybdique ($H_3PMo_{12}O_{40}$). Il est réduit, lors de l'oxydation des phénols, en un mélange d'oxydes bleus de tungstène et de molybdène (Singleton et Rossi., 1965). La coloration produite, dont l'absorption maximum est comprise entre 725 et 750 nm est proportionnelle à la quantité de polyphénols présents dans les extraits végétaux (Boizot and Charpentier., 2006).

Mise en œuvre pratique

Un volume de 200 µl de l'extrait brut éthanolique est introduit dans des tubes à essai, le mélange (1ml du réactif de Folin-Ciocalteu dilué 10 fois et 0,8 ml de carbonate de sodium à 7.5%) est additionné. Les tubes sont agités et conservés durant 30 minutes à la température ambiante. L'absorbance est mesurée à 765 nm contre un blanc à l'aide d'un spectrophotomètre Jenway 6504 UV/VIS.

Une courbe d'étalonnage est réalisée en parallèle dans les mêmes conditions opératoires en utilisant l'acide gallique comme contrôle positif.

Les résultats sont exprimés en milligramme (mg) équivalent d'acide gallique par gramme de la matière végétale sèche (mg EAG/g).

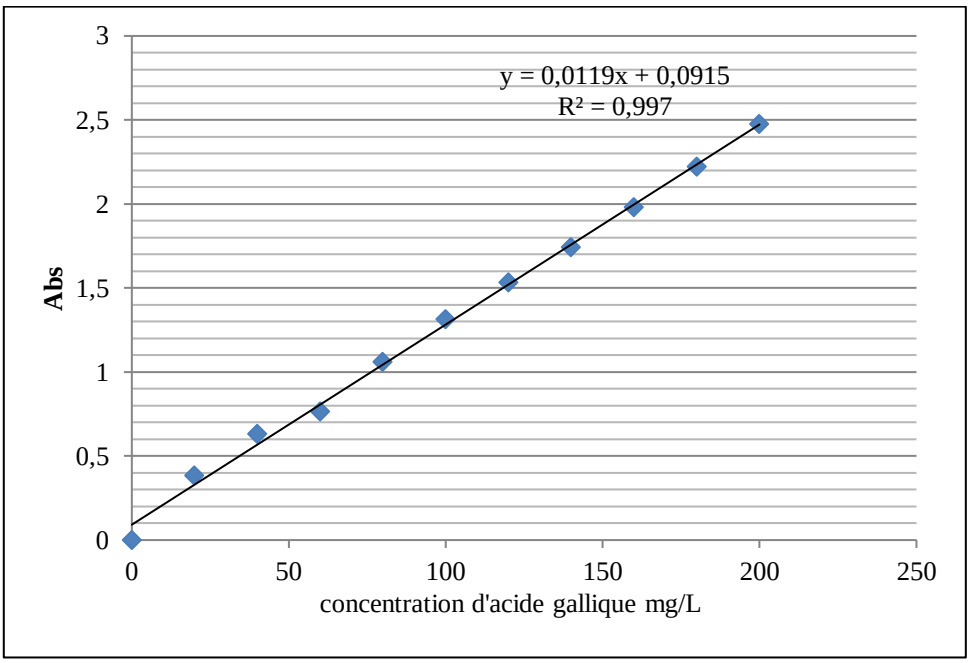


Figure 47: courbe d'étalonnage des phénols totaux.

8.2 Dosage des flavonoïdes

La quantification des flavonoïdes a été effectuée par une méthode adaptée par (Zhishen et al., 1999) avec le trichlorure d'aluminium et la soude. Le trichlorure d'aluminium forme un complexe jaune avec les flavonoïdes et la soude forme un complexe de couleur rose absorbe dans le visible à 510 nm (Thangaraj., 2015).

Mise en œuvre pratique

500 µl de l'extrait brut éthanoliques convenablement dilué sont mélangés avec 1500 µl d'eau distillée, suivis de 150 µl de nitrite de sodium ($NaNO_2$) à 5%. Après 5 min, 150 µl de trichlorure d'aluminium ($AlCl_3$) à 10% (m/v) est rajouté au mélange. Après 6 min d'incubation à la température ambiante, 500 µl d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 4% est additionné. Immédiatement, le mélange est complètement agité afin d'homogénéiser le contenu. L'absorbance de la solution de couleur rosâtre est déterminée à 510 nm contre un blanc. Une courbe d'étalonnage est réalisée en parallèle dans les mêmes conditions opératoires en utilisant de la catéchine comme contrôle positif.

La teneur en flavonoïdes totaux des extraits est exprimée en milligramme (mg) équivalent de la catéchine par gramme de la matière végétale sèche (mg EC/g).

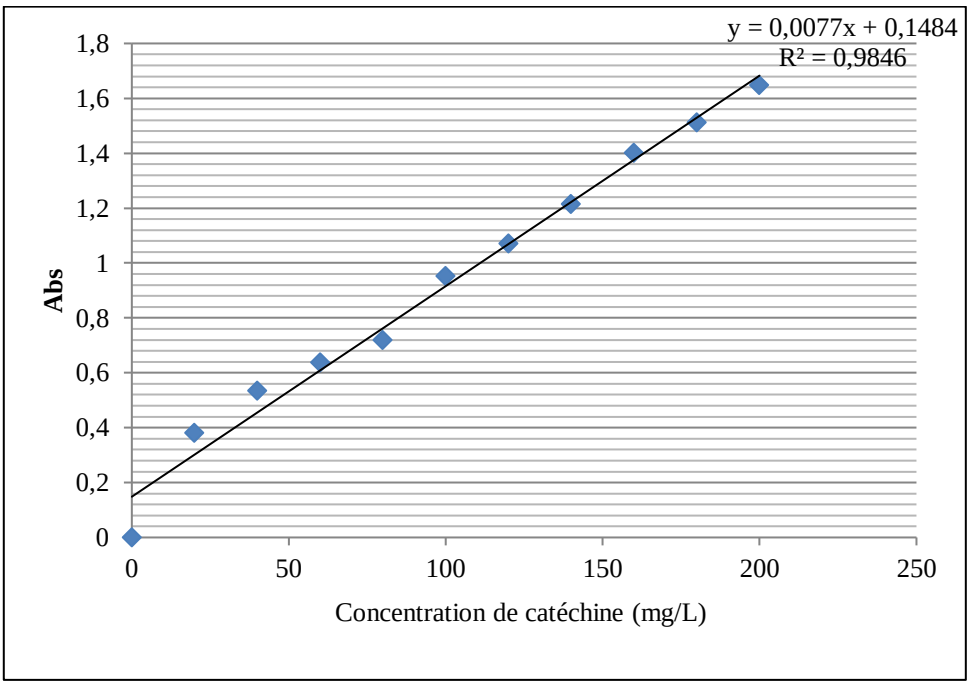


Figure 48: Courbe d'étalonnage des flavonoïdes.

8.3 Dosage des tanins condensée

Les tanins condensés sont déterminés par la méthode à la vanilline en milieu acide. Cette méthode est basée sur la capacité de la vanilline à réagir avec les unités des tanins condensés en présence d'acide pour produire un complexe coloré mesuré à 500 nm. La réactivité de la vanilline avec les tanins n'implique que la première unité du polymère. Les quantités des tannins sont estimées en utilisant la méthode de vanilline décrite par (Price et al., 1978).

Mise en œuvre pratique

Un volume de 50 µl de l'extrait brut est ajouté à 1500 µl de la solution vanilline/méthanol (4%, m/v) puis mélangé à l'aide d'un vortex. Ensuite, 750 µl de l'acide chlorhydrique concentré (HCl) est additionné. Le mélange obtenu est laissé réagir à la température ambiante pendant 20 min. L'absorbance est mesurée à 550 nm contre un blanc à l'aide d'un spectrophotomètre Jenway 6504 UV/VIS.

Une courbe d'étalonnage est réalisée en parallèle dans les mêmes conditions opératoires en utilisant de la catéchine comme contrôle positif.

Les résultats sont exprimés en milligramme (mg) équivalent de la catéchine par gramme de la matière végétale sèche (mg EC/g).

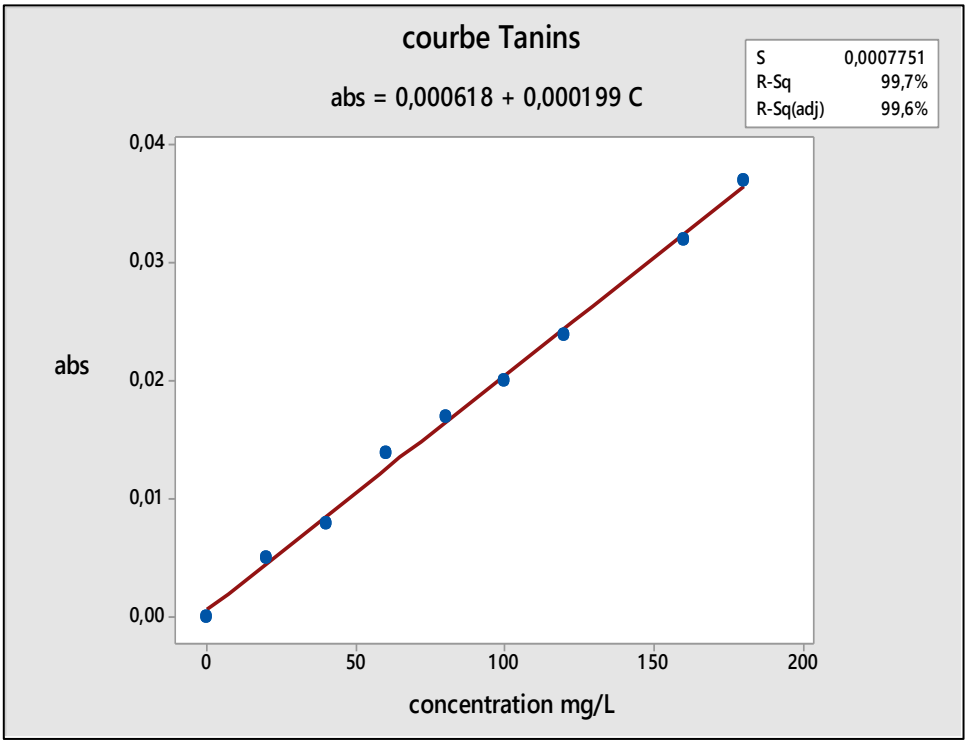


Figure 49: Courbe d'étalonnage des tanins condensées.

