

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



جامعة الإخوة منتوري قسنطينة I
Frères Mentouri Constantine I University
Université Frères Mentouri Constantine I

جامعة الإخوة منتوري قسنطينة
كلية علوم الطبيعة والحياة

Université Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département de Biologie et écologie végétale

قسم بيولوجيا و إيكولوجيا النبات

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Sciences Biologiques

Spécialité : Biodiversité et physiologie végétale

N° d'ordre :

N° de série :

Intitulé :

**Etude phytochimique d'une céréale secondaire : le mil
(*Pennisetum glaucum* L)**

Présenté par : Seghiri Adem abdenmour

Le 20/06/2022

Tachour Amir

Jury d'évaluation :

Encadreur : Chaib Ghania (Prof - Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Examineur 1 : Chibani Salih (MCA - Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Examineur 2 : Bouzid Salha (MCB - Université Frères Mentouri, Constantine 1).

**Année universitaire
2021 - 2022**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Handwritten signature: محمد بن عبد الله

Remerciements

Alhamdo li allah, qui nous a éclairé les voies de la science et de la Connaissance et qui nous a aidés à compléter cette modeste recherche

*Ce mémoire a été réalisé sous l'encadrement du Pr. **CHAIB Ghania**, nous tenons à lui exprimer notre gratitude pour nous avoir encadrés et Veillés au bon déroulement de ce travail. Sans oublier notre tuteur la doctorante **Labed Hanane**, qui nous a aidés dans cette recherche ; Merci d'avoir toujours été disponible et pour nous avoir guidés par vos conseils et orientations. Merci infiniment pour les nombreuses heures investies dans la correction du présent manuscrit.*

*Que Mesdames et Messieurs les membres de jury d'évaluation Dr. **Chibani Salih** et Dr. **Bouزيد Salha** trouvent ici l'expression de notre profond respect et de nos remerciements les plus sincères pour l'intérêt qu'ils portent pour juger ce modeste travail, en l'occurrence : Nous tenons également à remercier tous les enseignants de la faculté des sciences de la nature et de la vie d'Université Frères Mentouri 1 Constantine, spécialement les enseignants qui ont contribué à notre formation dans laboratoire de Biochimie.*



Dédicace

*C'est avec un très grand honneur, que je dédie ce modeste travail
aux personnes les plus chères au monde qui m'ont permis de continuer
Mes études dans les meilleures conditions et qui m'ont appris à
ne jamais baisser les bras.*

Mes chers parents ;

*A ma très chère mère **Ouarda***

*Tu es l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de
prier pour moi. Et Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver t'accorder santé,*

Longue vie et bonheur.

*A mon père **Salim** ;*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et
mon bien être. Ce travail est fruit de tes sacrifices qui tu as consentis pour
mon éducation et ma formation*

*A mes chères sœurs : **Oumeima ; Hosna ; Kenza ; Bouchra***

*A mon frère : **Chouaib***

À tout le membre de ma famille grande et petite.

*À Mon chère ami, mon compagnon **Amir***

À tous mes proches, mes camarades de promotion, BPV 2022

Adem

Dédicace

Je dédie ce mémoire

*A ceux qui m'ont tout donné sans rien attendre en retour
A ceux qui m'ont encouragé et soutenu durant toutes mes années
d'études : mes parents tous les mots sont insuffisants
Pour exprimer ma gratitude, ma reconnaissance et
mon amour. Que Dieu le tout puissant les garde et les
protégés*

*A mes parents **Boubekur** et **Zoulaikha***

*A mes chères sœurs **Aya** et **Lamis**.*

*A mon très cher frère **Aymen** présent dans tous mes moments d'examens par
son soutien moral et ces encouragements.*

*A tous les membres de ma famille et mes ami(e)s qui m'ont beaucoup
aidé et qui ont toujours cru en moi.*

*A mon binôme **Adem**.*

*Merci pour vos encouragements, votre soutien moral, dont je suis
reconnaissant. Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de
Bonheur.*

Amir

LISTE DES ABREVIATIONS

- ✓ **CH₃OH** : Méthanol.
- ✓ **C₇H₆O₅** : Acide gallique.
- ✓ **C₁₅H₁₀O₇** : Quercétine.
- ✓ **Na₂CO₃** : Carbonate de sodium.
- ✓ **NaNO₂** : Nitrite de sodium.
- ✓ **AlCl₃** : Chlorure d'aluminium.
- ✓ **NaOH** : Hydroxyde de sodium.
- ✓ **Hcl** : Acide chlorhydrique.
- ✓ **C₈H₈O₃** : Vanilline.
- ✓ **CHCl₃** : Chloroforme.
- ✓ **C₄H₁₀O** : n-Butanol.
- ✓ **C₄H₈O₂** : Acétate d'éthyle.
- ✓ **VM** : variété Maroc.

