

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمّار تليدي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT
كلية العلوم
FACULTE DES SCIENCES
قسم علوم المادة
DEPARTEMENT Sciences de la Matière



Mémoire de Master

Domaine : Sciences de la Matière

Filière : Chimie

Option : Chimie organique

**Détermination de l'activité anti-oxydante des
extraits phénoliques des panicules de différentes
variétés de Sorghos (*Sorghum bicolor* L. Moench)**

Par :

Oulad Brahim Djihad

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

M. SAÏDAT BOUBAKEUR	Professeur	Président
M. DJERIDANE AMAR	Professeur	Examineur
M. KORIBA BAKHTI	MAA	Examineur
M. BENALIA MOHAMED	MCB	Encadreur
M. BELHADI BADREDDINE	MCA	Co- Encadreur

Année Universitaire 2022/2023

Remerciement

Loué soit Dieu, qui nous a éclairés sur le chemin de la connaissance et de la connaissance, et il n'est complet qu'avec sa grâce et son succès,

D'ici, j'ai le plaisir d'exprimer mes sincères remerciements, ma profonde gratitude, mon respect et mon appréciation à ceux qui j'ai accordé faveurs et conseils, et qui ont bien voulu accepter de transmettre le mémoire de Master, nos professeurs : Dr Belhadi Badreddine et Dr Benalia Mohamed, Nous adressons également nos sincères remerciements à Mme Hadbaoui Zineb, pour les conseils et l'aide qu'ils nous ont apportés,

Ainsi, j'ai adresse ma gratitude et mon honneur respect à :

- Monsieur **BOUBAKEUR SAÏDAT**, professeur à l'université de Laghouat, pour avoir accepté de présider le jury de notre mémoire. Nous aimerons le remercier.*
- Monsieur **AMAR DJERIDANE**, professeur à l'université de Laghouat, d'avoir accepté d'évaluer et examiner ce manuscrite de mémoire. Qu'elle trouve ici le témoignage de notre gratitude.*
- Monsieur **BAKHTI KORIBA**, professeur à l'université de Laghouat, d'avoir accepté d'évaluer et examiner ce manuscrite de mémoire. Qu'elle trouve ici le témoignage de notre gratitude.*

J'ai remercié toute l'équipe administrative et pédagogique du département des sciences de la matière de l'université Amar Thelidji et à tous ceux qui j'ai apporté leurs soutiens et encouragement durant la réalisation de ce travail.

Enfin, j'exprime ma grande gratitude à ma famille (Azzeddine, Abdelmoumin, Abdelkader et Iman), et plus particulièrement à mes parents pour leur soutien inconditionnel, leur amour et leurs encouragements tout au long de mes études.

Ouladbrahim DJihad.

Université de Laghouat Juin 2023

Dédicace

A mes très chers parents

A mes sœurs et mes frères

A ma famille

A mes professeurs

A tous mes amis fidèles.

Résumé

Au cours de ce travail, les composés phénoliques et leur activité antioxydante de différents extraits sous l'influence de quatre systèmes pour les variétés de plantes de sorgho a été testées.

Les résultats ont montré que la teneur en phénols totaux lors de l'extraction avec le Système 3 (acétone/eau) variait de 0.00 à 3.73 (mg TAE/g) dans la farine de sorgho, Cette teneur est beaucoup plus élevée que sa teneur lors de l'extraction avec le système (1,2,4), tandis que les tanins variaient de 0.32 à 18.42 (mg EC/g) avec le système 3. Les résultats ont également montré que la teneur en phénols du feuilles était deux fois plus élevé que son contenu dans la panicule et la tige, Alors que dans les tanins, il était élevé dans la tige par rapport aux feuilles et à la panicule.

Les résultats de l'étude de l'activité antioxydante de divers extraits phénoliques de farine de sorgho ont montré qu'elle a une grande capacité anti radicalaire les radicaux libres, ainsi qu'une capacité à réducteur les ions fer, notamment dans la variée S4B1.

Mots clés : sorgho, panicule, tige, feuilles, composés phénoliques, tanins, activité antioxydante du DPPH[·] et FRAP.

ملخص

خلال هذا العمل تم تقييم المركبات الفينولية واختبار نشاطها نشاط مضادات الأكسدة، من مستخلصات مختلفة تحت تأثير أربعة أنظمة لأصناف نبات الذرة الرفيعة.

أظهرت النتائج أن محتوى الفينولات الكلية أثناء الاستخلاص بالنظام 3 (أسيتون / ماء) تراوحت من 0.00 إلى 3.73 (مجم TAE / جم) في دقيق الذرة، هذا المحتوى أعلى بكثير من محتواه أثناء الاستخلاص بالنظام (1,2,4)، بينما تباين العفص من 0.32 إلى 18.42 (مجم EC / جم) بالنظام 3. وأظهرت النتائج أيضًا أن محتوى الفينول في كانت الأوراق أعلى بمرتين من محتواها في العناقيد والساق، بينما في العفص كانت عالية في الساق مقارنة بالأوراق وفي العناقيد.

أظهرت نتائج دراسة النشاط المضاد للأكسدة للمستخلصات الفينولية المختلفة لدقيق الذرة الرفيعة أن لها قدرة كبيرة على مقاومة الجذور الحرة، فضلاً عن قدرتها على تقليل أيونات الحديد، لا سيما في صنف S4B1.

الكلمات المفتاحية: الذرة الرفيعة، سنابل، ساق، أوراق، المركبات الفينولية، التانين، نشاط مضادات الأكسدة لـ DPPH وFRAP.

Abstract

During this work, the phenolic compounds and their antioxidant activity of different extracts under the influence of four systems for sorghum plant varieties were tested.

The results showed that the content of total phenols during extraction with System 3 (acetone/water) ranged from 0.00 to 3,73 (mg TAE/g) in flour of sorghum, this content is much higher than its content during extraction with the system (1,2,4), while the tannins varied from 0.32 to 18.42 (mg EC/g) with system 3. The results also showed that the phenol content in the leaves was twice as high as its content in the panicle and the stem, while in the tannins it was high in the stem compared to the leaves and in the stem, the panicle.

The results of the study of the antioxidant activity of various phenolic extracts of sorghum flour have shown that it has a great anti-radical capacity against free radicals, as well as an ability to reduce iron ions, in particular in the S4B1 variety.

Key words: sorghum, panicle, stem, leaves phenolic, compounds, tannins, antioxidant activity of DPPH[·] and FRAP.

Table des matières

Remerciement.....	II
DÉDICACE.....	III
RÉSUMÉ.....	IV
ملخص	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX	VIII
LISTES DES FIGURES.....	IX
ABRÉVIATIONS.....	X
I. INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	10
1. LE SORGHO.....	10
2. DESCRIPTION ET CLASSIFICATION BOTANIQUE.....	14
2.1 Caractéristiques Botaniques Du Sorgho.....	14
2.2 MORPHOLOGIE DU SORGHO	14
2.2.1 RACINES	18
2.2.2 TIGE.....	18
2.2.3 PÉDONCULE	18
2.2.4 FEUILLES.....	15
3. LES POLYPHÉNOLS.....	15
3. LES TANINS CONDENSÉS	15
4. L'ACTIVITE ANTIOXYDANTE.....	22
II. MATERIEL ET METHODE.....	17
1. MATERIEL.....	17
1.1 PRODUITS CHIMIQUES	17
1.2 LA MATIERE VEGETALE	17
2. METHODES	17
2.1 EXTRACTION DES COMPOSES PHENOLIQUES	17
2.2 DOSAGE DES POLYPHENOLS TOTAUX.....	19
2.3 DOSAGE DES TANINS CONDENSES	20
2.4 ÉVALUATION DE L'ACTIVITE ANTI-OXYDANTE PAR LE TEST DU DPPH.	20
2.5 POUVOIR REDUCTEUR (FRAP, FERRIC REDUCING ANTIOXYDANT POWER).....	21
III. RESULTATS ET DISCUSSION	23
3.1 EXTRACTIONS DES COMPOSES PHÉNOLIQUES.....	24
3.2 ANALYSES PHYTOCHIMIQUES DES EXTRAITS	24
3.2.1 DOSAGE DES PHÉNOLS TOTAUX.....	26
3.2.2 DOSAGE DES TANINS CONDENSÉS	27
3.2.3 DÉTERMINATION DE L'ACTIVITÉ ANTIOXYDANTE DPPH	287
3.2.4 DÉTERMINATION DU POUVOIR RÉDUCTEUR DES IONS DE FER FRAP	28
3.2.5 COMPARAISON DES RÉSULTATS	29
3.3 ETUDE STATISTIQUE	31
3.3.1 INFLUENCE DU SYSTÈME D'EXTRACTION.....	30
3.3.2 INFLUENCE DE DIFFÉRENTES PARTIES DE LA PLANTE DU SORGHO.....	32

3.3.3 INFLUENCE DES VARIETES DU SORGHO LOCALE	32
3.3.4 CORRELATION DE PERSON	33
IV. CONCLUSION GENERALE	34
RÉFÉRENCES	38
ANNEXES:	39

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 Production de sorgho (source ICRISAT-FAO, 1996, FAO, 1998)	14
Tableau 1. 2 Classification du sorgho [22].....	14
Tableau 2. 1 Codes des cultivars de sorgho.....	14
Tableau 3. 1 : Étude statistique globale de la teneur en phénols totaux, tanins condensés, activité antioxydante DPPH et capacité de réduction des FRAP du sorgho.	25
Tableau 3. 2 Comparaison des résultats d'analyse	30
Tableau 3. 3: Résultats quantitatifs des phénols totaux, des tanins, de l'activité antioxydante DPPH et de la capacité de réductrice FRAP dans quatre systèmes d'extraction différents.	31
Tableau 3.4 : Résultats quantitatifs des phénols totaux, des tanins, de l'activité antioxydante DPPH et de la capacité de réduction FRAP dans les parties végétales (panicule, feuilles, tige).	32
Tableau 3. 5 : Résultats quantitatifs des phénols totaux, des tanins, de l'activité antioxydant DPPH et de la capacité de réduction FRAP dans les variétés végétales (S1, S2, S3),	33
Tableau 3. 6 Coefficient de corrélation de Pearson entre quantités des phénols totaux, quantités en tanins et activités antioxydantes (DPPH, FRAP)	34

Listes des figures

Figure 1. 1 : Plant de sorgho avec ces différentes parties (TROUCHE G. et CHANTEREAU J., 2009) [23]	15
Figure 2. 1 : Parties de la plante de sorgho après séchage (A : panicule, B : tiges, C : feuilles).....	19
Figure 2. 2 : Extraction des polyphénols par ultrasonique	19
Figure 2. 3 : réduction du radical libre DPPH.....	21
Figure 2. 4 : Mécanisme réactionnel intervenant lors du test FRAP entre le complexe	23
Figure 3. 1 : Image représentative des différents extraits phénoliques	24
Figure 3. 2 : Courbe d'étalonnage de la catéchine.	24
Figure 3. 3 : Variation des pouvoirs anti-radicalaires (PAR%) en fonction de la concentration de la vitamine C.....	24
Figure 3. 4 : Courbe standard de l'acide ascorbique en phase complète	24
Figure 3. 5 : Variation des pouvoirs réducteurs (PCR%) en fonction de la concentration de la vitamine C. ...	24