Annexe 9

ACTIVITE ANTIOXYDANTE

9.1 Test de l'effet scavenger du radical DPPH (2,2-diphenyl-1-picrylhydrazil)

Dans cette méthode le radical libre chromogène pourpre DPPH est réduit par les antioxydants à l'hydrazine correspondante de couleur jaune pâle. Ce test est mis en œuvre par la préparation de 6 concentrations en µg/ml à partir des extraits hydroalcooliques du son de blé et des contrôles positifs (acide ascorbique, acide gallique, catéchine) ; en suite 50 µl de chaque concentration a été ajouté à 1950 µl de la solution méthanolique du DPPH (25 mg/l). Le mélange a été incubé à l'obscurité pendant 30 min à température ambiante avant de lire son absorbance à 515 nm par le spectrophotomètre (Benhammou et al., 2009). Le pourcentage d'inhibition de DPPH a été calculé par la formule suivante :

% d'inhibition de DPPH = [(À DPPH – À ex) / A DPPH] x 100

• $À_{DPPH}$: Absorbance de solution du DPPH sans extrait.

• $À_{ex}$: Absorbance en présence d'extrait.

Les résultats sont exprimés en IC_{50} (concentration inhibitrice de 50% du radical DPPH) calculée graphiquement à travers la partie linéaire de la courbe des pourcentages inhibitions du DPPH en fonction des différentes concentrations.

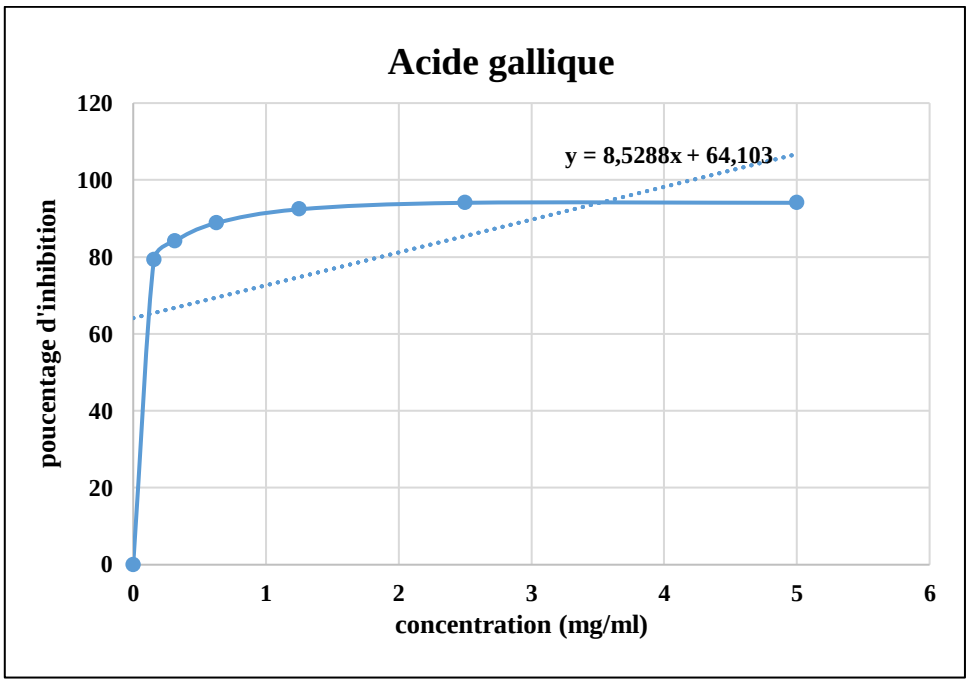


Figure 50: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'acide gallique.

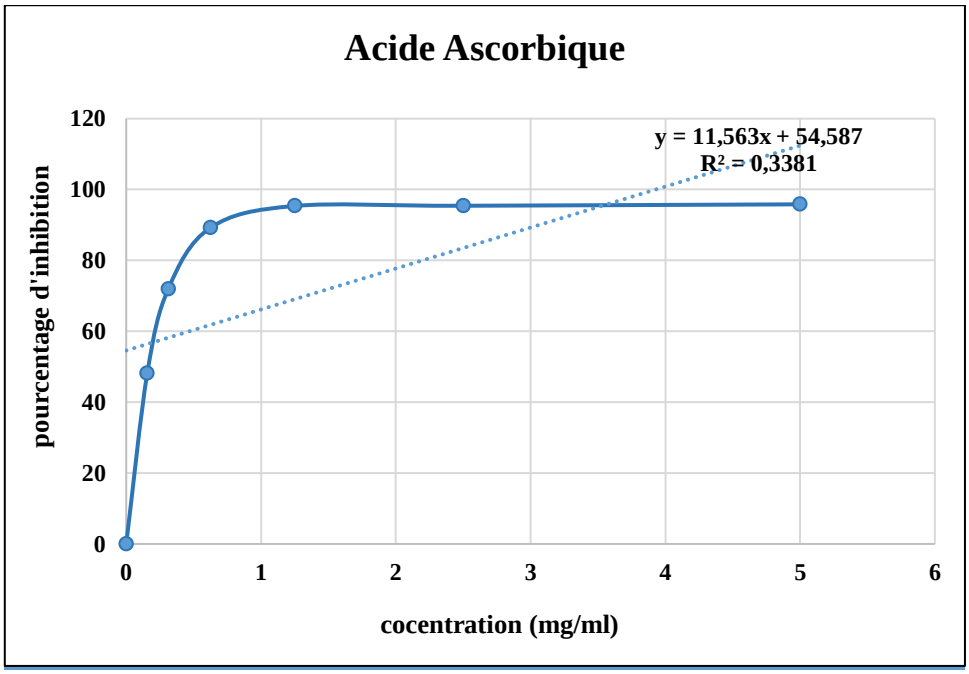


Figure 51: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'acide ascorbique.

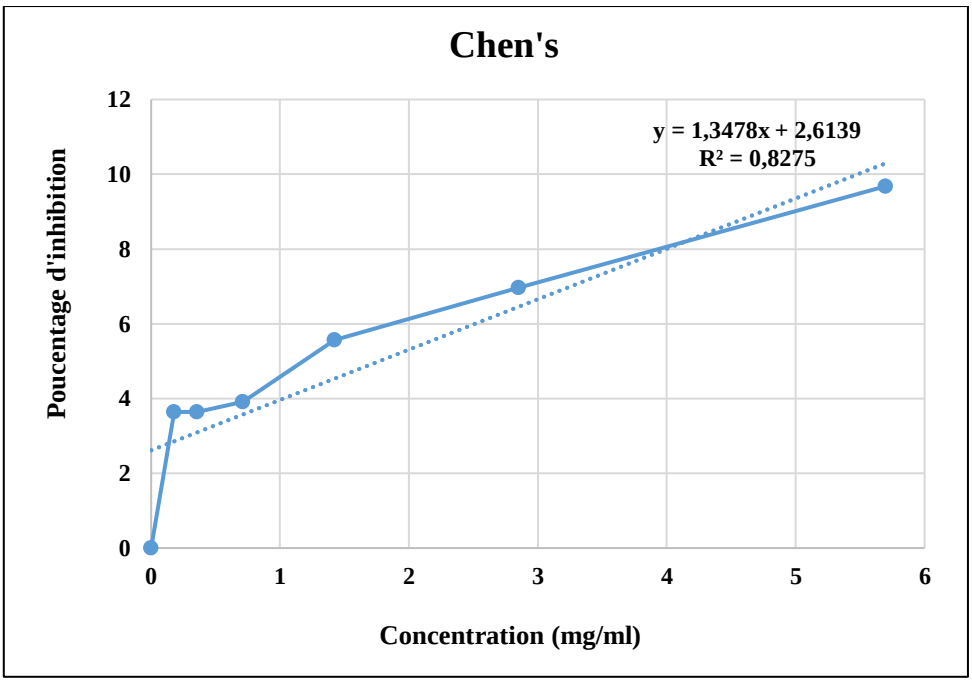


Figure 52: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'extrait Chen's.

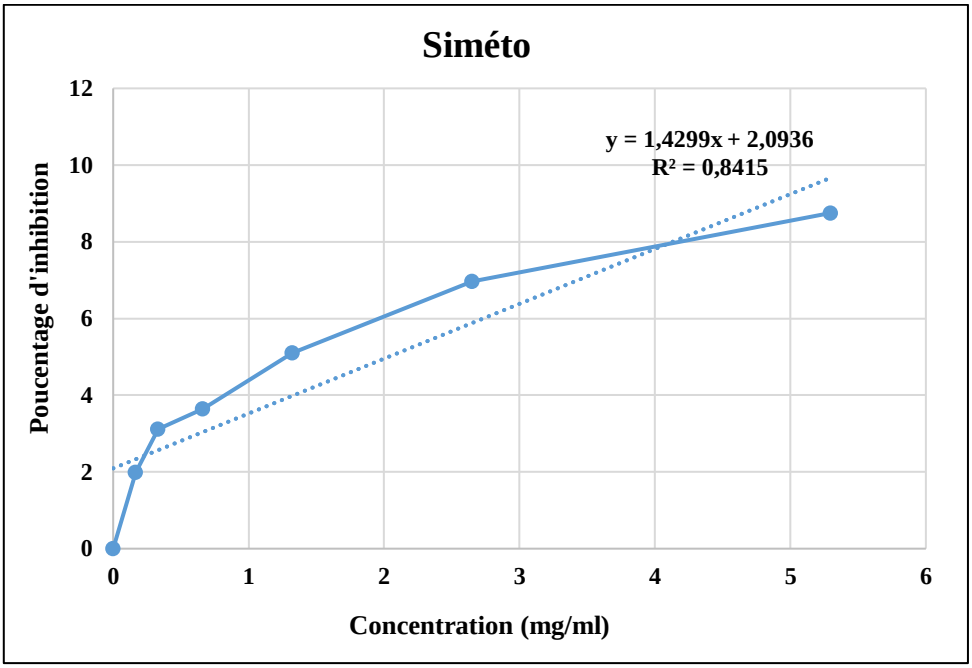


Figure 53: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'extrait Siméto.