Liste des figures

| N° | Listes des figures | Page |
|-----------|--|------|
| 01 | A : Pays producteurs de mil dans le monde B : Culture de différents types de mil dans le monde | 4 |
| 02 | Les types de mil | 7 |
| 03 | Morphologie florale des mils avec leurs noms communs et botaniques | 7 |
| 04 | Plante de mil avec plusieurs talles | 13 |
| 05 | Éléments de mil chandelles | 13 |
| 06 | Formes de la panicule du mil | 14 |
| 07 | Formes du grain du mil | 15 |
| 08 | Classes de couleurs de grains de mil | 16 |
| 09 | Phases de la croissance et de développement du mil | 16 |
| 10 | Le développement de talles | 17 |
| 11 | Réponses biologiques des plantes à divers stress abiotiques | 27 |
| 12 | Mécanisme moléculaire d'adaptation chez les mils au niveau du gène fonctionnel | 29 |
| 13 | Amélioration du stress abiotique chez les mils par des bactéries favorisant la croissance des plantes (PGPB) | 33 |
| 14 | Structure d'unité de base des polyphénols | 47 |
| 15 | Acide cinamique | 49 |
| 16 | Acide benzoïque | 49 |
| 17 | Structure de base d'un flavonoïde | 50 |
| 18 | Principaux types de coumarines | 52 |
| 19 | Structures chimiques (a) d'un tanin condensé et (b) d'un tanin hydrolysable | 53 |
| 20 | Différentes classes de l'anthocyane | 53 |
| 21 | Structure de lignane | 54 |
| 22 | Structure de l'isoprène | 54 |
| 23 | Exemples des dérivés d'alcaloïdes | 56 |

Liste des figures

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 24 | Feuilles de <i>Pennisetum glaucum</i> L | 59 |
| 25 | Préparation de la matière végétale | 60 |
| 26 | Macération à la température ambiante et à l'ombre 24h | 61 |
| 27 | Filtration des extraits avec papier filtre | 61 |
| 28 | Rota-vapeur utilisé | 62 |
| 29 | Protocole de préparation des extraits (méthanol) de <i>Pennisetum glaucum</i> L. (Mil) | 63 |
| 30 | Les étapes de l'extraction solide -liquide | 64 |
| 31 | Schéma illustrant les différentes étapes d'extraction | 67 |
| 32 | Mécanisme réactionnel du test polyphénols totaux | 68 |
| 33 | Dosage des phénols totaux | 69 |
| 34 | Mécanisme de l'interaction du chlorure d'aluminium avec les flavonoïdes | 70 |
| 35 | Dosage des flavonoïdes | 70 |
| 36 | Dosage des tanins | 71 |
| 37 | La lecture de l'absorbance par le spectrophotomètre | 72 |
| 38 | Les extraits dilués impliqués dans la phase de dosage | 72 |
| 39 | Les Rendements d'extraction des différents extraits | 74 |
| 40 | Courbe d'étalonnage de l'acide gallique pour le dosage des phénols totaux | 76 |
| 41 | Teneur en phénols totaux dans les quatre extraits chez les feuilles de <i>Pennisetum glaucum</i> L. | 77 |
| 42 | Courbe d'étalonnage de la quercétine pour le dosage des flavonoïdes | 79 |
| 43 | Teneur en flavonoïdes dans les quatre extraits chez les feuilles de <i>Pennisetum glaucum</i> L | 79 |
| 44 | Teneur en tanin dans les quatre extraits chez les feuilles de <i>Pennisetum glaucum</i> L. | 81 |