Abréviations

MeOH : Méthanol

Ac/H₂O : Acétone / l'eau

Me/H₂O : Methanol/ / l'eau

Na₂CO₃ : Carbonate de sodium

ATC : Acide trichloracétique

DPPH : 1,1-diphényl 2- picrylhydrazyl

FRAP : Test de la résilience des ions de fer

EC : Equivalents de quercétine

EAT : Equivalent d'acide tannique

VCEAC : Pouvoir antioxydant équivalent à l'acide ascorbique

MV: Matière sèche végétal

(%) **PAR** : Pourcentage antiradiclaire

(%) **PCR** : Pourcentage de la capacité de réducteur

UV : Ultra-Violet

ANOVA : Analyse de la variance

I. Introduction générale

1. Le sorgho

Le sorgho (*Sorghum bicolor* L, Moench) a été cultivé pour l'alimentation humaine et animale en Amérique, en Asie, en Australie et en Afrique. Cette céréale est considérée comme la cinquième céréale la plus produite au monde après le blé, le riz, le maïs et l'orge [1, 2]. C'est une culture d'une grande importance, en raison de sa capacité à pousser dans les régions semi-arides tropicales et subtropicales du monde où les précipitations sont insuffisantes et les températures élevées prédominent, où d'autres céréales ont du mal à pousser. De plus, l'introduction du sorgho se traduit par un allongement des rotations. Car le sorgho est une « vraie » culture de printemps, qui est semée tardivement (mi-mai) contrairement aux orges de printemps ou pois protéagineux qui sont semés en février [3, 4].

Les grains de sorgho jouent un rôle important, voire primordial, dans l'alimentation des habitants des régions semi-arides d'Afrique et d'Asie car ils constituent leur principale source d'énergie, de protéines, de vitamines et de minéraux, surtout pour les plus pauvres. Par contre dans les pays industrialisés, il est utilisé sous forme de grains ou de fourrage dans l'alimentation des animaux et pour la production de bioéthanol. La demande en sorgho augmente de plus en plus dans de nombreux pays en développement et particulièrement en Afrique de l'Ouest. Cela est lié d'une part à la croissance démographique et d'autre part, à la politique de ces pays qui visent à développer l'exploitation industrielle du sorgho en remplacement au malt d'orge [3, 5].

On peut distinguer deux groupes de pays producteurs, selon le mode de gestion de la culture ainsi que les utilisations principales. Un premier groupe, qui applique un système de culture intensif combinant semences hybrides, intrants et parfois la gestion de l'eau, obtient des rendements de l'ordre de 3 à 5 tonnes/ha et utilise le sorgho essentiellement pour l'alimentation animale. Il s'agit de l'ensemble des pays développés concernés par la culture (Etats-Unis, Australie, Europe méditerranéenne) ainsi que quelques pays en développement (Chine, Argentine, Mexique, Afrique du Sud), Dans les deux cas, les rendements moyens restent assez faibles (Tableau 1.1) [5].

Tableau 1. 1 Production de sorgho (source ICRISAT-FAO, 1996, FAO, 1998)

(millions de t)	1979/81 Moyenne	1992/94 Moyenne	1996	1997
Monde	65.50	63.90	70.67	63.76
Etats-Unis	19.16	17.50	20.40	16.70
Mexique	4.99	4.38	4.82	6.28
Argentine	5.64	2.60	2.13	2.50
Afrique	12.44	17.47	20.71	19.37
Nigéria	3.30	6.10	7.08	7.30
Soudan	2.27	3.32	4.18	3.37
Burkina Faso	0.62	1.25	1.27	0.94
Asie	19.69	17.98	18.30	15.13
Inde	11.38	11.23	11.50	9.00
Chine	7.03	5.61	5.75	5.07
Union Europ.	0.59	0.70	0.60	0.69
Australie	1.08	0.98	1.59	1.01

Actuellement avec l'amélioration en sélection, le nombre de variétés de sorgho identifiées se chiffre à plus de 7 000. Ces variétés diffèrent par les caractéristiques des grains comme le poids, la présence ou l'absence de testa, la couleur de l'endosperme, la teneur en composés phénoliques [3]. La composition chimique du sorgho est très similaire à celle du maïs et du millet dont les composants essentiels sont l'amidon, les graisses, les protéines et les polysaccharides non amyliques, c'est aussi une source de nutriments bioactifs comme la vitamine B, les vitamines liposolubles (D, E, K), les micro et macronutriments, ainsi que les non-nutriments, par exemple les caroténoïdes et les polyphénols [6]. La plus forte concentration de composés phytochimiques dans les grains de sorgho se trouve principalement dans le son et le germe [7]. Les polyphénols dans le sorgho sont présents sous forme d'acides phénoliques, de flavonoïdes et de tanins condensés. Les tanins condensés sont fréquents dans le sorgho avec testa pigmenté et ces composés dans le sorgho sont ceux qui ont des niveaux plus élevés d'antioxydants que dans toute autre céréale [8]. Les grains entiers de sorgho ont des avantages clés pour la santé, tels que l'activité de piégeage des radicaux libres, qui est associée à des propriétés antimicrobiennes, à une réduction du stress oxydatif, à une activité anti-inflammatoire et anticancéreuse [9].

En Afrique et en Inde, une partie importante est destinée à la consommation humaine car elle constitue d'une source essentielle de vitamines, de minéraux, de protéines et d'énergie dans l'alimentation d'une grande partie de la population [10]. Comme il s'agit d'une céréale sans gluten et qu'elle est une bonne source de vitamines B, de minéraux et de glucides, elle fournit une solution dans les aliments et les boissons pour les personnes atteintes de la maladie cœliaque [11]. Cependant, dans les aliments, l'utilisation du sorgho a été limitée, sauf pour les aliments considérés comme traditionnels en raison de sa faible digestibilité [12]. De même, l'utilisation du sorgho pour améliorer la valeur nutritionnelle des aliments est réduite, en raison de la présence de tanins (substances phénoliques), qui sont considérés comme responsables de la diminution de la disponibilité des minéraux, de la faible digestibilité des protéines et de l'amidon [13]. Pour améliorer les propriétés organoleptiques, nutritionnelles et antioxydantes, avant de consommer des grains de sorgho, ils doivent être transformés, certaines méthodes incluent la cuisson, la germination et la fermentation [14].


Actuellement, la culture du sorgho locale reste traditionnelle et faible en attendant de mieux valoriser ces céréalicultures en trouvant de nouveaux débouchés qu'ils soient liés aux fourrages, aux grains dans l'alimentation humaine et animale. Ce qui aura pour conséquence d'encourager et intensifier ce type de céréaliculture afin d'assurer un développement socioéconomique des régions arides et hyper arides de notre pays, de diversifier nos agro-ressources et de réduire les importations des produits agricole et alimentaires (céréales, semences de fourrages et de céréales.....).

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, Ils appartiennent à leur métabolisme secondaire et participent à leur défense contre les agressions environnementales. C'est une classe constituée d'environ 8 000 composés, divisés en plusieurs catégories qui sont les acides phénoliques, les flavonoïdes, les tanins issus de la polymérisation des flavonoïdes et les acide phénoliques, les lignanes qui, avec les isoflavones, sont nommées phyto-œstrogènes [15]. Ils sont présents dans toutes les parties des végétaux (racines, tiges, feuilles, fleurs, pollens, fruits, graines et bois) et sont impliqués dans de nombreux processus physiologiques comme la croissance cellulaire, la rhizogenèse, la germination des graines ou la maturation des fruits [16].

2. Description et Classification Botanique

2.1 Caractéristiques botaniques du Sorgho

Tableau 1. 2 Classification du sorgho [17]

Nom scientifique	Sorgho bicolore (L)	
Régne	Plante	
Classe	Liliopsida	
L'ordre	Cyperales	
Tribu	Andropogoneae	
Famille	Poaceae	
Specier	Sorghum bicolor (L)	
Races	Bicolor, vulgare, campatum, kafir, guinea durra	
الاسم العربي	الذرة الرفيعة	

2.2 Morphologie du Sorgho

Plante herbacée, le sorgho peut avoir une hauteur de 0,5 à 6 m selon les variétés. La tige est généralement unique (pas de talle), cependant des talles peuvent se développer chez certaines variétés (Figure 1.1).

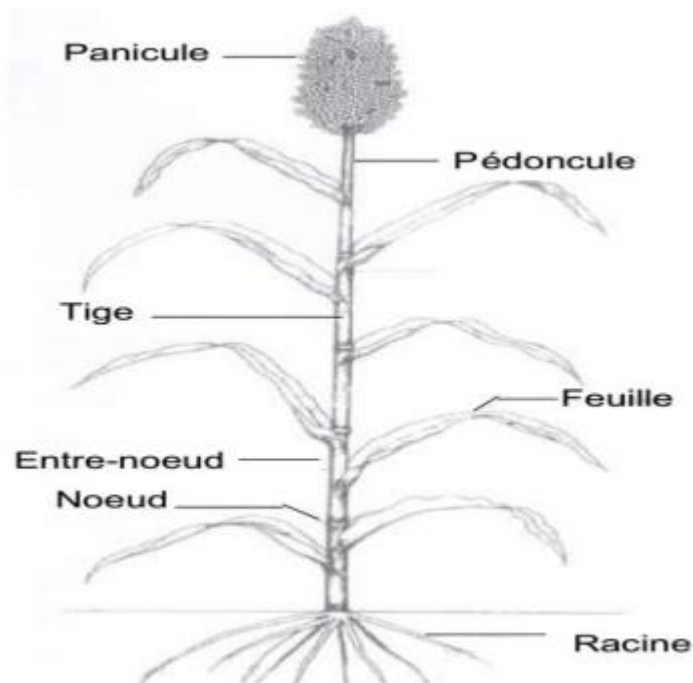


Figure 1. 1 : Plant de sorgho avec ces différentes parties (TROUCHE G. et CHANTEREAU J., 2009) [18].

2.2.1 Racines

Le système racinaire du sorgho est de type fasciculé, bien ramifié et très puissant, 90 % de la masse racinaire se situe dans l'horizon de la surface. Les racines peuvent s'enfoncer à une profondeur de 2 à 3 mètres et s'étendre latéralement sur 60 à 150 cm [18].

2.2.2 Tige

La tige ou chaume est cylindrique, droite, divisée sur sa longueur en entre-nœuds et des nœuds à nombre variable. Elle est remplie de parenchyme lâche vert ou coloré par l'anthocyane en rose ou rouge et couverte d'une cire de diamètre compris entre 5 et 40 mm [18].

2.2.3 Pédoncule

L'entre-nœud supérieur qui porte l'inflorescence est appelé pédoncule. Il est généralement droit mais peut être aussi courbé [18].