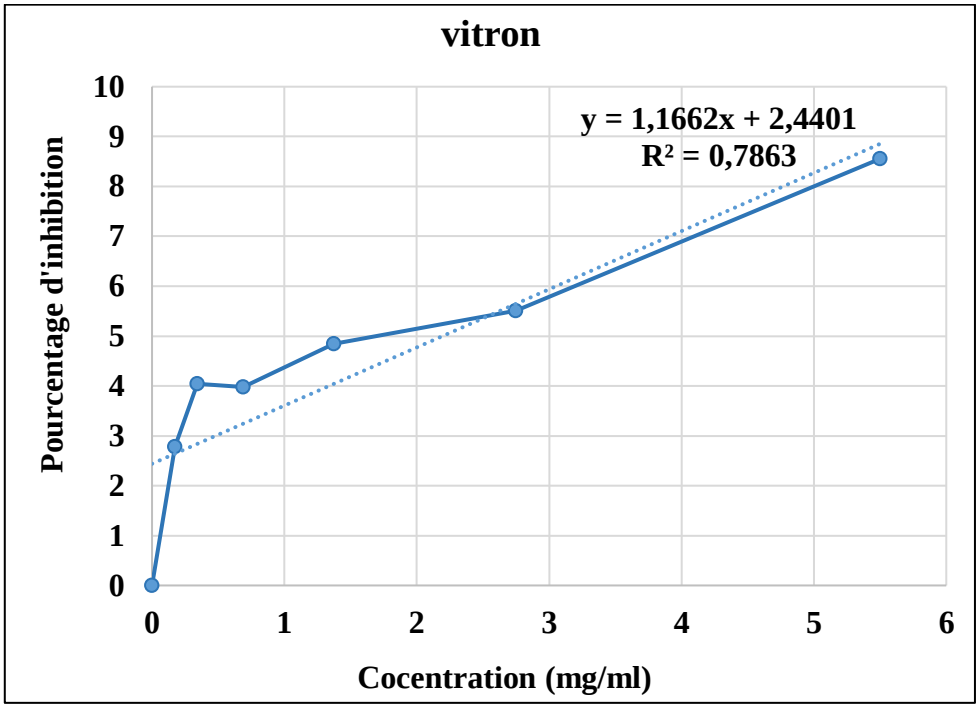


Figure 54: Pourcentage d'inhibition de DPPH par l'extrait Vitron.

9.2 Test de FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power)

La méthode de FRAP est basée sur la capacité des antioxydants à réduire le complexe ferrique tripyridyltriazine (Fe^{+++}-TPTZ) de couleur jaune en complexe ferreux (Fe^{++}-TPTZ) de couleur bleue dans un milieu acide. Le réactif de FRAP est préparé par le mélange de 25 ml de tampon acétate (300 mmol, pH 3,6), 2,5 ml d'une solution de TPTZ (10 mmol/l de 2,4,6-tripyridyl-*s*-triazine dans 40 mmol/l de HCL) et 2,5 ml de $FeCl_3.6H_2O$ (20 mmol/l) (Benzie et Strain., 1996). Le milieu réactionnel dans ce test contient 100 µl de l'extrait éthanolique du son de blé dur, 300 µl d'eau distillée et 3 ml de réactif de FRAP fraichement préparé. Le mélange est incubé pendant 30 min à 37°C avant de lire son absorbance à 593 nm. L'acide ascorbique, acide gallique et la catéchine ont été utilisés comme contrôles positifs. Les concentrations de Fe^{++} dans le mélange ont été calculées graphiquement au moyen d'une courbe d'étalonnage réalisé par le $FeSO_4$ (0,2 - 2 mmol/l) (Benzie and Strain 1996). Les résultats sont exprimés en mol de Fe^{++}/ gramme d'extrait (Cheurfa et Allem., 2016 ; Thangaraj., 2016).

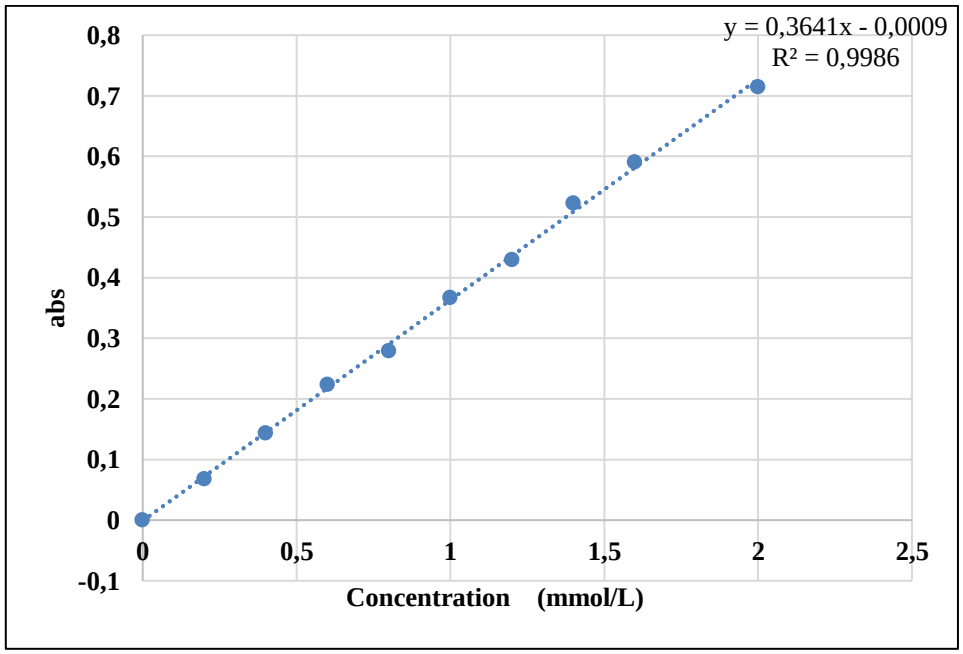


Figure 55: Courbe d'étalonnage de FeSO4.

9.3 Test de blanchissement du β-carotène

Cette méthode est basée sur l'oxydation couplée de β-carotène et l'acide linoléique développée par (Marco., 1968). Elle consiste à mesurer le blanchiment de β-carotène résultant de son oxydation par les produits de dégradation de l'acide linoléique.

Ce test débute par la préparation d'une émulsion contenant 1 ml d'une solution chloroformique de β-carotène (200 µg/ml), 20 µl d'acide linoléique et 200 mg de Tween 40. Le chloroforme a été éliminé par évaporation sous vide. Le résidu ainsi obtenu a été repris dans 50 ml d'eau distillée chargée d'oxygène et en suite le mélange a été agité vigoureusement. Cinq millilitres de l'émulsion a été mélangé avec 200 µl de chaque extrait de la plante (2 mg/ml) et incubé à 50°C dans un bain-marie pendant 120 min. l'eau distillée a été utilisée comme contrôle négatif et des solutions de l'acide ascorbique, acide gallique et catéchine (2 mg/ml) comme contrôles positifs (Sun et Ho., 2005).

La cinétique de blanchissement de β-carotène a été suivie par spectrophotomètre en faisant la lecture de l'absorbance des émulsions à 470 nm chaque 20 min. Le pourcentage de l'activité antioxydante est calculé selon l'équation suivante (Cheurfa et Allem., 2016):

$$\mathbf{AA\% = [1 - (A_0 - A_t) / (A_{10} - A_{1t})] \times 100}$$

• A_0 et A_{10} : Absorbance mesurée au temps zéro d'incubation de l'extrait et de contrôle.

• A_t et A_{1t} : Absorbance mesurée de l'extrait et de contrôle respectivement après incubation de 120 min.

9.4 Effet chélateur des ions ferreux (FIC)

Le test de chélation des ions ferreux a été réalisé selon la méthode décrite par Chew et al. en 2009 (Chew et al., 2009). Il s'agit de mélanger 1 ml de $FeSO_4$ (0,1 mmol/l) avec 1 ml d'extrait suivi de 1 ml de ferrozine (0,25 mmol/l). L'extrait a été utilisé à 3 concentrations différentes (1.75, 2.50 et 5.00 mg/ml). Ensuite, les mélanges réactionnels ont été incubés à température ambiante pendant 10 minutes avant de prendre les mesures d'absorbance à 562 nm. En fait, la ferrozine réagit avec les ions ferreux en solution, et l'absence de réaction implique un effet chélateur des métaux important. L'acide ascorbique, la Catéchine, l'acide gallique et l'EDTA ont été utilisés comme témoins positifs. La propriété de chélation des ions ferreux des extraits a été calculée en pourcentage à l'aide de la formule suivante :

Activité chélatante % = [(À Contrôle - À Échantillon) / Contrôle A] x 100

Où **A contrôle** et **A échantillon** sont l'absorbance du contrôle et de l'extrait, respectivement.