Liste des tableaux

| N° | Titres des tableaux | Page |
|-----------|---|-----------|
| 1 | Estimation des statistiques mondiales sur le mil | 3 |
| 2 | Top 10 des pays producteurs de mil dans le monde | 4 |
| 3 | Noms scientifiques et noms communs des principaux types de mil | 5 |
| 4 | Dénomination internationale de mil | 6 |
| 5 | Classification botanique de <i>Pennisetum glaucum</i> (L) R. Br | 6 |
| 6 | Composition chimique du mil (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.)) | 33 |
| 7 | Composition (%) du mil | 34 |
| 8 | Composition chimique des grains du mil à chandelle | 35 |
| 9 | Classification des polyphénols | 48 |
| 10 | Présente quelques classes distinctes des flavonoïdes | 51 |
| 11 | Fractionnement de l'extrait méthanolique en phase liquide- liquide | 65 |
| 12 | Couleur, aspect et masse de chaque extrait de <i>Pennisetum glaucum</i> L | 74 |
| 13 | Teneurs en polyphénols totaux, flavonoïdes et tanins dans l'extrait brut et ses fractions | 75 |
| 14 | Analyse de variance de polyphénol | 77 |
| 15 | Classement et regroupements des groupes non significativement différents | 78 |
| 16 | Analyse de variance de flavonoïde | 80 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 17 | Classement et regroupements des groupes non significativement différents. | 80 |
| 18 | Analyse de variance de tanin | 81 |
| 19 | Classement et regroupements des groupes non significativement différents | 82 |

Résumé

Notre travail a porté sur une céréale secondaire, le mil (*Pennisetum glaucum* L.). Une étude phytochimique est réalisée sur les feuilles de la plante au stade floraison de la campagne agricole 2020-2021. L'extraction est faite par deux méthodes d'extraction liquide –solide et liquide – liquide. L'extrait brut a subi des affrontements successifs par des solvants de polarité croissante (chloroforme, l'acétate d'éthyle et n-butanol). Les tests phytochimiques de dosage des trois métabolites secondaires (polyphénols, flavonoïdes et tanins) sont effectués sur les quatre fractions. Les résultats de la détermination des rendements des quatre extraits présentent un rendement très important équivalent à 8,33% chez l'extrait brut, et rarement chez l'extrait chloroformique à 0,65%. Alors qu'il devient plus faible en passant aux autres extraits, extrait n-butanol (0,30%) et acétate d'éthyle (0,25%). Les résultats de l'analyse quantitative des métabolites secondaires indiquent la richesse de l'extrait brut en polyphénols, de l'extrait n-butanol en flavonoïdes, et de l'extrait chloroformique en tanins.

Mots clés : *Pennisetum glaucum*, extraction, polyphénols, flavonoïdes, tanins

Abstract

Our work focused on a secondary cereal, millet (*Pennisetum glaucum* L). A phytochemical study is conducted on the leaves of the plant at the flowering stage of the 2020-2021 crop year. Extraction is done by two methods of liquid-solid and liquid-liquid extraction. The crude extract underwent successive confrontations by solvents of increasing polarity (chloroform, ethyl acetate and n-butanol). Phytochemical tests for the determination of the three secondary metabolites (polyphenols, flavonoids and tannins) were performed on the four fractions. The results of the determination of the yields of the four extracts show a very important yield equivalent to 8.33% for the crude extract, and rarely for the chloroformic extract at 0.65%. While it becomes lower when passing to the other extracts, n-butanol extract (0.30%) and ethyl acetate (0.25%). The results of the quantitative analysis of secondary metabolites indicate the richness of the crude extract in polyphenols, of the n-butanol extract in flavonoids, and of the chloroformic extract in tannins.

Keywords : *Pennisetum glaucum*, extraction, polyphenols, flavonoids, tannins

المخلص

تمت دراستنا على أحد أنواع الحبوب الثانوية، الدخن (*Pennisetum glaucum* L.) تم إجراء دراسة فيتو كيميائية على أوراق النبات في مرحلة الإزهار للموسم الزراعي 2020-2021. يتم النقع بطريقتين: الاستخلاص السائل - الصلب والسائل - السائل. خضع المستخلص الخام لمواجهات متتالية مع مذيبات ذات قطبية متزايدة (كلوروفورم، أسيتات إيثيل، ن-بيوتانول). يتم إجراء اختبارات المقايسة الكيميائية النباتية للمستقلبات الثانوية الثلاثة (البوليفينول والفلافونويد والتينينات) على المستخلصات الأربعة. أظهرت نتائج تقدير مردود المستخلصات الأربعة إنتاجية عالية جدًا تعادل 8.33% في المستخلص الخام، ونادرة في مستخلص الكلوروفورم عند 0.65%. بينما يصبح أضعف بالانتقال إلى المستخلصات الأخرى، مستخلص ن-بيوتانول (0.30%) وأسيتات الإيثيل (0.25%). تشير نتائج التحليل الكمي لمواد الأيض الثانوي إلى ثراء المستخلص الخام في البوليفينول، ومستخلص ن-بيوتانول في الفلافونويد، ومستخلص الكلوروفورم في التينينات.