2.2.4 Feuilles

Les feuilles sont distribuées de façon alternée le long de la tige. Selon les cultivars et les conditions du milieu, leur nombre varie de 7 à 40. Elles se composent d'un faux limbe de 30 cm à 135 cm de long sur 1,5 à 13 cm de large et d'une gaine.

3. Les polyphénols

Les polyphénols sont aussi des substances ayant des propriétés antioxydantes très importantes, permettant de lutter contre la formation de radicaux libres en excès dans l'organisme (substances qui vont favoriser le vieillissement cellulaire), ils possèdent des propriétés bénéfiques pour la santé [19].

Les polyphénols présentent des propriétés antioxydantes bien établies et en lien avec l'inhibition de l'oxydation aussi bien dans le domaine alimentaire (oxydation des lipides) que physiologique (stress oxydant), Ces antioxydants agissent en bloquant ou inhibant à la fois la formation et la propagation des radicaux libres [20]. Ces substances suscitent beaucoup d'intérêts dans plusieurs domaines, celui de la nutrition par leur caractère préventif à l'égard de diverses maladies citées précédemment, en cosmétologie et surtout dans les industries agroalimentaires par leurs implications, en particulier, sur la valeur des aliments et leur incidence sur la conservation des produits alimentaires, Ainsi, ils pourraient constituer une alternative à l'utilisation des additifs alimentaires synthétiques, buthylhydroxyanisol (BHA) et buthylhydroxytoluène (BHT), qui ont montré des effets nuisibles (effet carcinogène) [21].

3. Les tanins condensés

Contrairement aux tanins hydrolysables qui sont des dérivés de l'acide gallique, les tanins condensés ne possèdent pas de sucre dans leurs molécules et leurs structures sont voisines de celles des flavonoïdes. Les tanins condensés (ou proanthocyanidines) sont des oligomères hétérogènes dont la structure est liée aux flavan 3-olset flavan 3,4- diols, les unités de monomères sont principalement liées par des liaisons C-C entre les carbones 4-6 ou 4-8 (proanthocyanidine type B). Les tanins condensés sont distingués en procyanidine (dérivé de catéchine, épicatechine et leurs esters galliques) et en prodelphinidines (dérivés de gallocatéchine, épigallocatéchine et leurs esters galliques) [22, 23].

4. L'activité antioxydante

L'activité antioxydante des polyphénols peut être évaluée *in vitro* et *in vivo* au moyen de simples expériences, et en même temps, l'éventuel effet pro-oxydant sur différentes molécules peut être

évalué, L'activité antioxydante ne peut pas être mesurée directement, mais elle est déterminée par les effets de l'antioxydant pour contrôler le degré d'oxydation. Il existe diverses méthodes pour évaluer l'activité antioxydante. Certaines méthodes impliquent une étape d'oxydation différente suivie par la mesure de la réponse, qui dépend de la méthode utilisée pour évaluer l'activité [24].

L'objectif général de mon travail est donc d'estimer les teneurs en composés phénoliques présents dans les différentes parties (panicules égrenées, tiges et feuilles) de trois cultivars de plants de sorgho cultivés à Bordj Bou Arreridj, obtenus à travers quatre systèmes d'extraction différents et aussi d'évaluer leurs pouvoirs antioxydantes à savoir le piégeage du radical libre DPPH et de réduire le fer (III) (FRAP).

Notre manuscrit commence par une première partie bibliographique qui traite des généralités sur le sorgho et les composés phénoliques, la deuxième partie expérimentale dont matériel et méthodes, résultats et discussion. Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale qui résume l'essentiel des résultats obtenus lors de ce travail et énonce par la suite des recommandations pour la suite de ce dernier.

II. Matériel et méthode

1. Matériel

1.1 Produits chimiques

Les produits chimiques utilisés dans ce travail, sont d'un grade analytique élevé : Acétone, acide gallique, Carbonate de sodium, Catéchine, acide tannique, vanilline, hydroxyde de sodium, méthanol, nitrite de sodium, quercétine, réactif de folin ciocalteu, 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyl (DPPH[•]), acide ascorbique (vitamine C), ferricyanure de potassium ($K_3Fe(CN)_6$), trichlorure de fer ($FeCl_3$)- hydrogénophosphate de potassium (K_2HPO_4) ont été amenés de Sigma-Aldrich, Tandis que le trichlorure acide (TCA), le chloroforme et l'acide chloridrique (HCl) ont été amené de la firme BIOCHEM-Chemopharma,

1.2 La matière végétale

Les variétés de sorgho (*Sorghum bicolor L, Moench*) utilisées dans cette étude ont été collectées de la wilaya de Bordj Bou Arreridj en 2022.

La matière végétale a été séparée en trois parties: les panicules égrenées, les tiges et les feuilles, Chaque partie a été conservée séparément dans des sacs en papier jusqu'au moment de leurs utilisations.

Dans un souci de simplicité nous donnons des codes à nos variétés (tableau 2.1) : PS (panicule de sorgho), TS (tiges de sorgho), FS (feuilles de sorgho), réparties sur trois variétés (1,2 et 3).

Tableau 2. 1 Codes des cultivars de sorgho

	Panicule (A)	Tige (B)	Feuille (C)
Variété 1	PS ₁	TS ₁	FS ₁
Variété 2	PS ₂	TS ₂	FS ₂
Variété 3	PS ₃	TS ₃	FS ₃

2. Méthodes

2.1 Extraction des composés phénoliques

Toutes les parties de la plante de sorgho ont été séchées à l'air à l'ombre à température ambiante (Figure 2.1).

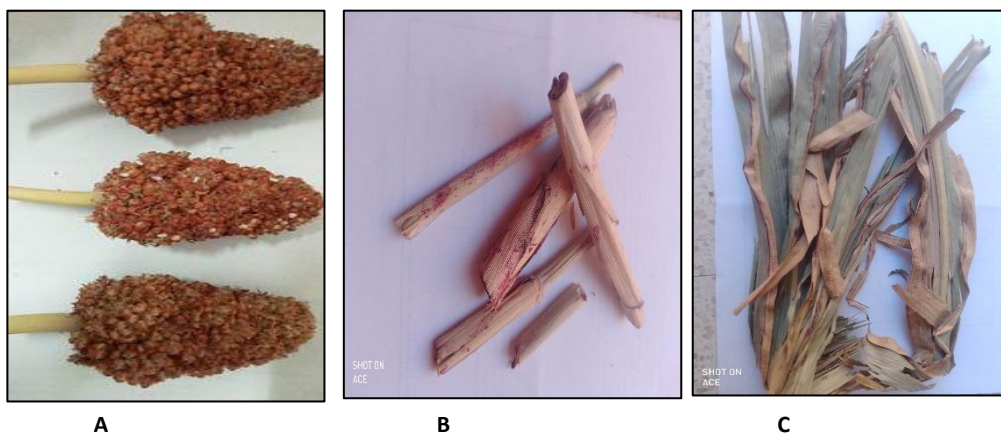


Figure 2. 1 : Parties de la plante de sorgho après séchage (A : panicule, B : tiges, C : feuilles)

Pour extraire les composés phénoliques, nous avons utilisé quatre systèmes de solvants de polarité différente : **Méthanol**, (**Méthanol/Eau**) d'un rapport de (8/2 : v/v), **Acétone** et (**Acétone/Eau**) d'un rapport de (7/3 : v/v), Nous avons adopté la méthodologie d'extraction des composés phénoliques décrite par M,J,Amiot [25].

1g de la poudre de la matière végétale ainsi obtenue à partir d'un broyage fin avec un moulin électrique est mis en contact avec 10 ml de chaque solvant/ou mélange de solvants dans le but d'extraire les composés phénoliques à travers un appareil ultrasons à température ambiante pendant 45 minutes (Figure 2.2). Après filtration, puis évaporation du/ou des solvant(s) à l'étuve (45°C) pendant 24 heures Le résidu est repris dans 5 ml de méthanol pur et conservé à 6°C donnant l'extrait phénolique purifié, jusqu'à leur analyse.



Figure 2. 2 : Extraction des polyphénols par ultrasonique

2.2 Dosage des polyphénols totaux

Le réactif de Folin-ciocalteu constitué d'acide phosphotungstique et phosphomolybdique, réagit en milieu alcalin avec les phénols pour donner un mélange d'oxydes tungstène et de molybdène de couleur bleue. Cette coloration est proportionnelle à la quantité de phénols et absorbe à une longueur d'onde de 760 nm [26].

Pour la réalisation de la courbe d'étalonnage, différentes concentrations de l'acide tannique allant de 0,06 à 0,3 mg/ml ont été préparées, Par la suite, un volume de 500 µl du réactif de Folin-Ciocalteu (dilué 10 fois par l'eau distillé) est mélangé avec 100 µl de chaque solution préparée et après 2 min, 2ml de bicarbonate de sodium Na₂CO₃ (2%, m/v) ont été ajouté au mélange. Le tout est laissé réagir pendant 30 min à l'obscurité, La lecture de l'absorbance est effectuée à 760 nm par spectrophotomètre UV/Vis (SP-3000nano), contre un blanc et les résultats ainsi obtenus ont permis de tracer la courbe d'étalonnage de l'acide tannique, Les extraits des échantillons ont été traités selon les étapes du protocole suivi lors de la préparation de la courbe d'étalonnage de l'acide tannique. Les teneurs en phénols totaux sont exprimées en (mg EAT/g de MV), Toutes les mesures ont été effectuées trois fois, et la lecture moyenne a été enregistrée.

Les concentrations « C (mg/ml)» en composés phénoliques totaux sont calculés par la formule suivante :

$$C(\text{mg / ml}) = \frac{(A - A_c)}{B}$$

A : l'absorbance de l'échantillon ; A_c : l'absorbance de la correction (couleur de la solution de folin), B : la pente de la courbe.

Tandis que, Les teneurs « m » (mgTAE/g matière végétale) en composés phénoliques totaux sont calculés par la formule suivante :

$$(\text{mgTAE / g}) = C(\text{mg / ml}) * \frac{V_e}{m} * \frac{1}{f}$$

m : masse de l'échantillon (g) ; 1/f : facteur de dilution et V_e : volume d'extrait (ml).

2.3 Dosage des tanins condensés

Ce test est basé sur la condensation des composés polyphénoliques avec la vanilline en milieu acide, il est spécifique des flavones3-ols [27].

100 µl d'extraits sont mélangés avec 1 ml d'un mélange vanilline/acide chlorhydrique [mélange à volume égal de 1 % de vanilline et 8 % d'HCl (Sigma-Aldrich, Germany) dans le méthanol] dans des tubes à essais, les tubes sont placés dans un bain marie pendant 20 min à 30°C, la lecture de l'absorbance a été faite à 500 nm par spectrophotomètre UV/Vis (SP-3000nano) contre un blanc. Différentes concentrations allant de 0,6 à 4 mg/ml ont été préparées à partir d'une solution mère de la catéchine, permettront de tracer la courbe d'étalonnage, Les teneurs en tanins sont exprimées en mg équivalent de catéchine par g de matière sèche (mg EC/g de MS). Toutes les mesures ont été effectuées trois fois, et les lectures moyennes ont été enregistrées.