Annexe 10

ACTIVITE ANTIBACTERIENNE

Activité antibactérienne (méthode de diffusion sur milieu gélosé)

La méthode d'antibiogramme par diffusion sur milieu gélosé permet de classer la plupart des isolats bactériens comme sensibles ou résistants à une variété d'agents antimicrobiens. Pour effectuer l'essai, des disques de papier filtre imprégnés d'une concentration spécifiée d'un agent antimicrobien sont appliqués sur la surface d'un milieu gélosé qui a été inoculé avec l'organisme d'essai. Le médicament dans le disque diffuse à travers la gélose. Lorsque la distance par rapport au disque augmente, la concentration de l'agent antimicrobien diminue de façon logarithmique, ce qui crée un gradient de médicament dans le milieu gélosé entourant chaque disque. En même temps que la diffusion du médicament, les bactéries qui ont été inoculées sur la surface et qui n'ont pas été inhibées par la concentration de l'agent antimicrobien dans la gélose continuent de se multiplier jusqu'à ce qu'une pelouse de croissance soit visible. Dans les zones où la concentration du médicament est inhibitrice, il n'y a pas de croissance, formant une zone d'inhibition autour de chaque disque (Jorgensen et Pfaller., 2015).

Mise en œuvre pratique

La mise en œuvre du test a été réalisée selon la procédure décrite par Jorgensen et Pfaller en 2015 dans le grand ouvrage *« Manual of Clinical Microbiology* » édité par l'association américaine de microbiologie.

La procédure est subdivisée en quelques étapes :

• **Préparation des cultures jeunes** : dans notre étude, nous avons testé la sensibilité de 5 souches bactériennes référencées, à savoir l'*Escherichia coli* (ATCC 22922), *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 27853), *Staphylococcus aureus* (ATCC 23235), *Klebsiella pneumoniae* (ATCC 70603) et *Proteus mirabilis* (ATCC 65659). Les souches ont été ensemencées en stries sur une gélose nutritive et incubées à 37 °C pendant une nuit avant le jour de test afin d'avoir des cultures jeunes.

• **Préparation de l'inoculum bactérien** : il s'agit de choisir 4 à 5 colonies bien isolées avec une anse de platine et les transférer dans un tube de solution salée stérile (NaCl 0.9%). Ensuite, émulsionner pour que la turbidité avoisine celle du standard McFarland 0,5.

• **Ensemencement** : Les plaques de gélose Mueller-Hinton doivent être inoculées dans les 15 minutes qui suivent la suspension d'inoculum. Un écouvillon stérile a été plongé dans la suspension, tourné plusieurs fois et pressé doucement sur la paroi intérieure du tube au-dessus du niveau du liquide pour enlever l'excès d'inoculum. L'écouvillon a été ensuite étalé trois fois sur toute la surface de la plaque de gélose, la plaque étant tournée d'environ 60° à chaque fois

pour assurer une distribution uniforme de l'inoculum. Un dernier balayage de l'écouvillon a été effectué autour du bord de la gélose.

• **Dépôt des disques** : quatre disques stériles en papier Whatman N°1 de 6 mm de diamètre ont été imprégné avec l'extrait de son de blé dur préparé dans le DMSO aux concentrations 50, 100, 250 et 500 mg/ml respectivement. Dans les 15 minutes qui suivent l'inoculation des plaques d'Agar, les disques ont été uniformément répartis sur la surface, avec au moins 24 mm entre eux. Ils ont été placés individuellement avec des pinces stériles, puis pressés doucement sur la surface de la gélose pour assurer un contact uniforme. Les disques d'antibiotique commercialisés ont été utilisés comme contrôle positif. Ces derniers sont la Pénicilline 10 µg (PNE), Gentamycine 10 µg (GEN), amoxicilline 25 µg (AMX), clindamycine 2 µg (CMN), érythromycine 15 µg (E).

En fin, un disque imprégné dans du DMSO pur a été utilisé comme contrôle négatif.

• **Lecture et interprétation des résultats** : Une fois que les disques sont placés sur la gélose, les boîtes ont été incubées à 37°C pendant 16 à 18 heures. Après une nuit d'incubation, le diamètre de chaque zone d'inhibition (diamètre du disque compris) a été mesuré en mm et noté.

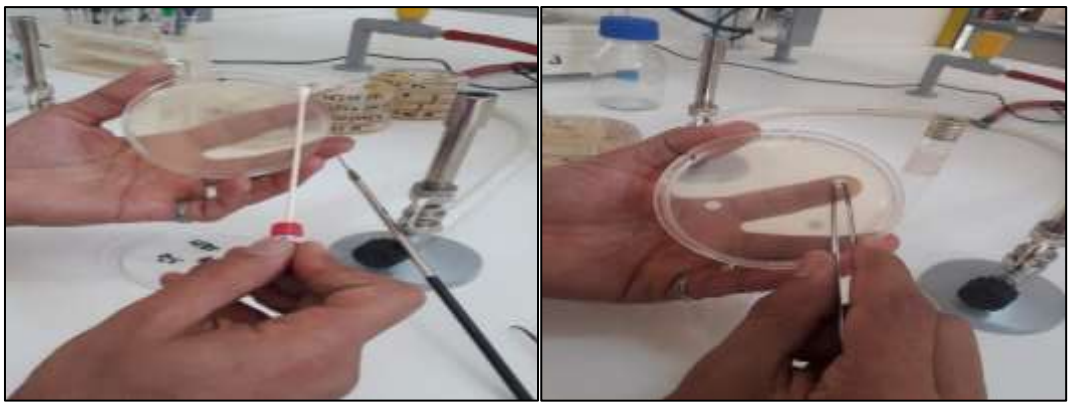


Figure 56: ensemencement et dépôt des disques.

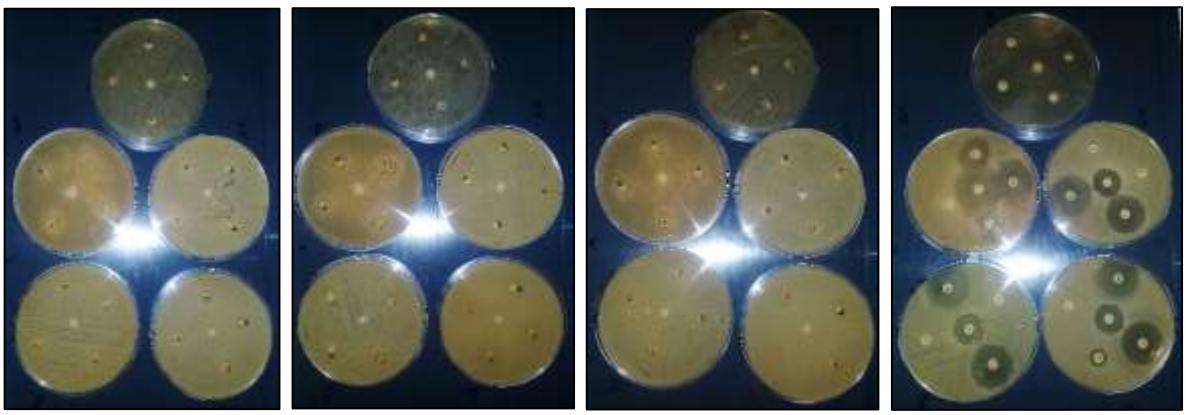


Figure 57: boites de pétries après une nuit d'incubation.

Publication internationale

International Journal of Research in BioSciences
Volume 9 Issue 4, pp. (16-24), October 2020
Available online at http://www.ijrbs.in
ISSN 2319-2844

Research Paper

Phenolic compound content and antioxidant activity of hydro-ethanolic extracts of durum wheat bran (*Triticum turgidum* subsp. Durum) of some Algerian varieties

Sennous Kouider[1], Menadi Noureddine[2], Benyamina Abdelfettah[1], Fimehdi Norredine[2], Boukhatmi Fafa[2], Tarfaoui Louiza[2], Toumi Fawzia[1]
[1]Ecodevelopment of Spaces Laboratory, department of environmental science, faculty of natural and life sciences, Djilali Liabes University of Sidi Bel Abbès, ALGERIA
[2]Biotoxicology laboratory, Department of biology, Faculty of natural and life sciences, Djilali Liabes University of Sidi Bel Abbès, ALGERIA

(Received June 19, 2020, Accepted July 30, 2020)

Abstract

The aim of this study is to evaluate the content of durum wheat bran (DWB) of three Algerian varieties in secondary metabolisms such as total phenols, flavonoids and condensed tannins, and to determine their antioxidant power. The experiment was carried out on the following three varieties of durum wheat (*Triticum turgidum* subsp. Durum): Siméto, Chen's and Vitron. The maceration of the wheat bran powder was realized with 80% ethanol. The determination of total phenols was carried out by the folin-ciocalteu method, that of flavonoids by the aluminum trichloride and sodium hydroxide process and condensed tannins by the vanillin method. Antioxidant activity was tested by four methods: free radical scavenging with DPPH, FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power) test, β-carotene bleaching test and the ferrous ion chelating effect (FIC). The total phenol contents (TPC) for the Siméto, Chen's and Vitron varieties are respectively: 1.678±0.051 mg AGE/g DWB, 1.817±0.231 mg AGE/g DWB and 1.813±0.075 mg AGE/g DWB. The concentration of flavonoids (TFC) is: 0.543±0.102 mg CE/g DWB (Siméto), 0.594±0.116 mg CE/g (Chen's) DWB and 0.503±0.077 mg CE/g DWB for Vitron. The content of condensed tannins (CTC) is 1.526±0.193 mg CE/g DWB for siméto, 1.345±0.850 mg CE/g DWB for chen's and 1.587±0.182 mg CE/g DWB for vitron. The antioxidant activity revealed that the antioxidant power with DPPH and FRAP test is less important compared to the bleaching of β-carotene and the chelating effect of ferrous ions (FIC) which gives the same percentage of activity as the standard. This study demonstrates the richness of durum wheat bran in phenolic compounds and antioxidant substances.