الكلمات المفتاحية: *Pennisetum glaucum*، الاستخلاص، البوليفينولات، الفلافونويدات، التينينات.

SOMMAIRE

| |
|-------------------------------|
| Remerciements |
| Dédicaces |
| Liste des Abréviations |
| Liste des Figures |
| Liste des tableaux |
| Introduction |

Partie 01 : Etude bibliographique

Chapitre I : Le mil

| | |
|--|----------|
| I.1. Le mil..... | 1 |
| I.1.1. Définition du mil (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br.) | 1 |
| I.1.2. L'origine géographique du mil et sa diffusion | 1 |
| I.1.3. Production dans le monde et en Algérie | 2 |
| I.1.3.1. Dans monde..... | 2 |
| I.1.3.2. Dans l'Algérie | 4 |
| I.2 Etymologie du nom Mil | 5 |
| I.3. Nom vernaculaire..... | 5 |
| I.4. Position systématique de (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br.) | 6 |
| I.5. Différents types de mil | 7 |
| I.5.1. PEARL MIL (<i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br.) | 7 |
| I.5.1.1. Historique de PEARL MIL | 7 |
| I.5.1.2. Taxonomie de PEARL MIL | 8 |
| I.5.1.3. Distribution de PEARL MIL | 8 |
| I.5.2. FOXTAIL MIL (<i>Setaria italica</i> (L.) P. Beauv.) | 9 |
| I.5.2.1. Historique de FOXTAIL MIL | 9 |
| I.5.2.2. Taxonomie de FOXTAIL MIL | 9 |

| | |
|---|-----------|
| I.5.2.3. Distribution de FOXTAIL MIL | 9 |
| I.5.3. FINGER MIL (<i>Eleusine coracana</i> L. Gaertn. Subsp. Coracana). | 10 |
| I.5.3.1. Historique de la plante FINGER MIL | 10 |
| I.5.3.2. Taxonomie de la plante FINGER MIL | 10 |
| I.5.3.3. Distribution de FINGER MIL | 10 |
| I.5.4. PROSO (<i>Panicum miliaceum</i> (L.)..... | 10 |
| I.5.4.1. Historique de PROSO | 10 |
| I.5.4.2. Taxonomie de PROSO | 11 |
| I.5.4.3. Distribution de PROSO | 11 |
| I.5.5. LITTLE MIL (<i>Panicum sumatrense</i> Roth. ex Roem. & Schult.) | 11 |
| I.5.5.1. Taxonomie de LITTLE MIL | 11 |
| I.5.5.2. Distribution de LITTLE MIL | 11 |
| I.5.6. KODO MIL (<i>Paspalum scrobiculatum</i> L.)..... | 11 |
| I.5.6.1. Historique de KODO MIL | 11 |
| I.5.6.2. Taxonomie de KODO MIL | 12 |
| I.5.6.3. Distribution de KODO MIL | 12 |
| I.6. Caractérisation botanique et morphologique..... | 12 |
| I.6.1. Caractérisation Botanique | 12 |
| I.6.2. Morphologie de la plante..... | 13 |
| I.6.2.1. L'appareil racinaire | 14 |
| I.6.2.2. L'appareil végétatif | 14 |
| I.7. Croissance et développement | 16 |
| I.7.1. Phase végétative | 17 |
| I.7.2. Phase de reproduction | 18 |
| I.7.3. Phase de maturation | 18 |
| I.8. Exigences environnementales | 19 |
| I.9. Contraintes à la production du mil | 20 |

| | |
|---|-----------|
| I.9.1. Contraintes abiotiques | 20 |
| I.9.2. Contraintes biotiques..... | 20 |
| I.10. Maladies | 20 |
| I.10.1. Charbon du mil..... | 21 |
| I.10.2. Ergot du mil..... | 21 |
| I.10.3. Insectes nuisibles au mil..... | 21 |
| I.10.4. Adventices..... | 23 |
| I.10.5. Oiseaux..... | 23 |
| I.11. La relation entre le stress et le mil..... | 23 |
| I.11.1. Impact du stress abiotique chez les mils | 23 |
| I.11.2. Adaptations morphologiques au stress | 25 |
| I.11.3. Adaptations biochimiques et physiologiques aux stress chez les mils | 27 |
| I.11.4. Adaptations moléculaires des mils aux stress | 28 |
| I.11.5. Analyse transcriptomique des mils | 30 |
| I.11.6. Atténuation du stress chez les mils | 31 |
| I.12. Composition chimique de <i>Pennisetum glaucum</i> (L.)..... | 33 |
| I.13. Composition phytochimique de mil..... | 37 |
| I.13.1. Phénoliques et flavonoïdes..... | 37 |
| I.14. Variabilité agronomique et génétique | 39 |
| I.15. Utilisations et importance économique | 40 |
| I.15.1. Rôles pharmacologiques de mil | 42 |
| Chapitre II : Métabolisme secondaire | |
| II.1. Définition..... | 46 |
| II. 2. Relation entre les métabolismes primaires et secondaires..... | 46 |
| II.3. Utilisation | 46 |
| II.3.1 En médecine..... | 46 |
| II.3.2. En alimentation | 46 |