2.4 Évaluation de l'activité anti-oxydante par le test du DPPH[•]

Pour étudier l'activité antiradicalaire des différents extraits, nous avons adopté le test du DPPH[•] à cause de sa simplicité dans l'analyse, Le 1,1-diphényl-2-picrylhydrazyle (DPPH[•]) est un radical stable et présente une absorption spécifique à 517 nm qui lui confère une couleur violette (figure 2.3) [28].

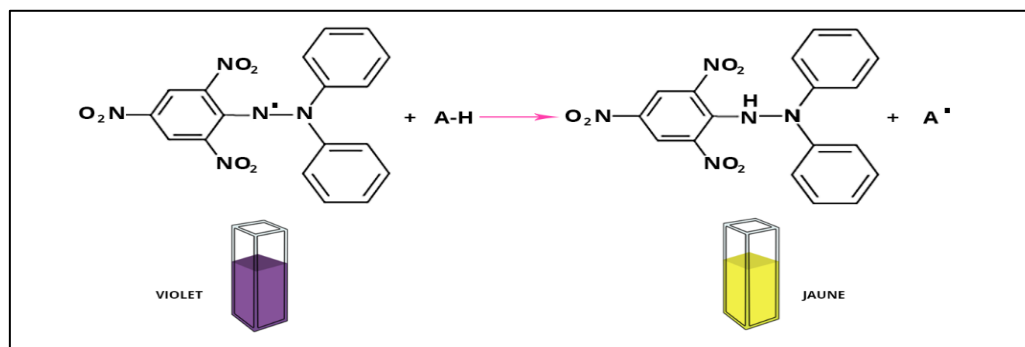


Figure 2. 3 : réduction du radical libre DPPH.

L'activité antioxydante est déterminée par la diminution de l'absorbance d'une solution alcoolique de DPPH[•] qui est due à sa réduction en forme non radicalaire DPPH-H par les antioxydants (AH)

donneurs d'hydrogènes présents dans l'extrait végétal ou par une autre espèce radicalaire (Figure 2.3) [29].

A l'aide de la courbe d'étalonnage de la vitamine C, nous avons évalué l'activité antioxydante des différents extraits. La capacité antiradicalaire est exprimée par le VCEAC ($\mu\text{g EVC/g de MV}$), définie comme la concentration en (g/l)/ou (mol/l), d'une solution de la vitamine C ayant la même capacité antioxydante d'une solution de 1(g/l)/ou (1 M) de l'extrait étudié.

1 ml de chaque solution/ou extrait a été additionné à 1 ml d'une solution méthanolique de DPPH (100 μM). Le mélange réactionnel a été secoué immédiatement au vortex puis maintenu à l'obscurité pendant 30 min à une température ambiante pour que la réaction s'accomplisse, L'absorbance du milieu réactionnel a été mesurée à 517 nm contre un blanc par spectrophotomètre UV/Vis (SP-3000nano). Toutes les mesures ont été effectuées en triple.

Les pouvoirs anti-radicalaires (PAR %) du radical DPPH sont déterminés selon la formule suivante:

$$\text{PAR}(\%) = \left(\frac{A_0 - A_e}{A_0} \right) * 100$$

Les teneurs ont été calculés par la formule suivante :

$$C(\text{mg / g}) = \frac{\text{PAR}(\%)}{B} * \frac{V_e}{m} * \frac{1}{f}$$

A₀ : absorbance du contrôle (100 μl de méthanol et 1000 μl de DPPH) ;

A_e : absorbance de l'échantillon ;

m : masse de l'échantillon (g) ;

1/f : facteur de dilution ;

V_e : volume d'extrait (ml).

2.5 Pouvoir réducteur (FRAP, Ferric Reducing Antioxydant Power)

La méthode FRAP est basée sur la réduction de l'ion ferrique (Fe^{3+}) en ion ferreux (Fe^{2+}) (Figure 2.4). Cette méthode évalue le pouvoir réducteur des composés actifs. La présence des réducteurs (AH) dans les extraits des plantes provoque la réduction de Fe^{3+} /complexe ferricyanide à la forme ferreux. Par conséquent, le fer ferreux (Fe^{2+}) peut être évalué en mesurant et en surveillant

l'augmentation de la densité de la couleur bleu cyanée dans le milieu réactionnel à 700 nm [29]. En effet, le système $\text{FeCl}_3/\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$, confère à la méthode la sensibilité pour la détermination «semi quantitative» des concentrations des antioxydants, qui participent à la réaction redox [30].

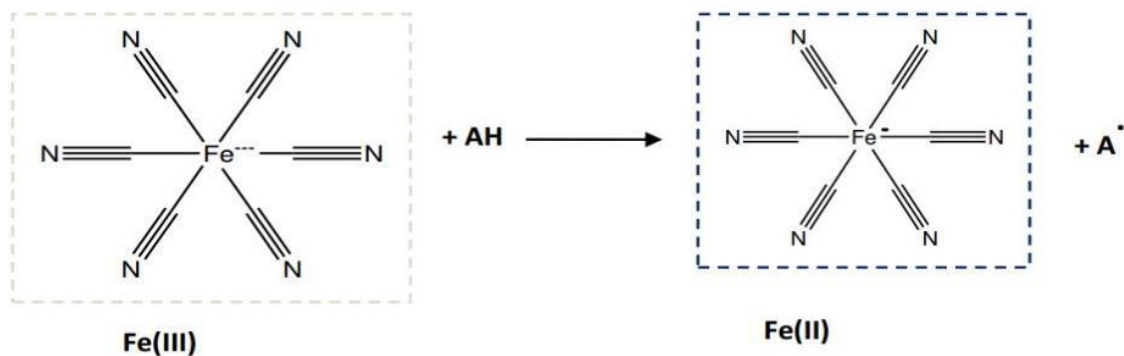


Figure 2. 4 : Mécanisme réactionnel intervenant lors du test FRAP entre le complexe ferricyanide ferrique Fe (III) et un antioxydant (AH).

Les pouvoirs de la capacité de réducteur (PCR %) du FRAP sont déterminés selon la formule suivante:

$$PCR = \frac{A_e}{A_0} * 100$$

Les teneurs ont été calculés par la formule suivante :

$$C(\text{mg} / \text{g}) = \frac{PCR(\%)}{B} * \frac{V_e}{m} * \frac{1}{f}$$

A₀ : absorbance du contrôle ;

A_e : absorbance de l'échantillon ;

m : masse de l'échantillon (g) ;

1/f : facteur de dilution ;

V_e : volume d'extrait (ml).

B : pente

III. Résultats et discussion

3.1 Extractions des composés phénoliques

L'extraction des composés polyphénoliques est une étape cruciale pour la valorisation de ces principes actifs, elle dépend de la méthode et du solvant approprié qui préservent leurs propriétés biologiques.

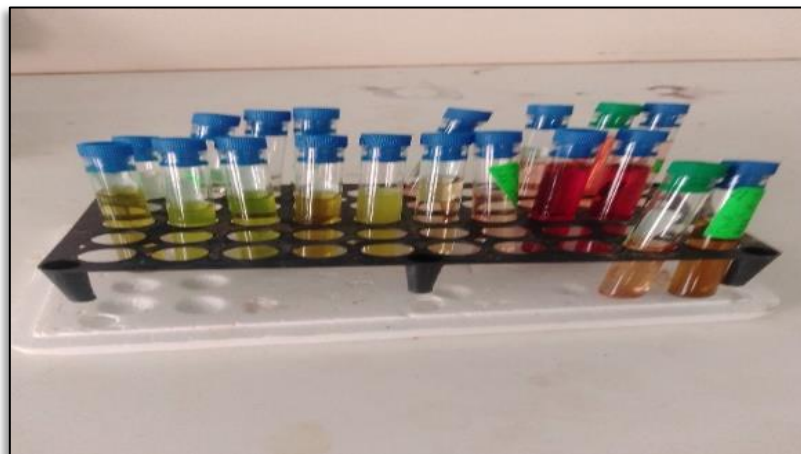


Figure 3. 1 : Image représentative des différents extraits phénoliques

L'extraction est effectuée par quatre différents système d'extraction par ultrason : méthanolique, hydro-méthanolique, système acétoïque et hydro-acétonique. Le travail consiste à évaluer 36 les extraits obtenus en termes de quantité de phénols totaux, tanins condensés et les propriétés antioxydantes (Figure 3.1).

3.2 Analyses phytochimiques des extraits

Les analyses quantitatives des phénols totaux, des tannins et les analyse de propriétés des antioxydants par la méthode de DPPH et FRAP sont déterminées à partir des équations de la régression linéaire de chaque courbe d'étalonnage exprimées successivement en mg équivalent de l'acide tannique, en mg équivalent de la catéchine et mg équivalent de la vitamine C par g de la matière végétale, respectivement (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 : Étude statistique globale de la teneur en phénols totaux, tanins condensés, activité antioxydante DPPH et capacité de réduction des FRAP du sorgho.

Échantillon	Système	P T (mg TAE /g)	Tanins (mg EC /g)	FRAP(mg/g)	DPPH(mg/g)
PS4B1	Me/H ₂ O	2,33±0,28	6,80±0,02	1,60±0,01	4,64±0,29
TS4B1	Acéton	0,03±0,03	0,55±0,17	0,14±0,01	0,12±0,00
PS4B1	MeOH	1,13±0,16	3,23±0,23	0,97±0,04	1,06±0,07
PS1B2	Acéton	0,50±0,01	0,47±0,21	0,12±0,05	0,20±0,01
FS4B1	Acéton	1,29±0,16	5,49±0,61	0,38±0,08	1,63±0,23
FS1B2	Ac/H ₂ O	2,52±0,52	4,04±0,15	0,91±0,06	1,26±0,10
TS4B1	Ac/H ₂ O	1,49±0,09	4,52±2,02	0,48±0,07	0,63±0,06
FS4B1	Me/H ₂ O	1,40±0,03	2,15±0,04	1,15±0,03	2,37±0,13
PS1B2	Ac/H ₂ O	0,47±0,03	7,94±10,47	0,04±0,01	0,00±0,00
TS2B2	Ac/H ₂ O	0,42±0,07	9,48±9,90	0,63±0,00	1,18±0,15
FS2B2	Ac/H ₂ O	2,47±0,39	1,49±0,10	0,71±0,12	2,34±0,01
FS4B1	Ac/H ₂ O	3,43±0,12	7,16±0,61	2,11±0,18	11,08±0,28
FS2B2	MeOH	0,97±0,06	1,98±0,89	0,56±0,05	0,29±0,02
PS4B1	Ac/H ₂ O	2,28±0,02	7,61±0,48	1,44±0,05	6,51±0,60
TS4B1	Me/H ₂ O	1,18±0,16	6,76±0,76	0,52±0,01	0,57±0,08
FS1B2	Me/H ₂ O	1,54±0,16	3,03±0,10	0,73±0,09	1,18±0,25
PS2B2	Ac/H ₂ O	0,33±0,02	0,82±0,13	0,29±0,08	0,13±0,00
FS2B2	Me/H ₂ O	1,43±0,06	1,23±0,13	1,30±0,21	0,75±0,19
PS1B2	Me/H ₂ O	0,54±0,00	1,52±0,10	0,39±0,05	0,19±0,02
PS2B2	Me/H ₂ O	0,40±0,01	2,02±0,57	0,24±0,04	0,09±0,00
TS4B1	MeOH	1,34±0,01	5,21±0,67	0,92±0,06	0,65±0,03
TS1B2	Me/H ₂ O	1,49±0,04	11,27±0,13	0,91±0,00	1,19±0,09
FS1B2	MeOH	0,81±0,04	1,99±0,19	0,89±0,04	0,68±0,00
TS2B2	Me/H ₂ O	1,32±0,06	10,65±2,99	0,92±0,06	0,50±0,10
TS1B2	Ac/H ₂ O	2,08±0,10	16,84±2,23	0,23±0,03	1,42±0,04
TS1B2	MeOH	1,84±0,19	17,11±1,24	1,80±0,11	0,77±0,27