Keywords: Wheat bran, *Triticum durum*, phenolic compounds, antioxidant activity, Chelating activity.

Introduction

Cereal-based foods are by far the major source of food, energy, protein, B vitamins and minerals for the current world population[1]. The use of cereals has evolved considerably and is divided between human food, animal feed and non-food applications[2]. Wheat is the world's largest and most important food crop for direct human consumption[3], 45% of durum wheat is grown in Western Asia and North Africa. Wheat is also widely grown in Mediterranean countries, parts of Eastern Europe, the United States, Mexico and parts of Saskatchewan and surrounding areas in Canada. In South America, durum wheat is grown in Chile, Argentina and the Andean regions[4]. In Algeria, cereals in general and wheat (durum and common) in particular are the main staple diet for consumers. They provide more than 60% of the calorific intake and 75–80% of the protein intake of the food ration[5]. The functional

health properties of whole wheat go far beyond its nutritional properties and are mostly derived from the bioactive compounds in the fraction of the outer layer of the seed that represents the bran (a by-product obtained after refining) intended mainly for animal feed. So there are many Studies have shown that the consumption of wheat bran and its products have a beneficial effect on the prevention and risk reduction of chronic diseases such as atherosclerosis, obesity, type2 diabetes, cancer and some gastrointestinal diseases, including diverticular disease, constipation and irritable bowel syndrome[6,7,8] because it has a physiological effect that can be split into nutritional effects from its constituent nutrients; mechanical effects in the gastrointestinal tract due to its fiber content and antioxidant effects arising from its phytochemical constituents[8]. In wheat bran Ferulic acid is a major phenolic acid presented with other phenolic acids such as vanillic acid, p-coumaric acid, syringic acid, caffeic acid, p-hydroxybenzoic acid[9]. The total phenolic acid content in the wheat bran is around 4.5 µg/g and bran ferulic acid is an example of the hydroxycinnamic acids[10].

Bran also comprises water-insoluble fiber involved in the protection of grain and endosperm. This fiber is made of Arabinoxylan (19–25%), Starch (17–29%), protein (14–18%), Lignin (~3%), β-glucans (1–3%), Phytic acid (3–5%), ferulic acid (0.3-5%)[8]. Plant and plant products are being used as a source of medicine for a long time. The medicinal properties of plants have been investigated in the recent scientific developments throughout the world, due to their potent antioxidant activities, no side effects and economic viability[9]. Phenolic acids and other antioxidants, which are abundant in cereals, can be used more effectively as free radical scavengers as well as reducing and chelating agents for metal ions[11]. However, until now, the majority of studies have been focused on phytochemicals from such sources as vegetables, fruits, and spices, while cereals also accumulate valuable constituents, which might be used in the development and production of healthy dietary ingredients[11]. Also, there are several studies on the phenolic acids contained in wheat, while information on the content of the other polyphenols (lignans, flavonoids) of wheat is poor[12], these show that the wheat bran is a good source of diverse nutrients and antioxidant activity materials such as tocopherols, carotenoids, phenolic acids and phytochemicals[13]. So, the objective of this study is to determine the total phenolic content of durum wheat bran (*Triticum turgidum* subsp. Durum) of three Algerian varieties and to compare their antioxidant activities with many deferent methods.

Materials and Methods

Plant material

Three samples varieties of durum wheat “Triticum turgidum subsp. Durum (Desf.)”: Siméto, Chen’s and Vitron (Table 1)[14-16], were recovered from the National Centre for Seed and Plant Control and Certification of Sidi Bel Abbès, western Algeria. The varieties were harvested during June 2018 in different regions. The first sample from *Mascara* region*:* Latitude: 35.3833, longitude: 0.15 35° 22′ 59″ N, 0° 9′ 0″ E, Altitude: 489 m with a semi-arid dry and cold climate (Köppen classification: BSk). The second sample from *Ain Temouchent* region*:* Latitude: 35.2895, longitude: -1.14099 35° 17′ 22″ N, 1° 8′ 28″ W, Altitude: 245 m with semi-arid dry and cold climate (Köppen classification: BSk), and the third sample from *Adrar* region*:* Latitude: 27.8667, longitude: -0.283333 27° 52′ 0″ N, 0° 16′ 59″ W, Altitude: 279 m with dry and hot desertic climate (Köppen classification: BWh). The three varieties processed in a laboratory mill to obtain refined bran with 1–3 mm dimensions.

Table 1: The durum wheat varieties investigated

species	Varieties	Origin	Pedigree	Crossbreeding
Triticum turgidum **subsp. Durum (Desf.) Husn**	Chen’s	Syria	Ihwa’S’/Bit ’S’CD 26406-3B-2Y-9Y-OM-3Y-OB	CIMMYT-ICARDA
	Siméto	Italy	Capeiti8/Valvona	Italy
	Vitron	Spain	Turkey77/3/Jori-69/Anhinga//Flamingo	CIMMYT-ICARDA

Preparation of extracts

A quantity of 1.5 g of durum wheat bran of each variety has been finely ground and macerated separately in 30 ml of 80% (v/v) ethanol for 24 hours with vigorous agitation. After filtration with wattman paper, the extracts were stored in test tubes at 4°C.

Estimation of the content of phenolic compounds

The determination of total phenols was carried out with the Folin-Ciocalteu colorimetric reagent according to the method cited by Singleton and Rossi 1965[17]. The determination of flavonoids was

carried out by the method adopted by Zhishen et *al*., 1999[18] with aluminum trichloride and soda. The condensed tannins were determined by the vanillin method in the acid medium described by Price et *al*., 1978[19]. Calibration curves (Figures 1 and 2) are performed under the same operating conditions using phenolic standards. The results were expressed in milligram gallic acid equivalents per gram of durum wheat bran (mg GAE/g) for total phenols and milligram catechin equivalents per gram of durum wheat bran (mg CE/g) for flavonoids and condensed tannins.

Antioxidant activity test

The antioxidative activity was investigated using various established in vitro indexes including DPPH radical scavenging activity, reducing power (FRAP), β-carotene bleaching test, chelating activity (FIC):

DPPH scavenging assay

This test was evaluated according to the protocol of Benhammou et *al*., 2009[20] by the DPPH method. In this process the purple chromogenic free radical DPPH is reduced by antioxidants to the pale-yellow hydrazine and the absorbance was read against a blank at 515 nm. The antioxidant activity was expressed using the IC50 value calculated as the concentration to inhibit 50% of free radicals (mg/ml) from the graph plotted of inhibition percentage against extract concentrations.

FRAP assay (Ferric Reducing Antioxidants Power)

The method described measures the ferric reducing ability (FRAP). At low pH, when a ferric tripyridyltriazine (Fe+++-TPTZ) complex is reduced to the ferrous (Fe++) form an intense blue color with an absorption maximum at 593 nm develops[21]. In our study, the FRAP method is carried out according to the protocol of Benzie and Strain 1996[22]. The results were calculated according to the FeSO4 calibration curve and were expressed in millimoles (Fe++) per gram of extract[23].

β-carotene bleaching test

This method based on the coupled oxidation of β-carotene and linoleic acid developed by Marco in 1968[24]. It consists of measuring the bleaching of β-carotene resulting from its oxidation by the degradation products of linoleic acid. This test was evaluated according to the protocol of Sun and Ho, 2004[25]. The bleaching kinetics of β-carotene was monitored with a spectrophotometer by reading the absorbance of the emulsions at 470 nm every 20 minutes[23].

Chelating effect of ferrous ions (FIC)

The ferrous ions chelation test was performed according to the method described by Chew et *al*., 2009[26]. The chelation property of the ferrous ions in the extracts was calculated as a percentage using the following formula:

Chelating Activity % = [(A Control - A Sample)/Control A] x 100, Where ***A control*** and ***A sample*** are the absorbance of the control and extract, respectively.

Statistical Analysis Data analysis was performed using Minitab18 statistical software. The results were expressed for continuous variables as mean ± standard error of the mean (SEM), and compared by the Anova one-way test. A significance level of $p < 0.05$ was used. All graphs and tables were generated using Microsoft Excel 2019.

Determination of phenolic compounds

The concentrations of total phenols content (TPC), total flavonoids content (TFC) and condensed tannins content (CTC) in the durum wheat bran extracts from the three varieties are shown in **Table 2.**

Table 2: Concentration of phenolic compounds in durum wheat bran extracts

	TPC*	TFC**	CTC**
Chen's	1.817±0.231	0.594±0.116	1.345±0.850
Siméto	1.678±0.051	0.543±0.102	1.526±0.193
Vitron	1.813±0.075	0.503±0.077	1.587±0.182

*mg AGE/g DWB, **mg CE/g DWB

The total phenol contents for Siméto, chen's and vitron varieties are 1.678±0.046 mg GAE/g of DWB, 1.817±0.21 mg GAE/g of DWB and 1.813±0.068 mg GAE/g of DWB respectively. The flavonoid concentration is 0.543±0.091mg CE/g DWB (Siméto), 0.594±0.10 mg CE/g DWB (Chen's) and 0.503±0.069 mg CE/g DWB (Vitron).