| | |
|---|-------------------------------------|
| II.3.3. En cosmétique..... | 46 |
| II.4. Classification des métabolites secondaires | 47 |
| II.4.1. Composés phénoliques..... | 47 |
| II.4.1.1. Acides phénoliques | 49 |
| II.4.1.2. Flavonoïdes | Error! Bookmark not defined. |
| II.4.1.3. Coumarines | 52 |
| II.4.1.4. Tanins..... | 52 |
| II.4.1.5. Anthocyanes..... | 53 |
| II.4.1.6. Lignanes | 54 |
| II.4.2. Terpènes | 54 |
| II.4.3. Les alcaloïdes..... | Error! Bookmark not defined. |
| II.4.4. Hétérosides..... | 56 |

Partie 2 : Etude expérimentales

Chapitre I : Matériels et méthodes

| | |
|--|-----------|
| I.1. Matériel..... | 59 |
| I.1.1. Matériel végétal..... | 59 |
| I.2. Dosage des Métabolites secondaires | 59 |
| I.2.1. Préparation des échantillons..... | 59 |
| I.2.2 Méthodes d'extraction..... | 60 |
| I.2.2.1 Extraction solide-liquide | 60 |
| I.2.2.2. Extraction en phase liquide- liquide..... | 64 |
| I.2.2.3. Rendement d'extraction | 66 |
| I.2.3. Analyse quantitative | 68 |
| I.2.3.1. Dosage de polyphénols totaux..... | 68 |
| I.2.3.2. Dosage des Flavonoides | 69 |
| I.2.3.3. Dosage des Tanins..... | 71 |

Chapitre II : Résultats et discussions

| | |
|--|-----------|
| II.1. Rendement d'extraction..... | 74 |
| II.2. L'analyse quantitative des composés phénoliques | 75 |
| II.2.1. Teneur des polyphénols totaux | 75 |
| II.2.2. Quantification des flavonoïdes | 78 |
| II.2.3. Quantification des tanins | 80 |
| Conclusion..... | 84 |
| Références bibliographiques..... | 86 |



Introduction

La majorité de la population mondiale dépend des céréales comme aliments de base. Le blé, le riz et le maïs ont été les céréales préférées, tandis que les mils ont été largement négligés, surtout à la suite de la révolution verte. Les mils représentent un groupe diversifié de graminées à petites graines cultivées pour l'alimentation humaine, animale ou fourragère (**Lata et coll., 2013 ; Lata, 2015**). Ils représentent environ une douzaine de culture espèces originaires principalement des pays du tiers monde, domestiquées et cultivées par de petits agriculteurs dans des régions semi-arides et tropicales. Les caractéristiques distinctives des mils sont leur adaptation à des conditions climatiques défavorables, l'exigence d'intrants minimales et des propriétés nutritionnelles supérieures (**Lata et coll., 2013**). Les mils sont des ressources phytogénétiques essentielles pour l'agriculture qui étend la sécurité alimentaire aux agriculteurs démunis, habitant des terres arides, infertiles, marginales et pauvres, en particulier en Asie et en Afrique. La maturation rapide et les caractéristiques de croissance à toutes saisons de ces cultures leur rendent des cultures désirables pour des systèmes de culture plus intensifs. (**Belton et Taylor, 2004**).

Les mils ont très peu besoin d'eau pour leur production et peuvent être cultivés dans des conditions non irriguées ou dans des régimes pluviométriques très faibles. Les cultures uniques telles que le riz et le blé pourraient assurer la sécurité alimentaire, mais leur coût de production reste élevé, tandis que les mils représentent des garanties multiples.

Malgré les bienfaits bien documentés du mil pour la santé en tant qu'excellente source d'éléments nutritifs et de minéraux, ils contiennent également certains anti-éléments nutritifs (communément appelés phytochimiques) qui ont une incidence négative sur sa valeur nutritive en réduisant la digestibilité des éléments nutritifs et l'absorption de minéraux. (**Sarita et Singh, 2016**).