TS2B2	MeOH	1,32±0,03	12,04±0,19	0,89±0,13	0,93±0,01
PS1B2	MeOH	1,33±0,07	3,18±1,03	0,86±0,10	3,62±0,05
FS4B1	MeOH	2,20±0,70	5,14±0,38	1,18±0,07	9,11±0,35
FS1B2	Acéton	0,00±0,00	1,40±1,52	1,28±0,24	0,19±0,03
PS4B1	Acéton	0,03±0,02	0,35±0,04	0,10±0,02	0,00±0,01
FS2B2	Acéton	0,81±0,62	3,08±0,59	0,46±0,04	0,34±0,03
TS2B2	Acéton	0,16±0,02	1,43±0,15	0,17±0,10	0,17±0,03
PS2B2	Acéton	0,05±0,03	1,63±0,97	0,00±0,00	0,00±0,01
PS2B2	MeOH	0,01±0,00	1,83±0,72	0,17±0,01	0,00±0,00
TS1B2	Acéton	0,25±0,01	2,17±0,13	0,22±0,04	0,27±0,02
minimum		0,00	0,32	0,06	0,03
Maximum		3,73	18,42	2,23	11,27
Moyenne		1,24	4,82	0,71	1,56
Variance		0,83	22,39	0,28	6,25

Phénols totaux (mg EAT/g MV) ; **Tanins** (mg EC/g MV) et **VCEAC** (mg VC/g MV).

3.2.1 Dosage des phénols totaux

Les calculs sont effectués à partir de la courbe d'étalonnage de l'acide tanique (Figure 3.1) et les résultats de l'analyse spectrophotométrique de la teneur en polyphénols totaux pour les trois variétés du sorgho, sont indiqués dans le tableau 3.1.

Les résultats de l'analyse quantitative sont enregistrés dans le tableau 3.1. La teneur moyenne en phénols totaux dans les différentes parties de sorgho issue par les quatre systèmes d'extraction est de 1,24 mg EAT/g, où leur valeur variait entre 0,00 et 3,73 mg EAT/g MV, avec une dispersion de (0,91 mg EAT /g).

Il faut noter que les extraits phénoliques des tourteaux des différentes parties de sorgho (panicules égrenées, tiges et feuilles) ne contiennent pas des flavonoïdes. Ce résultat a été confirmé par un test qualitatif où nous n'avons pas enregistré un spectre UV caractéristique des flavonoïdes (la seule bande enregistrée dans ces spectres est égale à 320 nm alors que les flavonoïdes sont caractérisés par deux bandes d'absorptions à 250 et 350nm).

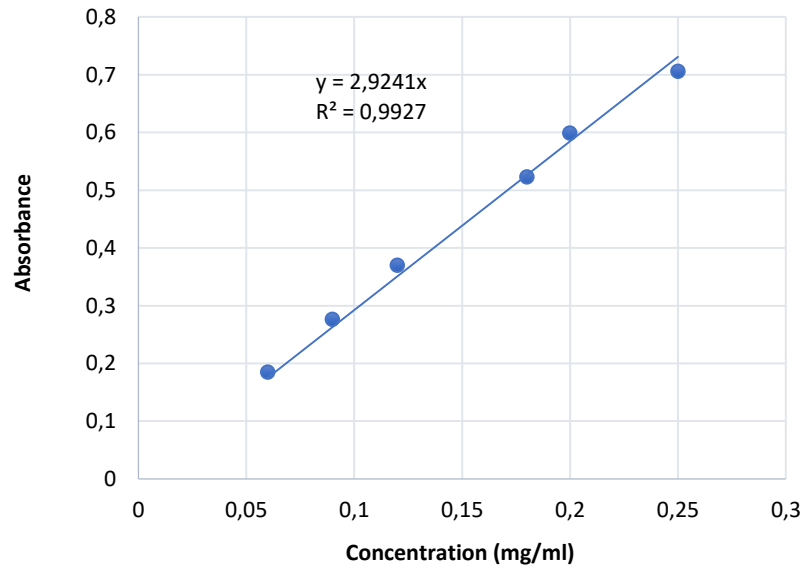


Figure 3. 1 : Courbe d'étalonnage de l'acide tannique.

3.2.2 Dosage des tanins condensés

Après les calculs effectués à partir de la courbe d'étalonnage de la catéchine (Figure 3.2), les résultats de l'analyse spectrophotométrique de la teneur en tanins pour les trois variétés du sorgho, sont indiqués dans le tableau 3.1.

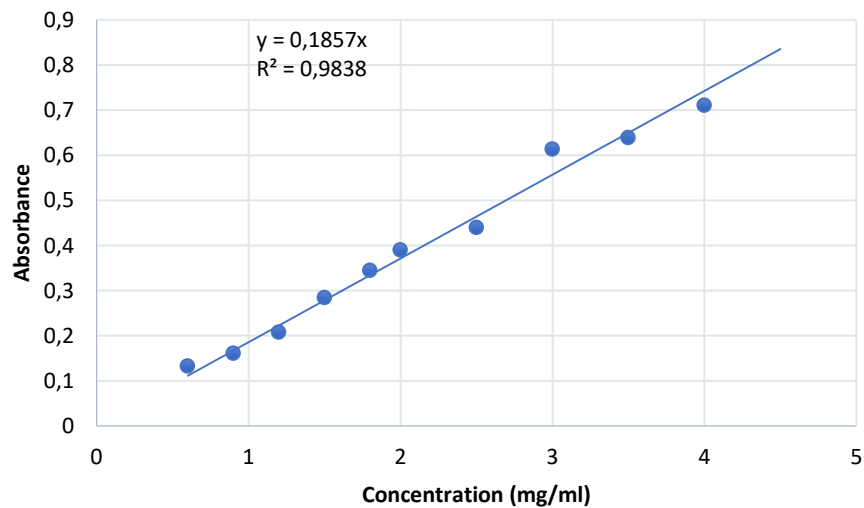


Figure 3. 2 : Courbe d'étalonnage de la catéchine.

Les teneurs des tanins condensés enregistrées dans le tableau 3.1, montrent que la teneur en tanins dans les différentes parties investiguées de sorgho extraites par les quatre systèmes de solvants s'échelonne entre 0,32 et 18,42 mg EC/g MV, où la valeur moyenne est de 4,82 mg EC/g MV avec une dispersion de 22,39 mg EC/g MV.

3.2.3 Détermination de l'activité antioxydante DPPH'

Le test DPPH est l'un des tests simples utilisés pour déterminer les activités anti-radicalaires. Après avoir effectué les calculs à partir de la courbe de la variation des pouvoirs anti-radicalaires (PAR%) (Figure 3.3), les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 3.1.

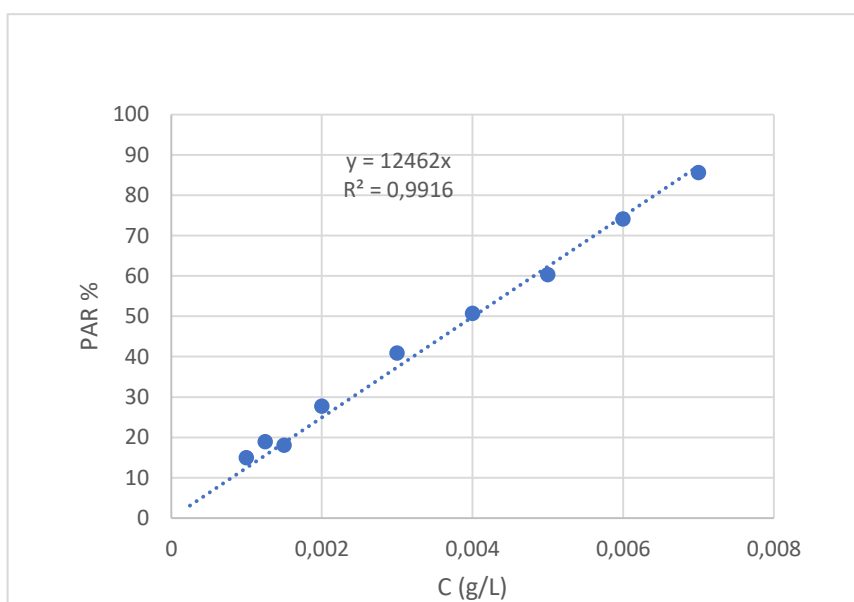


Figure 3. 3 : variation des pouvoirs anti-radicalaires (PAR%) en fonction de la concentration de la vitamine C.

Les résultats de l'analyse quantitative présentée dans le tableau 3.1, montrent que l'activité antioxydante (VCEAC) dans les différentes parties étudiées de sorgho en utilisant quatre systèmes d'extraction vis-à-vis le test du DPPH, s'intervalle entre 0,00 à 6,26 mg VC/g MV, dont la valeur moyenne est de 1,56 mg VC/g MV avec une grande dispersion de 6,26 mg VC/g MV. Nous constatons que les valeurs du VCEAC obtenues variaient dans le même sens avec les teneurs en

phénols totaux les composés phénoliques ce qui prouve que les composés phénoliques sont les principes actifs responsables de l'activité anti-radicalaire.

3.2.4 Détermination du pouvoir réducteur des ions de fer FRAP

Le test FRAP est l'un des tests permettant de connaître la capacité de restauration de différentes plantes. La méthode FRAP repose sur la conversion des ions fer (Fe^{+3}) en ions fer (Fe^{+2}). Cette méthode évalue la force du retour des composés.

Nous avons calculé le pourcentage du PCR dans le test de FRAP sur la base de la courbe de variation des pouvoirs réducteurs des ions fer (III) par la vitamine C (Figures 3.4 et 3.5).