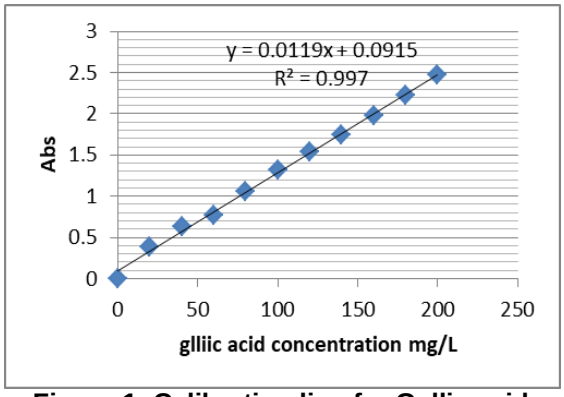


Figure 1: Calibration line for Gallic acid

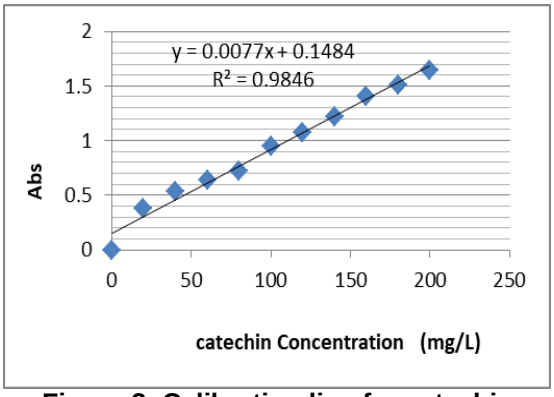


Figure 2: Calibration line for catechin

The condensed tannin content is 1.526±0.173 mg CE/g DWB for Siméto, 1.345±0.176 mg CE/g DWB for Chen's and 1.587±0.163 mg CE/g DWB for Vitron. No significant differences were recorded between the concentrations of the three phenolic compounds in the varieties studied. Total phenols (p=0.259), flavonoids (p=0.382) and condensed tannins (p=0.748).

Scavenger assay of DPPH radical

The results of DPPH radical scavenging activity (IC50) for the extracts of durum wheat bran of the three varieties and the different reference standards (ascorbic acid, gallic acid) are shown in Table 3. The extracts of different varieties of DWB have low antioxidant activity compared to standards, with an IC50 of 35.16±0.15 mg/ml, 33.50±0.22 mg/ml and 40.79±0.71 mg/ml respectively for Chen's, Siméto and Vitron.

Table 3: IC50 values for DWB extracts and reference standards.

Extracts	IC50 (mg/ml)
Chen's	35.16±0.15
Siméto	33.50±0.22
Vitron	40.79±0.71
Ascorbic Acid	0.087±0.02
Gallic Acid	0.095±0.01

FRAP assay

The antioxidant power of DWB extracts was evaluated by FRAP assay in Table 4

Table 4: Fe++ concentrations in mmol/g of extracts

Extracts	antioxidant power *
Chen's	0.62±0.013**
Vitron	0.54±0.059**
Siméto	0.71±0.022**
Catéchine	4.81±0.004
Gallic Acid	4.62±0.081
Ascorbic Acid	4.38±0.009

*Mmol Fe++/G of extract, **p=0.004

The results show a significant difference (p=0.004) between the extracts of the different varieties, with 0.62±0.01 mmol Fe++/g for the Chen's variety, 0.54±0.05 mmol Fe++/g for the Vitron and a concentration of 0.71±0.02 mmol Fe++/g for Siméto variety. The reducing capacity of the extracts is less important compared to the standards used (catechin, gallic acid and ascorbic acid) with 4.81 mmol Fe++/g, 4.62 mmol Fe++/g and 4.38 mmol Fe++/g respectively.

β-carotene bleaching method

According to the bleaching kinetics of β-carotene (Figure 3), no significant difference was found among the three DWB extracts of Chen's, Vitron and Siméto with p=0.893, and the percentages of inhibitory activity are 30.4±1.8%, 35.4±0.00% and 39±1.6% respectively (Table 5). According to the bleaching kinetics of β-carotene, no significant difference observed (p=0.189) between the percentage's inhibition of the standards catechin (29.3±1.2%) and gallic acid (25.8±1.7%) and that of ascorbic acid (52.2±2.2%). The results of this assay show that the extracts of DWB having a high

antioxidant activity compared to the reference standards. According to the percentage of inhibition, the Antioxidant Activity of the extracts is in the following order: Ascorbic acid> Siméto> Vitron> Chen's> Catechin> Gallic acid.

Table 5: Percentages of antioxidant activity of durum wheat bran extracts

Extracts	% of activity
Chen's	30.4±1.8*
Vitron	35.4±0.00*
Siméto	39.0±1.6*
Catechin	29.3±1.2
gallic acid	25.8±1.7
ascorbic acid	52.2±2.2

*p=0.133

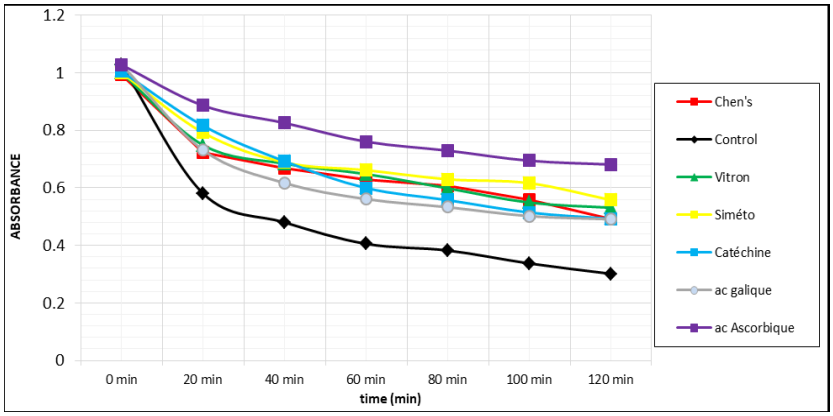


Figure 3: Bleaching kinetics of β-carotene against time for the three DWB varieties extract and reference standards

Chelating effect of ferrous ions (FIC)

The analysis of the ferrous ion chelating activity of our extracts shows a strong FIC activity. No significant difference (p=0.133) for the chelating activity observed between the three DWB extracts of the varieties, and the difference is no significant according to the concentrations of the extracts for this test with p=0.225. At the highest concentration (5 mg/ml), DWB extracts showed the highest FIC activity with 98.14%, 97.46% and 95.80% for Chen's, Vitron and Siméto respectively. The extracts revealed a chelating effect strongly superior to the reference standards used catechin, gallic acid and ascorbic acid except for EDTA which gives an activity of 98.19% almost the same activity of our extracts at the highest concentration **(Table 6)**.

Table 6: Percentage (%) chelation of ferric ions in DWB extracts and standards

Extracts	1.75 mg/ml	2.50 mg/ml	5.00 mg/ml
Chen's	96.58±0.97	97.26±2.86	98.14±1.11
Vitron	94.72±1.33	95.70±1.18	97.46±0.97
Siméto	77.91±0.29	89.44±0.56	95.80±0.83
EDTA	97.86±0.08	98.10±0.08	98.19±0.14
Catechin	31.66±0.70	37.51±1.04	41.69±0.29
Ascorbic acid	29.11±1.41	30.13±0.35	32.08±1.26
Gallic acid	28.27±0.14	30.50±0.28	34.08±2.12

Phenolic compound contents

Phenolic acids and flavonoids represent the most common form of phenolic compounds found in whole wheat where they are among the major and most complex groups of phytochemicals[27]. It is well known that phenolic compounds are concentrated in the bran and germ fractions of wheat that are removed during the milling of wheat into white flour[12]. It is difficult to compare the results obtained in this study to those of previous studies because of the range of environmental factors and durum wheat cultivars used, varying testing methods, extraction solvent, differences in the extraction protocol and units of measure[28]. The results obtained in table 1 for total phenol concentrations are similar to those found by Vaher et *al*., 2010[12] who reported that wheat bran layers have the highest total phenol

content, ranging from 1.258 to 3.157 mg GAE/g. However, Abozed et *al*., 2010[29] also found high concentrations of total phenol: 1.99 mg GAE/g for common wheat bran and 2.64 mg GAE/g for DWB with 70% hydro-ethanol extraction. Povilaitis et *al*., 2015[11] found a total phenol concentration between 1.58 and 1.78 mg AGE/g of wheat bran, they showed that variations in the concentration of total phenols between different particle size fractions for the same type of bran were not remarkable. The studies of Zhu et *al*., 2010[30] found a concentration close to our results which are 1.24±0.026 mg AGE/g of bran. In comparison with other works, our results confirm that the DWB has a considerable concentration in TPC. On the other hand, Flavonoids are an important class of phytochemicals in wheat, contributing to the health beneficial properties[31].

Our results show a low concentration in the bran extracts with an average between 0.503 and 0.594 mg CE/g of DWB because they are found largely in wheat germ and relatively low concentrations in bran[6] and the higher content of flavonoids existed in whole wheat than bran[29]. For flavonoid results, our concentrations are higher compared to other results. In a previous study by Abozed et al., 2010[29], showed that flavonoid concentrations are 223.96 µg CE/g for common WB and 258.04 µg CE/g for DWB. The results of Brewer et *al*., 2014[32] revealed that the level of flavonoids in wheat bran at different particle sizes ranged from 177.05 to 206.74 µg CE/g, and the results of the study indicate that flavonoids are concentrated in the bran. The mean total flavonoids were 213.04 and 259.31 mg CE/kg in bran and durum wheat bread, respectively. Further results from Ziliç et *al*., 2012[27] indicate that flavonoids are concentrated in the bran, and the mean total flavonoid content was 259.31 mg CE/kg in DWB. For condensed tannins content (CTC) results, we found it very difficult to compare these results with another research. We are fortunate to be the first to determine their concentration in DWB in such a study.