Le présent travail a pour but de quantifier les métabolites secondaires chez la partie aérienne de la plante *Pennisetum glaucum* L. notamment les feuilles, tels que les polyphénols totaux, les flavonoïdes et les tannins par dosage spectrophotométrique de quatre extraits méthanoliques, chloroformique, n-butanolique et acétate d'éthyle.



Partie 01 :
Etude
bibliographique



Chapitre I

Le Mil

(Pennisetum glaucum (L.) R. Br.)

I.1. Le mil

I.1.1. Définition du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)

Le mil est une céréale appartenant à la famille des Poacées, communément appelée la famille de l'herbe (Yarrow, and Yarrow., 1999). Il est largement consommé dans les pays en développement à travers l'Afrique et l'Asie. Bien qu'il puisse ressembler à une graine, le profil nutritionnel du mil est semblable à celui du sorgho et d'autres céréales (Nithiyantham, et al.,2019).

Le mil a gagné en popularité en Occident parce qu'il est sans gluten et possède une teneur élevée en protéines, fibres et antioxydants (Muthamilarasan et al., 2016)

Le mil est une céréale tropicale avec une grande tolérance à la sécheresse, et c'est la septième céréale, la plus importante au monde. Il est considéré comme une culture vivrière essentielle dans les zones arides et semi-arides (Shelke et Chavan., 2010)

I.1.2. L'origine géographique du mil et sa diffusion

Des preuves archéologiques et linguistiques montrent qu'il y a environ 5 000 ans, que le mil a été domestiqué en Afrique. Et déjà cultivé par les communautés agricoles d'Afrique de l'Est (Klichowska., 1984).

La zone exacte de domestication est inconnue, et il a été suggéré qu'elle aurait pu se produire n'importe où entre l'ouest de l'Ouganda et les hautes terres éthiopiennes de l'Afrique de l'Est (de Wet., 1995). D'Afrique, la récolte a été transportée en Inde il y a environ 3 000 ans, après quoi le sous-continent est devenu son centre secondaire de diversité.

Le mil cultivé (*Eleusine coracana subsp. Coracana*) est probablement issu de la sélection et de la domestication d'un mutant à gros grains de l'espèce sauvage *E. coracana subsp. Africaine*.

La preuve de l'ascendance du mil cultivé a été fournie par des données cytologiques (Hiremath et Salimath., 1992), morphologiques (Hilu et de Wet., 1976) et moléculaires (Dida 1998 ; Hilu., 1988).

Le mil perlé est le mil le plus cultivé de tous les mils et il a le potentiel de rendement le plus élevé aussi de tous les mils en cas de sécheresse et de stress thermique. Les pays les plus importants qui cultivent le mil perlé sont l'Inde, le Niger, le Tchad, le Mali, la Tanzanie, la Chine. Il existe de nombreux autres pays qui les cultivent ; il est semé sur environ 15 millions d'hectares en Afrique et 12 millions d'hectares en Asie (Dendy., 1993).

Le mil des oiseaux se trouve en Europe, en Chine, en Inde, en Indonésie, dans la péninsule coréenne et dans l'ex-U.R.S.S.

L'éleusine (elle s'est également adaptée aux climats tempérés), connue sous le nom de ragi en Inde, est un autre aliment de base important en Afrique de l'Est et en Asie (par exemple en Inde, au Népal).

Le mil commun ou Proso est cultivé dans les climats tempérés. Il est largement cultivé en Fédération de Russie, en Ukraine, au Kazakhstan, aux États-Unis, en Argentine et en Australie.

Les mils peuvent survivre dans des zones avec aussi peu que 300 mm ou moins de précipitations saisonnières. Le besoin minimum en eau est de 400 mm pour le sorgho et de 500-600 mm pour le maïs.

I.1.3. Production dans le monde et en Algérie

I.1.3.1. Dans monde

L'Afrique et l'Asie dominent la production mondiale des mils et représentent environ 96,89 % de la production totale de mil, estimée à 27 572 961 t, suivies par l'Union européenne (1,81 %) avec une production totale d'environ 514 248 t et l'Amérique (1,18 %) avec 335 698 t, alors que seuls les pays du sous-continent australien y contribuent, estimés à 36 112 t, soit seulement 0,127 % de la production mondiale totale (**tableau 1**).

Le mil perlé représente près de la moitié de la production mondiale de mil avec 15 millions de tonnes, suivi du mil des oiseaux (5 millions de tonnes), du mil commun (4 millions de tonnes) et de l'éleusine (plus de 3 millions de tonnes) (**USDA., 2016-17**).