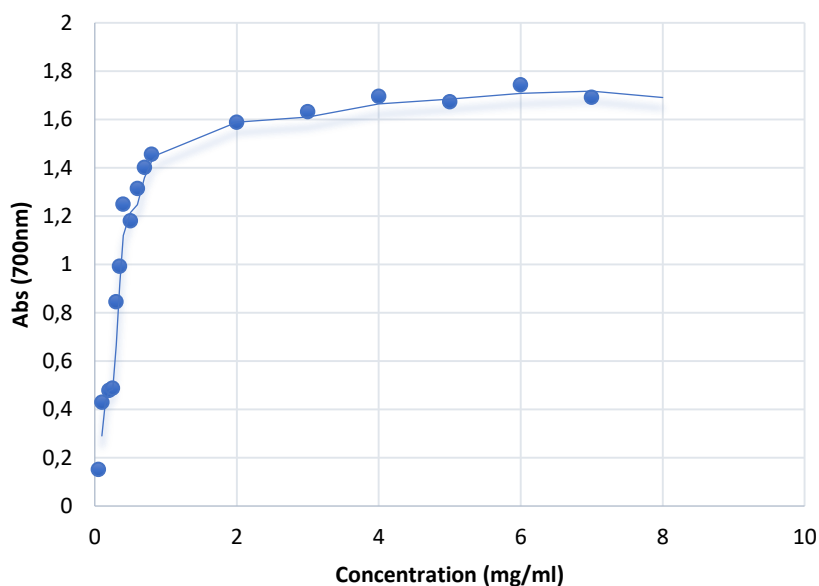


Figure 3. 4 : Courbe standard de l'acide ascorbique en phase complète

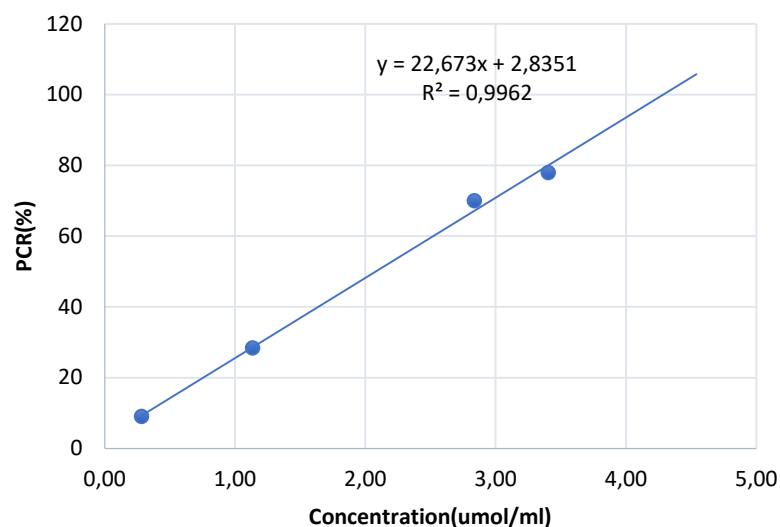


Figure 3. 5 : Variation des pouvoirs réducteurs (PCR%) en fonction de la concentration de la vitamine C.

Les valeurs des VCEAC relatives au pouvoir réducteur du fer (III) FRAP des extraits étudiés sont illustrées dans le tableau 3.1. Elles variaient entre 0,00 et 2,23 mg VC/g MV, où la valeur moyenne est égale à 0,72 mg VC/g MV, avec une dispersion de 0,28 mg VC/g MV.

3.2.5 Comparaison des résultats

Si on compare nos résultats avec les résultats d'un autre travail sur le mil perlé de la même récolte et cultivé dans la même région d'étude [30], où les mêmes conditions d'extraction et d'analyse ont été utilisées (Tableau 3. 2).

Tableau 3. 2 Comparaison des résultats d'analyse

	Sorgho			Mil perlé		
	Minimum	Maximum	Moyenne	Minimum	Maximum	Moyenne
Phénols totaux	0,00	3,73	1,24	0,11	3,03	1,03
Tannins	0,32	18,42	4,82	0,00	11,98	3,51
VCEAC (Test FRAP)	0,00	2,32	0,72	0,20	3,58	0,97
VCEAC (Test DPPH)	0,00	11,27	8,88	0,04	2,01	0,64

Phénols totaux (mg EAT/g MV) ; **Tanins** (mg EC/g MV) et **VCEAC** (mg VC/g MV).

Nous notons que la teneur en phénols totaux, tannins et DPPH' dans les extraits des variétés de sorghos locales est plus que celle des variétés de mil perlés locales. Par contre les extraits obtenus par les variétés de mil perlés locales à enregistrer les plus fortes valeurs des VCEAC.

3.3 Etude statistique

Les résultats obtenus ont été traités sur la base du programme statistique SPSS, la dix-septième édition, pour montrer ce qui suit :

- Analyse statistique univariée : cette méthode a été utilisée pour estimer la moyenne arithmétique (moyennes), erreur standard (SE) et le coefficient de variation (% CV).
- Analyse statistique bivariée : nous avons appliqué l'analyse de variance (ANOVA) à un facteur, Cette méthode a été utilisée pour déterminer l'effet de la méthode d'extraction et l'effet de la source de l'échantillon sur les propriétés des composés phénoliques extraits, à un niveau significatif de 5 %.

3.3.1 Influence du système d'extraction

Les résultats obtenus par les systèmes d'extraction des extraits (Tableau 3.3) montrent que la teneur en phénolique varie de $0,36 \pm 0,11$ mg EAT/g à $1,94 \pm 0,25$ mg EAT/g. Évidemment, les niveaux de composés phénoliques sont plus élevés dans les extraits du système 2, ils sont plus élevés que ceux des autres systèmes. L'observation qui attire l'attention est que le contraste de ces contenus diffère dans la même direction indépendamment du composé phénolique utilisé comme norme ainsi que le système de solvant utilisé pour l'extraction.

Tableau 3. 3: Résultats quantitatifs des phénols totaux, des tanins, de l'activité antioxydante DPPH et de la capacité de réductrice FRAP dans quatre systèmes d'extraction différents.

	Systeme 1 Acétone	Systeme 2 Ac/H ₂ O	Systeme 3 MeOH	Systeme 4 Me/H ₂ O
Phénols totaux	0.36±0.11 (a)	1.94±0.25 (c)	1.29±0.16 (b)	1.37±0.14 (b. c)
Tannins	2.67±0.84 (a)	5.83±1.33 (a)	5.74±1.22 (a)	5.05±0.92 (a)
VCEAC (Test FRAP)	0.31±0.09 (a)	0.77±0.15 (b)	0.92±0.10(b)	0.86±0.10 (b)
VCEAC (Test DPPH)	0.33±0.12 (a)	2.75±0.84 (b)	1.90±0.66 (a. b)	1.28±0.33 (a. b)

Phénols totaux (mg EAT/g MV) ; **Tanins** (mg EC/g MV) et **VCEAC** (mg VC/g MV).

Les teneurs en tanins dans les extraits variaient entre $2,67 \pm 0,84$ mg EC/g et $5,83 \pm 1,33$ mg EC/g, où l'on note que dans le système 2. Ils sont deux fois plus élevés que le premier système et est supérieur aux autres systèmes.

On remarque que les valeurs d'activité antioxydante vis-à-vis le test du DPPH, des extraits varient de $0,33 \pm 0,12$ à $2,75 \pm 0,84$ (mg EVC/g MV) et que les extraits générés par le système 2 sont plus actifs que ceux obtenus à partir des autres systèmes. Ce résultat est justifié car nous avons déjà trouvé que les extraits obtenus par le système 2 sont plus riches en composés phénoliques et cela prouve donc que les composés phénoliques sont responsables de l'activité anti-radicalaire.

Les valeurs VCEAC liées au pouvoir réducteur du test FRAP, des extraits étudiés varient entre $0,31 \pm 0,39$ et $0,92 \pm 0,10$ mg EVC/g MV. Les extraits obtenus dans le Système 3 sont plus réducteurs que ceux obtenus dans les autres systèmes.

L'analyse de la variance (ANOVA) de tous les extraits obtenus par quatre différents systèmes d'extraction, a montré qu'il y a des différences significatives dans tous les paramètres étudiés, à l'exception qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs moyennes des teneurs en tanins lors du changement du système d'extraction ($P < 0,05$) (annexe).

3.3.2 Influence de différentes parties de la plante du sorgho

Les valeurs de VCEAC du test de DPPH des extraits étudiés variaient de $0,70 \pm 0,08$ à $2,60 \pm 0,72$ (mg EVC/g MV). On signale que les feuilles sont plus actives, elles sont deux fois plus actives que dans la panicule égrenée et trois fois supérieures que dans les tiges, ce qui confirme également que les composés phénoliques sont responsables de l'activité anti-radicalaire.

Tableau 3.4 : Résultats quantitatifs des phénols totaux, des tanins, de l'activité antioxydante DPPH et de la capacité de réduction FRAP dans les parties végétales (panicule, feuilles, tige).

	P	F	T
Phénols totaux	0.83 ± 0.17 (a)	1.67 ± 0.21 (b)	1.23 ± 0.14 (a. b)
Tannins	3.12 ± 0.72 (a)	3.18 ± 0.39 (a)	8.16 ± 1.22 (b)
VCEAC (test FRAP)	0.52 ± 0.11 (a)	0.97 ± 0.10 (b)	0.65 ± 0.10 (a. b)
VCEAC (test DPPH)	1.38 ± 0.45 (a. b)	2.60 ± 0.72 (a)	0.70 ± 0.08 (b)

Phénols totaux (mg EAT/g MV) ; Tanins (mg EC/g MV) et VCEAC (mg VC/g MV).

Les valeurs VCEAC liées à la réduction de la capacité FRAP des extraits variaient entre $0,52\pm 0,11$ et $0,97\pm 0,10$ (mg EVC/g MV). On note que les feuilles sont plus réductrices que la panicule égrenée et la tige.

L'analyse de la variance (ANOVA) de tous les extraits obtenus à partir des trois parties de la plante, a montré qu'il y a des différences significatives dans tous les paramètres étudiés ($P < 0,05$) (annexe).

3.3.3 Influence des variétés du sorgho locale

Les valeurs des polyphénols dans les extraits variaient entre $0,95\pm 0,16$ et $1,60\pm 0,21$ mg EAT/g MV. On remarque que la variété S3 est riche en phénols.

Les valeurs des tanins dans les extraits variaient entre $3,97\pm 0,94$ et $5,91\pm 1,28$ mg EC/g MV. On remarque que la teneur en tanins est similaire chez les cultivars de sorgho, mais la classe 1 est légèrement supérieure aux autres.

Tableau 3. 5 : Résultats quantitatifs des phénols totaux, des tanins, de l'activité antioxydant DPPH et de la capacité de réduction FRAP dans les variétés végétales (S1, S2, S3),

	S1	S2	S3
Phénols totaux	1.18 ± 0.17 (a. b)	0.95 ± 0.16 (a)	1.60 ± 0.21 (b)
Tannins	5.91 ± 1.28 (a)	3.97 ± 0.94 (a)	4.58 ± 0.51 (a)
VCEAC (test FRAP)	0.70 ± 0.11 (a. b)	0.53 ± 0.08 (a)	0.92 ± 0.13 (b)
VCEAC (test DPPH)	0.92 ± 0.20 (a)	0.56 ± 0.14 (a)	3.21 ± 0.75 (b)

Phénols totaux (mg EAT/g MV) ; **Tanins** (mg EC/g MV) et **VCEAC** (mg VC/g MV).