Previous work Mentioned that the variation of phenolic compound concentration in durum wheat bran affected by the geographic location, climatic condition and genotypes of varieties. Moreover, other studies suggested that the biotic conditions (species, organ and physiological stage) and abiotic stresses (salinity, luminosity, water deficit and edaphic factors) may enhance the phenolic metabolism as a response to oxidative stress[20]. However, Moore et *al*., 2006[33] motioned that the Environment and genotype are also important factors. Although in our results no significant variation in phenolic compounds observed among the DWB of the three varieties. The values obtained in our studies appear to be higher than those reported by Brandolini et *al*., 2013[34], Žilić et *al*., 2013[31] in literature for different durum wheat genotypes and/or agro-climatic areas. The presence of antioxidant compounds and the level of antioxidant activity in durum wheat are significantly affected by the genotype, the growing area[35]**,** and environmental conditions[31].Further study is needed to explore how these parameters change across environments, as genotype by environment interactions may have a high implication on the antioxidative capacity in plants. Although a relatively small number of genotypes was studied, high variability for most phenolic compounds and the antioxidant capacity was obtained in species[31]. It is known that the antioxidant properties of the wheat grain are significantly influenced by the genotype and environmental conditions and that phenolic compounds may significantly contribute to the overall antioxidant capacity of wheat grains[31], it would be useful to determine more precisely which individual environmental factors contribute most to this variance[33].

The antioxidant activity

The most harmful free radicals are hydroxyl ($HO^{\cdot}$) and hydrogen radicals produced in ionizing radiation or environmental toxicology reactions, as well as superoxide radicals ($O_2^{\cdot}$) which are produced in mitochondrial electron transport reactions. Naturally, superoxide dismutase rapidly forms hydrogen peroxide (H_2O_2) from ($O_2^{\cdot}$). Free ferrous iron (Fe^{2+}) and copper (Cu^{+}) participate in Fenton reactions with H_2O_2 to produce hydroxyl radicals and hydroxide anions, oxidizing the metals to Fe^{3+} and Cu^{2+}. The oxidized free iron or copper can then oxidize the H^2O^2 to form hydroperoxyl radicals ($HOO^{\cdot}$) and protons (H^{+}), reducing the metals to Fe^{2+} and Cu^{+}, so that new peroxidation reactions can occur cyclically and this leads to a lot of cellular, enzymatic, vascular dysfunctions[36]. The bran is responsible for the antioxidant capacity of wheat as it is rich in phenolic compounds. About 95% of phenol compounds are bound to cell wall polysaccharides and they are altogether indicated as dietary fiber-phenolic compounds[37]. In common with many other phytochemicals, phenolic acids and flavonoids were mostly in insoluble forms in the wheat bran layer ester-linked with cell wall components such as arabinoxylans and lignin. On the other hand, only a small percentage of soluble low molecular weight antioxidants (about 6%), which are free from chemical or physical interaction with other macromolecules, are present in wheat bran[38].

The results of the antioxidant activity studied using a variety of in vitro methods including DPPH radical scavenging activity, bleaching of β-carotene, FRAP reducing power and FIC chelation activity, showed considerable antioxidant potential, which may be partly responsible for the medicinal properties of durum wheat bran. The antiradical activity of the DPPH and FRAP test was found to be quite low compared to the other methods. Our FIC test results and the β-carotene bleaching test are very important. While all the assays presented in this paper have been evaluated and utilized by researchers to investigate antioxidant properties. The assay results for phenolic compounds and the antioxidant activity of DWB extracts show low positive and negative correlation except between the antioxidant activity of β-carotene test with CTC which is positively correlated with r^2=0.799 and the antioxidant activity of the FIC test with TPC which has a perfect positive correlation with r^2=0.966, and we note that the correlation between TFC and DPPH scavenging activity is positively remarkable with r^2=0.780, because the most of the flavonoids possess strong antioxidant properties following chain-breaking mechanism and they can act as antioxidants by acting as hydrogen donors or by acting as chelating agents and may help to control the extent of lipid peroxidation by chelating copper ions[39].

Žilić et *al*., 2013[31] find that the total antioxidant capacity had a positive correlation with the free total phenolics in bread wheat and durum wheat (r^2=0.76 and 0.80). However, considering that most of the phenolic compounds in cereals are bound to the insoluble polysaccharide, the antioxidant capacity of wheat is mostly dependent on this phenolic form. A significant correlation between antioxidant properties for wheat grain and fractions have been previously reported in numerous studies, others found significant correlations between DPPH scavenging capacity and TPC[33]. So TPC is reported to be directly associated with antioxidant activity[39]. Liyana-Pathirana and Chahidi in 2007[40] reported that only the bran fraction showed higher antioxidant activity than the other fractions obtained after wheat milling and found that the ability to scavenge DPPH radicals in wheat fractions was in the order of bran> shorts> feed flour> whole grain> flour, for wheat cultivars.

These results were supported by those of Higuchi in 2014[8], Onyeneho and Hettiarachchy in 1992[41], who finds that Wheat bran has a higher antioxidant activity than other milled fractions and the extract of wheat bran having a high concentration of phenolic acids, were shown to have stronger antioxidant activity than other fractions of wheat. Phenolic compounds are considered to be free radical scavengers, and their antioxidant properties depend on their chemical structure. Specifically, these properties depend on their ability to donate hydrogen or electron and their ability to delocalize the unpaired electron within the aromatic structure[42]. The results obtained show that the antioxidants contained in DWB extracts can trap free radicals and reduce oxidants. The electron donor properties of wheat extract thereby neutralizing free radicals by forming stable products. The outcome of the reducing reaction is to terminate the radical chain reactions that may otherwise be very damaging[38].

The DWB examined in this study demonstrated good reducing capacity thereby acting as efficient reductones. This is in agreement with Liangli, 2007[43] who reported that phenolic acids, which are covalently bound to the insoluble wheat bran matrix, possess different antioxidant functions. Among various species of transition metals, iron is known as the most powerful pro-oxidant due to its high reactivity[44], and the Chelating agents can trap or deactivate metal ions and potentially inhibit the transition metal-mediated oxidative processes. The wheat bran has a substantial capacity for binding metal ions and the major active components have been proposed as dietary fibers or phytate in bran[45]. The work of Wang et *al*., 2013[46] indicated that the metal-chelating capacity of phenolic compounds does not seem to be related to their effectiveness in reducing power and radical scavenging activities. Wheat bran has the strongest activity bonds for the reducing power and chelating activity of ferrous ions[30].

The β-carotene test is a complementary technique that simulates the lipid peroxidation reaction in vitro. It consists of measuring the bleaching of β-carotene resulting from its oxidation by the degradation products of linoleic acid. The oxidation of the latter is catalyzed by heat (50°C)[47]. The addition of extracts of DWB and standards has the effect of delaying the spread of the reaction. The activity of our extracts was moderately high compared to the reference molecules. Comparison with other work is a delicate task because of certain limitations of the technique, such as the different concentrations of extracts used by the researchers and also the thermally induced oxidation of linoleic acid which is not controlled, which often induces variability in the data[47]. Finally, the extracts give a strong activity due to their richness in cell cycle inhibiting compounds, antioxidant capacity and chelation of metals such as phenolic acids, Alkyresorcinols and phytic acid[6]. These results indicated that wheat bran may replace synthetic antioxidants in food formulations and play a major role in human health[29].

Conclusion

The results of our study showed that durum wheat bran is a by-product rich in phenolic compounds and has considerable antioxidant activity. This antioxidant power testifies the presence of some active principles that can be valorized in the pharmaceutical industry for the prevention and therapy of diseases due to oxidative stress. The establishment of a diet rich in wheat bran as a replacement for synthetic antioxidants in food formulations can play an important role in human health and present undoubtedly a therapeutic and dietetic interest.

References:

1. Monterrey D., Cereals: Dietary Importance. Encyclopedia of Food and Health. Elsevier Ltd, **(2016)**
2. Saulnier L., Les grains de céréales : diversité et compositions nutritionnelles. Cahiers de Nutrition et de Diététique, 47 : S4–S15 **(2012)**
3. Carver B.F., Wheat Science and Trade. Brett F. Carver. 1 st ed, USA **(2009)**
4. Sissons M., Abecassis J., Marchylo B., Carcea M., Durum Wheat. Chemistry and Technology. Second Edi. AACC International, USA, 46 (4) **(2011)**
5. Khennaoui A., Diversité phénotypique et moléculaire du blé dur cultivé en Algérie : identification et caractérisation des accessions, Université des Frères Mentouri Constantine, Algérie **(2018)**
6. Sapirstein H.D., Bioactives and Toxins. Bioactive Compounds in Wheat Bran. Encyclopedia of Food Grains. Second edition. Elsevier Ltd, 268–276 **(2016)**
7. Babu CR., Ketanapalli H., Beebi S.K., Kolluru V.C., Wheat Bran Composition and Nutritional Quality: A Review, Advances in Biotechnology & Microbiology, 9 (1): 1–7 **(2018)**
8. Higuchi M., Antioxidant Properties of Wheat Bran against Oxidative Stress. Book chapter. in Wheat and Rice in Disease Prevention and Health, Elsevier, 181–199 **(2014)**
9. Singh B., Sharma H.K., Sarkar B.C., Optimization of extraction of antioxidants from wheat bran (Triticum spp.) using response surface methodology. Journal of food science technology, 49 (3): 294–308 **(2012)**
10. Giet J.M., Roiseux O., Blecker C., Enzymatic process development for the extraction of ferulic from wheat bran. Biotechnology, Agronomy and Society and Environment, 14 (2) : 539 **(2010)**
11. Povilaitis D., Šulniute V., Venskutonis P.R., Kraujaliene V., Antioxidant properties of wheat and rye bran extracts obtained by pressurized liquid extraction with different solvents. Journal of Cereal Science, 62: 117–123 **(2015)**
12. Vaher M., Matso K., Levandi T., Helmja K., Kaljurand M., Phenolic compounds and the antioxidant activity of the bran, flour and whole grain of different wheat varieties. Procedia Chemistry, Elsevier, 2 (1): 76–82 **(2010)**
13. Jung G., Kang H., Chun B., Characterization of wheat bran oil obtained by supercritical carbon dioxide and hexane extraction. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Elsevier, 18 (1): 360–363 **(2012)**
14. Centre National de Contrôle et de Certication des semences et plants., Bulletin des variétés de Céréales autogames, **(2015)**
15. Kirouani A., Kiar RO., Boukhalfoun L., Abidine E., Caractérisation de quelques variétés Algériennes de blé dur (Triticum turgidum L. var. durum) par le biais des marqueurs phénotypiques. Journal of Applied Biosciences,142: 14464–14477 **(2019)**
16. Xynias I.N., Mylonas I., Korpetis E.G., Ninou E., Tsaballa A., Avdikos I.D., Mavromatis A.G., Durum wheat breeding in the Mediterranean region: Current status and future prospects. Agronomy, 10 (3): 1–27 **(2020)**
17. Singleton V., Rossi J. Colorimetry of Total Phenolics With Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. American Journal of Enology and Viticulture, 16 (3): 144–158 **(1965)**
18. Zhishen J., Mengcheng T., Jianming W., The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chemistry, 64 (4): 555–559 **(1999)**
19. Price M.L., Scoyoc S., Butler L., A Critical Evaluation of the Vanillin Reaction as an Assay for Tannin in Sorghum Grain. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 26 (5): 1214–1218 **(1978)**
20. Benhammou N., Bekkara F.A., Panovska, T.K., Antioxidant activity of methanolic extracts and some bioactive compounds of Atriplex halimus. Comptes Rendus Chimie. Elsevier, 12 (12): 1259–1266 **(2009)**
21. Oyaizu M., Studies on products of browning reaction. Antioxidative activities of products of browning reaction prepared from glucosamine. The Japanese Journal of Nutrition and Dietetics, 44 (6): 307–315 **(1986)**
22. Benzie I., Strain J., The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: The FRAP assay. Analytical Biochemistry, 239 (1): 70–76 **(1996)**
23. Cheurfa M., Allem R., Évaluation de l’activité anti-oxydante de différents extraits des feuilles d’Aloysia triphylla (L’Hérit.) d’Algérie in vitro. Phytotherapie, 14 (3): 181–187 **(2016)**