Le mil perlé est particulièrement une culture importante pour la sécurité alimentaire de certaines régions du monde sujettes à la sécheresse. Presque toute la production de mil pour la consommation domestique et commerciale est produite par de petits agriculteurs sur des terres marginales.

La documentation statistique pour la plupart des espèces de mil est généralement pauvre et fragmentaire. Peu d'agences nationales et internationales suivent le modèle de documentation différent pour les espèces de mil. Certaines agences combinent des données statistiques sur les mils avec le sorgho et les céréales et certaines les incluent sous « céréales secondaires ». Bien que de nombreuses statistiques ne soient que des estimations approximatives ; les analyses

dérivées de ces données doivent donc être traitées avec prudence. À l'instar de la production mondiale totale, l'Afrique et l'Asie dominent également la superficie cultivée en mil, avec une superficie estimée à 30 697 888 ha, suivies par l'Union européenne avec 344 533 ha et l'Amérique avec 166 260 ha (**tableau 1**).

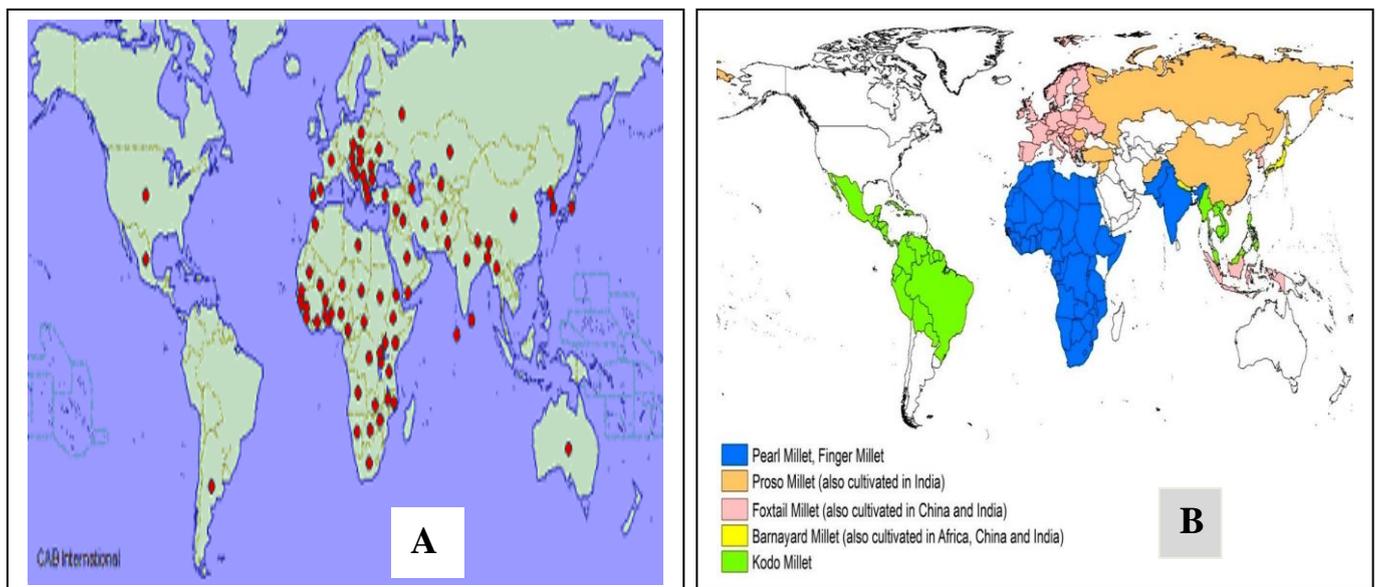
Tableau 1 : Estimation des statistiques mondiales sur le mil. (*Adapted from United States Department of Agriculture, 2016–17. Foreign Agricultural Service*)

| S. no. | Région | Zone (ha) | Production (tons) | Rendement (hg/ha) |
|--------|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1. | Asia-Africa | 30,697,888 | 27,572,961 | 11,952 |
| 2. | Europe | 344,533 | 514,248 | 19,730 |
| 3. | America | 166,260 | 335,698 | 19,721 |
| 4. | Australia | 35,750 | 36,112 | 10,101 |
| 5. | World | 31,244,432 | 28,459,020 | 9109 |