Les valeurs des VCEAC obtenues par le test du DPPH des extraits variaient de $0,56\pm 0,14$ à $3,21\pm 0,75$ (mg EVC/g MV). On constate que la classe 3 est six fois plus élevée en activité que la classe 2 et trois fois plus élevée que la classe 1, ce qui confirme une fois de plus que les composés phénoliques sont responsables de l'activité antiradicalaire.

Les valeurs VCEAC liées à la réduction de la capacité FRAP des extraits variaient entre $0,53\pm 0,08$ et $0,92\pm 0,13$ (mg/g), et il a été noté que la classe 3 était plus réductrice que la classe 1 et la classe 2.

L'analyse de la variance (ANOVA) de tous les extraits obtenus à partir des trois variétés locales, a montré qu'il y a des différences significatives dans tous les paramètres étudiés, à l'exception qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs moyennes des teneurs en tanins dans toutes les variétés étudiées ($P < 0,05$) (annexe).

3.3.4 Corrélation de Person

En termes simples, l'analyse de corrélation calcule la quantité de changement dans une variable due au changement dans l'autre. Une corrélation élevée indique une forte relation entre les variables, tandis qu'une corrélation faible signifie que les variables sont faiblement dépendantes les unes des autres.

Le tableau 3.6 résume les valeurs des coefficients de corrélations entre quelques paramètres déterminés dans cette étude. Les valeurs de ces coefficients montrent qu'ils existent de moyennes corrélations 0,45 entre les quantités des phénols totaux et les quantités des tanins.

Tableau 3. 6 Coefficient de corrélation de Pearson entre quantités des phénols totaux, quantités en tanins et activités antioxydantes (DPPH, FRAP)

	Phénols totaux	Tanins	VCEAC (test FRAP)	VCEAC (test DPPH)
Phénols totaux	1			
Tanins	0,454**	1		
VCEAC (test FRAP)	0,697**	0,322**	1	
VCEAC (test DPPH)	0,715**	0,173	0,648**	1

Phénols totaux (mg EAT/g MV) ; **Tanins** (mg EC/g MV) et **VCEAC** (mg VC/g MV).

** , La corrélation est significative au niveau 0,01 (bilatéral).

Des moyennes a bonnes corrélations de 0,32 à 0,70 ont été enregistrées entre l'activité réductrice FRAP et les valeurs des quantités des phénols totaux et les tanins.

Des bonnes corrélations de 0,65 à 0,72 ont été enregistrée entre l'activité antioxydant DPPH et l'activité réductrice FRAP et les valeurs des quantités des phénols totaux.

Les corrélations obtenues montrent que l'activité antioxydante est généralement liée aux phénols totaux des extraits étudiés.

IV. Conclusion générale

La crise mondiale actuelle des denrées alimentaires oblige certains pays en développement à valoriser leurs produits agricoles. Dans ce cadre, le sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench), présente différentes potentialités :

- une substitution au blé pour les personnes allergiques au gluten,
- amélioration en sélection, le nombre de variétés de sorgho identifiées, qui se différencient par les caractéristiques des grains comme le poids, la présence ou l'absence de testa, la couleur de l'endosperme, la teneur en composés phénoliques.
- amélioration des propriétés organoleptiques, nutritionnelles et antioxydantes qu'ils soient liés aux fourrages, aux grains dans l'alimentation humaine et animale, avant de consommer des grains de sorgho, après la transformation de ces derniers.
- Encourager et intensifier ce type de céréaliculture afin d'assurer un développement socioéconomique des régions arides et hyper arides de notre pays, de diversifier nos agro-ressources et de réduire les importations des produits agricole et alimentaires (céréales, semences de fourrages et de céréales.....).

De cet effet, l'objet de notre travail a porté sur l'activité antioxydante des extraits phénoliques, issues de quatre différents systèmes d'extraction. En premier lieu, nous avons choisi la méthode d'extraction par ultrason, en utilisant les différentes parties (panicules égrenées, tiges et feuilles) de trois variétés comme matière végétale moulue et quatre systèmes de solvants de polarité différente : **Méthanol**, (**Méthanol/Eau**) d'un rapport de (8/2 : v/v), **Acétone** et (**Acétone/Eau**) d'un rapport de (7/3 : v/v), afin d'obtenir des extraits phénoliques bruts.

Après l'obtention de 36 extraits bruts, nous avons passé à un dosage spectrométrique des phénols totaux et des tanins condensés.

Enfin, nous avons évalué le pouvoir antioxydant de nos extraits par deux tests à savoir : le test de réduction du radical libre DPPH[•] et le test de FRAP qui est basée sur la réduction de l'ion ferrique (Fe³⁺) en ion ferreux (Fe²⁺) par les composés phénoliques actifs.

Les résultats que nous avons pu obtenir à travers cette étude, nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

Les résultats de l'analyse quantitative révèlent que la teneur moyenne en phénols totaux dans les différentes parties de sorgho issue par les quatre systèmes d'extraction est de 1,24 mg EAT/g, où leur valeur variait entre 0,00 et 3,73 mg EAT/g MV.

L'analyse spectroscopique par l'ultra-violet des extraits des différentes parties investiguées de sorgho dévoilent que nos variétés ne contiennent pas des flavonoïdes.

Les teneurs en tanins condensés dans les différentes parties investiguées de sorgho extraites par les quatre systèmes de solvants montrent que la teneur s'échelonne entre 0,32 et 18,42 mg EC/g MV, où la valeur moyenne est de 4,82 mg EC/g MV.

Les résultats obtenus ont été traités sur la base du programme statistique SPSS, la dix-septième édition montrent que :

L'analyse de la variance (ANOVA) de tous les extraits obtenus par quatre différents systèmes d'extraction, a montré qu'il y a des différences significatives dans tous les paramètres étudiés, à l'exception qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs moyennes des teneurs en tanins lors du changement du système d'extraction ($P < 0,05$) :

- la teneur en phénolique varie de $0,36 \pm 0,11$ à $1,94 \pm 0,25$ mg EAT/g MV et que les niveaux de composés phénoliques sont plus élevés dans les extraits du système 2 que ceux des autres systèmes.
- Les teneurs en tanins dans les extraits variaient entre $2,67 \pm 0,84$ et $5,83 \pm 1,33$ mg EC/g MV, où les valeurs du système 2 sont deux fois plus élevées que dans le premier système 1. Ce dernier est supérieur aux autres systèmes.
- les valeurs de VCEAC vis-à-vis le test du DPPH, des extraits varient de $0,33 \pm 0,12$ à $2,75 \pm 0,84$ (mg VC/g MV) et que les extraits générés par le système 3 sont plus actifs que ceux obtenus à partir des autres systèmes.
- Les valeurs VCEAC liées au pouvoir réducteur du test FRAP, des extraits étudiés varient entre $0,31 \pm 0,39$ et $0,92 \pm 0,10$ mg EVC/g MV. et que les extraits obtenus dans le Système 3 sont plus réducteurs que ceux obtenus dans les autres systèmes.

L'analyse de la variance (ANOVA) de tous les extraits obtenus à partir les trois parties de la plante, a montré qu'il y a des différences significatives dans tous les paramètres étudiés ($P < 0,05$) :

- la teneur en phénol variait de $0,83 \pm 0,17$ à $1,67 \pm 0,21$ mg EAT/g MV. La teneur en phénols totaux est proche dans les parties de la plante, mais sa teneur dans les feuilles est légèrement supérieure.
- Les valeurs de tanin dans les extraits variaient entre $3,12 \pm 0,72$ et $8,16 \pm 1,22$ mg EC/g MV. La teneur en tanins est égale dans les feuilles et la panicule, alors qu'on la retrouve dans la tige est élevée.
- Les valeurs de VCEAC du test de DPPH' des extraits étudiés variaient de $0,70 \pm 0,08$ à $2,60 \pm 0,72$ (mg/g). On signale que les feuilles sont plus actives, elles sont deux fois plus actives que dans la panicule égrenée et trois fois supérieures que dans les tiges.
- Les valeurs VCEAC liées à la réduction de la capacité FRAP des extraits variaient entre $0,52 \pm 0,11$ et $0,97 \pm 0,10$ (mg EVC/g MV). Les feuilles sont plus réductrices que la panicule égrenée et la tige.

L'analyse de la variance (ANOVA) de tous les extraits obtenus à partir les trois variétés locales, a montré qu'il y a des différences significatives dans tous les paramètres étudiés, à l'exception qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs moyennes des teneurs en tanins dans toutes les variétés étudiées ($P < 0,05$) :

- Les valeurs des polyphénols dans les extraits variaient entre $0,95 \pm 0,16$ et $1,60 \pm 0,21$ mg EAT/g MV On remarque que la variété S3 est riche en phénols.
- Les valeurs des tanins dans les extraits variaient entre $3,97 \pm 0,94$ et $5,91 \pm 1,28$ mg EC/g MV. La teneur en tanins est similaire chez les cultivars de sorgho, mais la classe 1 est légèrement supérieure aux autres.
- Les valeurs des VCEAC obtenues par le test du DPPH des extraits variaient de $0,56 \pm 0,14$ à $3,21 \pm 0,75$ (mg EVC/g MV). On constate que la classe 3 est six fois plus élevée en activité que la classe 2 et trois fois plus élevée que la classe 1.
- Les valeurs VCEAC liées à la réduction de la capacité FRAP des extraits variaient entre $0,53 \pm 0,08$ et $0,92 \pm 0,13$ (mg EVC/g MV) et il a été noté que la classe 3 était plus réductrice que la classe 1 et la classe 2.

Des moyennes à bonnes corrélations de 0,32 à 0,70 ont été enregistrées entre l'activité réductrice FRAP et les valeurs des quantités des phénols totaux et les tanins,

Des bonnes corrélations de 0,65 à 0,72 ont été enregistrées entre l'activité antioxydante DPPH et l'activité réductrice FRAP et les valeurs des quantités des phénols totaux,

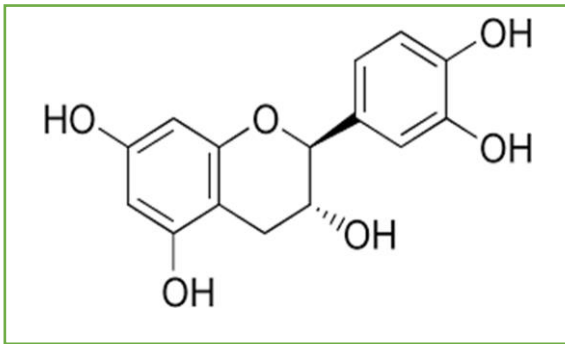
Les corrélations obtenues montrent que l'activité antioxydante est généralement liée aux phénols totaux des extraits étudiés.