24. Marco G., A rapid method for evaluation of antioxidants. Journal of the American Oil Chemists' Society, 45 (9): 594–598 **(1968)**
25. Sun T., Ho C.T., Antioxidant activities of buckwheat extracts. Food Chemistry. Elsevier, 90 (4): 743–749 **(2005)**
26. Chew Y.L., Goh J.K., Lim Y.Y., Assessment of in vitro antioxidant capacity and polyphenolic composition of selected medicinal herbs from Leguminosae family in Peninsular Malaysia. Food Chemistry. Elsevier, 116 (1): 13–18 **(2009)**
27. Žilić S., Serpen A., Akillioğlu G., Janković M., Gökmen V., distributions of phenolic compounds, yellow pigments and oxidative enzymes in wheat grains and their relation to antioxidant capacity of bran and debranned flour. Journal of Cereal Science, 56 (3): 652–658 **(2012)**
28. Zhou K., Yu L., Effects of extraction solvent on wheat bran antioxidant activity estimation. LWT - Food Science and Technology, 37(7): 717–721 **(2004)**
29. Abozed S.S., El-kalyoubi M., Abdelrashid A., Salama M.F., Total phenolic contents and antioxidant activities of various solvent extracts from whole wheat and bran. Annals of agricultural sciences, 59 (1): 63–67 **(2014)**
30. Zhu K.X., Huang S., Peng W., Qian H.F., Zhou H.M., Effect of ultrafine grinding on hydration and antioxidant properties of wheat bran dietary fiber. Food Research International, 43(4): 943–948 **(2010)**
31. Žilić S., Šukalović V.H.T., Dodig D., Maksimović V., Kandić V., Soluble free phenolic compound contents and antioxidant capacity of bread and durum wheat genotypes. Genetika, 45(1): 87–100 **(2013)**
32. Brewer L.R., Kubola J., Siriamornpun S., Herald T.J., Shi Y.C., Wheat bran particle size influence on phytochemical extractability and antioxidant properties. Food Chemistry, 152: 483–490 **(2014)**
33. Moore J., Liu J.G., Zhou K., Liangli L.Y., Effects of Genotype and Environment on the Antioxidant Properties of Hard Winter Wheat Bran. J. Agric. Food Chem, 54: 5313−5322 **(2006)**
34. Brandolini A., Castoldi P., Plizzari L., Hidalgo A., Phenolic acids composition, total polyphenols content and antioxidant activity of *Triticum monococcum*, *Triticum turgidum* and *Triticum aestivum*: A two-years evaluation. Journal of Cereal Science, 58 (1):123–131 **(2013)**
35. Martini D., Taddei, F., Ciccoritti R., Pasquini M., Nicoletti I., Corradini D., D'Egidio M.G., Variation of total antioxidant activity and of phenolic acid, total phenolics and yellow coloured pigments in durum wheat (*Triticum turgidum* L. var. durum) as a function of genotype, crop year and growing area. Journal of Cereal Science, 65: 175–185 **(2015)**
36. Armstrong D., Stratton R.D., Oxidative Stress and Antioxidant Protection: The Science of Free Radical Biology and Disease, John Wiley & Sons. ed. John Wiley & Sons, New Jersey **(2016)**
37. Vitaglione P., Napolitano A. Fogliano V., Cereal dietary fiber: a natural functional ingredient to deliver phenolic compounds into the gut. Trends in Food Science and Technology, 19 (9): 451–463 **(2008)**
38. Liyana-Pathirana C.M., Shahidi F., Importance of insoluble-bound phenolics to antioxidant properties of wheat. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 54 (4): 1256–**1264 (2006)**
39. Iqbal S., Bhanger M.I., Anwar F., Antioxidant properties and components of bran extracts from selected wheat varieties commercially available in Pakistan. LWT - Food Science and Technology, 40 (2): 361–367, **(2007)**
40. Liyana-pathirana C.M., Shahid F., Food Chemistry Antioxidant and free radical scavenging activities of whole wheat and milling fractions. Food Chemistry, 101 (3): 1151–1157 **(2007)**
41. Onyeneho S.N., Hettiarachchy N.S., Antioxidant Activity of Durum Wheat Bran. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 40: 1496–1500 **(1992)**
42. Prior R.L., Wu X., Schaich K., Standardized methods for the determination of antioxidant capacity and phenolics in foods and dietary supplements. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 53 (10): 4290–4302 **(2005)**
43. Liangly Y., Wheat Antioxidants. Wheat Antioxidants. Department of Nutrition and Food Science. The University of Maryland, **(2007)**
44. Gülçin I., Antioxidant activity of caffeic acid (3,4-dihydroxycinnamic acid). Toxicology, 217 (2–3): 213–220 **(2006)**
45. Frolich W., Chelating properties of dietary fiber and phytate. The role for mineral availability. Advances in Experimental Medicine and Biology, 270: 83–93 **(1990)**
46. Wang T., Raddatz J., Chen G., Effects of microfluidization on antioxidant properties of wheat bran. Journal of Cereal Science, 58(3): 380–386 **(2013)**
47. Laguerre M., Lecomte J., Villeneuve P., Evaluation of the ability of antioxidants to counteract lipid oxidation: Existing methods, new trends and challenges. Prog. Lipid Res. 46: 244–282 **(2007)**

Résumé

Introduction. Le blé est une excellente source en fibres alimentaires de nature insolubles. Ces fibres sont principalement concentrées dans l'enveloppe du grain qui constitue le son de blé (sous-produit obtenu après le raffinage). **L'objectif.** Le but de cette étude est d'évaluer l'activité biologique du son de blé dur (Triticum durum) de trois variétés algériennes pour sa revalorisation dans la santé humaine. **Matériels et méthodes.** Une enquête sur l'utilisation du son de blé dur dans l'alimentation humaine a été réalisée dans la région de Sidi Bel Abbes auprès de 500 sujets. L'expérimentation a été porté sur trois variétés de blé dur (Triticum durum) : Siméto, Chen's et Vitron. La macération de la poudre du son de blé dur a été réalisée avec l'éthanol à 80%. La caractérisation chimique a été réalisée par des techniques spectrophotométriques pour les composées phénoliques, et de méthodes chimiques pour le dosage des fibres alimentaires. L'activité antioxydante a été testée par quatre méthodes : piégeage des radicaux libres avec DPPH, test de FRAP (Ferric Reducing Antioxydants Power), test de blanchissement du β-carotène et l'effet chélateur des ions ferreux (FIC), et l'effet antibactérien a été mesuré par la méthode des disques par diffusion sur milieu gélosé. **Résultats.** L'enquête a révélé que la grande proportion des sujets enquêtés (88%) n'utilise pas le son de blé dur dans l'alimentation, il est utilisé uniquement dans le traitement de quelque pathologies digestives et métaboliques sur recommandation des herboristes. Les échantillons de son de blé contiennent une quantité très importante de fibres alimentaires insolubles (39% MS) et la quantification des composés phénoliques a révélé que les extrais ont une concentration considérable de phénols totaux, flavonoïdes et des tanins condensée (1.678-1.817 mg EAG/g), (0.503-0.594 mg EC/g), (1.345-1.587 mg EC/g) respectivement, et possèdent une activité antioxydante très importante .Le pouvoir antioxydant avec le DPPH et le test de FRAP est moins important par rapport à celui du blanchissement du β-carotène et l'effet chélateur des ions ferreux (FIC), ces derniers donnent le même pourcentage d'activité que du standard. Les tests de l'activité antibactérienne ont révélé que les souches testées ne sont pas sensibles à nos extraits. **Conclusion.** Le son de blé dur est riche en fibres alimentaires et possède des activités antioxydantes très intéressantes et peut être revaloriser dans l'alimentation et la santé humaine.

Mots clés : son de blé, fibres alimentaires, composés phénoliques, activité biologique, revalorisation.