Références

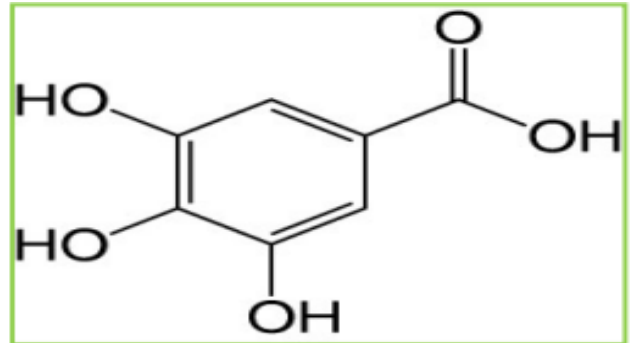
1. Newman, D.J., G.M. Cragg, and K.M. Snader, *Natural Products as Sources of New Drugs over the Period 1981–2002*. Journal of Natural Products, 2003. **66**(7): p. 1022-1037.
2. Mabelebele, M., et al., *Chemical composition and nutritive value of South African sorghum varieties as feed for broiler chickens*. South African Journal of Animal Science, 2015. **45**(2): p. 206-213.
3. Ba, K., et al., *Etude comparative des composés phénoliques, du pouvoir antioxydant de différentes variétés de sorgho sénégalais et des enzymes amylolytiques de leur malt*. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 2010. **14**(1): p. 131.
4. Barcelos, C., et al., *Ethanol production from sorghum grains [Sorghum bicolor (L.) Moench]: evaluation of the enzymatic hydrolysis and the hydrolysate fermentability*. Brazilian Journal of chemical engineering, 2011. **28**: p. 597-604.
5. .
6. Przybylska-Balcerek, A., J. Frankowski, and K. Stuper-Szablewska, *Bioactive compounds in sorghum*. European Food Research and Technology, 2019. **245**(5): p. 1075-1080.
7. Blackwell, D.L., et al., *Alkaline extraction of phenolic compounds from intact sorghum kernels*. 2012.
8. Chung, I.-M., et al., *Antidiabetic effects of three Korean sorghum phenolic extracts in normal and streptozotocin-induced diabetic rats*. Food Research International, 2011. **44**(1): p. 127-132.
9. Rao, S., et al., *Characterization of phenolic compounds and antioxidant activity in sorghum grains*. Journal of Cereal Science, 2018. **84**: p. 103-111.
10. Iyabo, O., O. Ibiyinka, and O. Abimbola Deola, *Comparative study of nutritional, functional and antinutritional properties of white sorghum bicolor (Sorghum) and pennisetum glaucum (Pearl Millet)*. International journal of engineering technologies and management research, 2018. **5**(3): p. 151-158.
11. Lowe, C., M. Terrey, and E.A. MacLachlan, *ORGANIC-ACIDURIA, DECREASED RENAL AMMONIA PRODUCTION, HYDROPTHALMOS, AND MENTAL RETARDATION: A Clinical Entity*. A.M.A. American Journal of Diseases of Children, 1952. **83**(2): p. 164-184.
12. Agyei-Amponsah, J., et al., *Quality characteristics of pre-treated yam chips produced from irradiated yams*. 2014.
13. Alfieri, M., et al., *Antioxidant activity in a set of sorghum landraces and breeding lines*. Maydica, 2017. **62**(3): p. 1-7.
14. Sorour, M., et al., *Changes of total phenolics, tannins, phytate and antioxidant activity of two sorghum cultivars as affected by processing*. Journal of Food and Dairy Sciences, 2017. **8**(7): p. 267-274.
15. Edeas, M., *Les polyphénols et les polyphénols de thé*. Phytothérapie, 2007. **5**(5): p. 264-270.
16. Boizot, N. and J.-P.J.-P. Charpentier, *Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre forestier*. Cahier des Techniques de l'INRA, 2006: p. 79-82.
17. OULD KIAR, R., *Etude de la diversité chez des populations du sorgho [Sorghum bicolor (L.) Moench] en Algérie*. 2022.
18. Amiot, M.J., A. Fleuriot, and J.J. Macheix, *Importance and evolution of phenolic compounds in olive during growth and maturation*. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1986. **34**(5): p. 823-826.
19. Kalili, K.M. and A. de Villiers, *Recent developments in the HPLC separation of phenolic compounds*. Journal of Separation Science, 2011. **34**(8): p. 854-876.
20. Shah, P. and H. Modi, *Comparative study of DPPH, ABTS and FRAP assays for determination of antioxidant activity*. Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol, 2015. **3**(6): p. 636-641.
21. Achat, S. *Polyphénols de l'alimentation: extraction, pouvoir antioxydant et interactions avec des ions métalliques*. 2013. Avignon.

22. Valls, J., et al., *Advanced separation methods of food anthocyanins, isoflavones and flavanols*. Journal of Chromatography A, 2009. **1216**(43): p. 7143-7172.
23. Ignat, I., I. Volf, and V.I. Popa, *A critical review of methods for characterisation of polyphenolic compounds in fruits and vegetables*. Food chemistry, 2011. **126**(4): p. 1821-1835.
24. Santos-Sánchez, N.F., et al., *Antioxidant compounds and their antioxidant mechanism*. Antioxidants, 2019. **10**: p. 1-29.
25. Togo, A., *Effets de la fertilisation et de la date de semis sur des variétés de sorgho à double usage*. 2019, International Institute of Tropical Agriculture.
26. Naudet, M. and A. Hautfenne, *[An enzymatic standardized method for determination of total sterols in fats and oils [International Union of Pure and Applied Chemistry]]*. [French]. Revue Francaise des Corps Gras, 1986.
27. Georgé, S., et al., *Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products*. Journal of Agricultural and food chemistry, 2005. **53**(5): p. 1370-1373.
28. Price, M.L., S. Van Scoyoc, and L.G. Butler, *A critical evaluation of the vanillin reaction as an assay for tannin in sorghum grain*. Journal of agricultural and food chemistry, 1978. **26**(5): p. 1214-1218.
29. Bozin, B., et al., *Phenolics as antioxidants in garlic (Allium sativum L., Alliaceae)*. Food chemistry, 2008. **111**(4): p. 925-929.
30. Chung, Y.-C., et al., *Antioxidative activity and safety of the 50 ethanolic extract from red bean fermented by Bacillus subtilis IMR-NK1*. Journal of agricultural and food chemistry, 2002. **50**(8): p. 2454-2458.

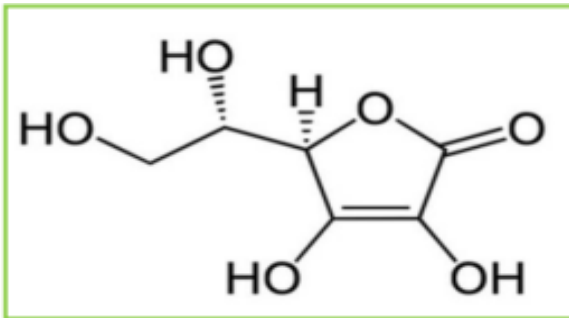
Annexes:



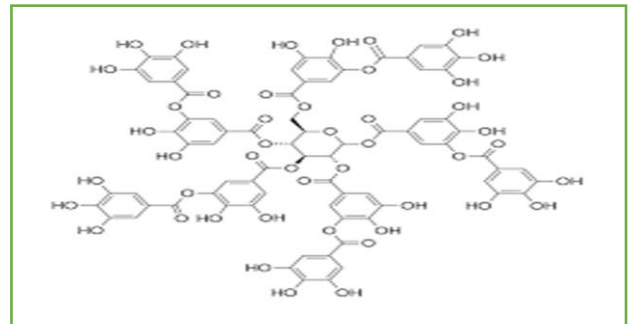
Structure de la catéchine



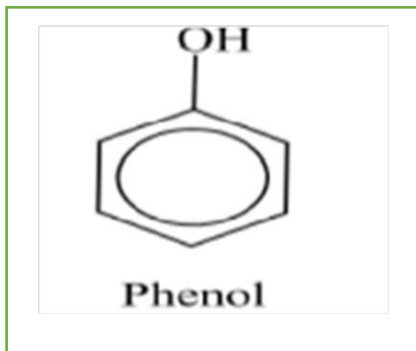
Structure de l'acide gallique



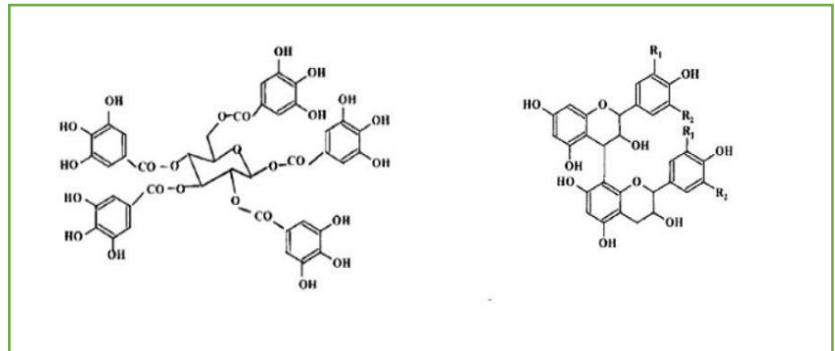
Structure de l'acide ascorbique



Structure de l'acide tannique



Structure de phénol



Exemples d'un tannin hydrolysable et un autre condensé

Influence du système d'extraction

ANOVA

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
PTmgTAE	Inter-groupes	23,243	3	7,748	14,604	,000
	Intra-groupes	36,075	68	,531		
	Total	59,317	71			
taninsmgEC	Inter-groupes	117,729	3	39,243	1,813	,153
	Intra-groupes	1472,069	68	21,648		
	Total	1589,797	71			
FRAPmg	Inter-groupes	4,153	3	1,384	6,066	,001
	Intra-groupes	15,519	68	,228		
	Total	19,672	71			
DPPHeqmg	Inter-groupes	56,578	3	18,859	3,310	,025
	Intra-groupes	387,496	68	5,698		
	Total	444,074	71			

Influence de différentes parties de la plante du sorgho

ANOVA

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
PTmgTAE	Inter-groupes	8,449	2	4,224	5,730	,005
	Intra-groupes	50,868	69	,737		
	Total	59,317	71			
taninsmgEC	Inter-groupes	403,092	2	201,546	11,719	,000
	Intra-groupes	1186,705	69	17,199		
	Total	1589,797	71			
FRAPmg	Inter-groupes	2,598	2	1,299	5,249	,008
	Intra-groupes	17,074	69	,247		
	Total	19,672	71			
DPPHeqmg	Inter-groupes	44,600	2	22,300	3,852	,026
	Intra-groupes	399,473	69	5,789		
	Total	444,074	71			

Influence des variétés du sorgho locale

ANOVA

		Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Signification
PTmgTAE	Inter-groupes	5,313	2	2,656	3,394	,039
	Intra-groupes	54,005	69	,783		
	Total	59,317	71			
taninsmgEC	Inter-groupes	47,283	2	23,641	1,058	,353
	Intra-groupes	1542,514	69	22,355		
	Total	1589,797	71			
FRAPmg	Inter-groupes	1,794	2	,897	3,462	,037
	Intra-groupes	17,878	69	,259		
	Total	19,672	71			
DPPHeqmg	Inter-groupes	98,778	2	49,389	9,869	,000
	Intra-groupes	345,296	69	5,004		
	Total	444,074	71			