La comparaison par pays des statistiques de mil a montré la dominance de l'Inde dans la production mondiale, représentant environ 40,62% de la production totale de mil, estimée à environ 11 560 000 t suivie par le Niger (13,32%) avec une production totale de 3 790 028 t et la Chine (7,02%) avec 1 996 856 t. Sur les 10 premiers pays producteurs de mil, les pays africains (39,30%) dominent la production mondiale totale avec huit pays membres et sont estimés à environ 11 185 551 t. Depuis quelques décennies, l'Inde était le principal producteur de mil au monde. Cependant, ces dernières années, la production de mil dans les pays africains a augmenté de façon spectaculaire. Analyse des données de superficie cultivée en mil, l'**USDA** estime que l'Inde domine également avec environ 9 094 000 ha suivi du Niger (6 998 776 ha) et du Nigeria (2 212 439 ha)

Tableau 2 : Top 10 des pays producteurs de mil dans le monde (FAO, 2019)

| Sr.n° | pays | Production (000) MT | Share (%) |
|-------|--------------|---------------------|-----------|
| 1 | India | 10,235.83 | 36.08 |
| 2 | Niger | 3,270.45 | 11.53 |
| 3 | China | 2,300.00 | 8.11 |
| 4 | Nigeria | 2,000.00 | 7.05 |
| 5 | Mali | 1,878.53 | 6.62 |
| 6 | Sudan | 1,133.00 | 3.99 |
| 7 | Ethiopia | 1,125.96 | 3.97 |
| 8 | Burkina Faso | 970.18 | 3.42 |
| 9 | Senegal | 807.04 | 2.84 |
| 10 | Chad | 717.62 | 2.53 |
| | Total | 28,371.80 | |

**Figure 1 : A** : Pays producteurs de mil dans le monde (Shobana Shanmugam., 2009)**B** : Culture de différents types de mil dans le monde (FAO, 2014)

I.1.3.2. Dans l'Algérie

En Algérie, en ce qui concerne le mil, pendant la période coloniale. Ce type de grain a été trouvé par **Grando *et al.*, (2005)**

En 1998, la présence de mil a été signalée dans le désert algérien au niveau des oasis, plus précisément dans la région de l'Adrar et de Tamanrasset. Certaines variétés de mil peuvent être identifiées et décrites dans ces zones (**Bounaga *et al.*, 1988**).

En cultivant le mil comme culture comestible, les habitants de ces zones ont préservé ces ressources pendant longtemps avec diversité, et selon les agriculteurs locaux, le mil a été introduit dans les oasis de la région de l'Adrar depuis l'Antiquité (**Djabali et al., 2005**)

Il convient de mentionner que le mil a été utilisé dans ces zones sous la forme de nombreux plats culinaires tels que le couscous fabriqué à partir d'un mélange de : farine de mil, farine de blé tendre, sorgho farine, farine de maïs, soupes et galettes à base de mil et boisson au lait de mil.

Ainsi, de nombreuses études ont été menées sur cette culture pour introduire cet héritage méconnu mais menacé surtout avec sa disparation (**Rahal-Bouziane., 2008**)

I.2 Etymologie du nom Mil

C'est la source hypothétique de la preuve de son existence est fournie par : Hittite mallanzi "ils broient"

- Malesm **arménien** "J'écrase, ecchymose "
- **Grec** mylos « meule », myle « moulin »
- **Vieil anglais** melu "repas, farine"
- Miel **albanais** "farine, farine "
- **Meljo** slave de la vieille église, malu lituanien, malti "grincer"
- "marteau" molotu **russe**. (**Harper, 2016-7**)

Dérivé de *mil*, avec le suffixe *-et*, venant lui-même du latin *milium*

Du turc *mil*, issu de l'arabe *مِلَّة*, *milla*.

I.3. Nom vernaculaire

Différents noms sont attribués au mil vers le monde, le **tableau 3** récapitule les noms scientifiques et noms communs des principaux types de mil

Tableau 3 : Noms scientifiques et noms communs des principaux types de mil (Tylo r & AMP ; Emma mbux, 2008 ; Serna-Saldivar & AMP ; Rooney, 1995 ; ICRISA T, 2012 et Shahidi & AMP ; chandrasekara, 2013)

| Sr. N°. | Nom scientifique | Nom commun | Principales zones de production de céréales |
|---------|---------------------------|--|---|
| 1 | <i>Pennisetum glaucum</i> | Pear, bajra, cattail, bul rush, candlestick, sa nyo, Munga, seno | India, Western & Central Africa |
| 2 | <i>Elusine coracana</i> | Finger, ragi, African, rapoko, Hunsa, Wimbi, Koracan | India, Eastern & South Africa, Uganda |
| 3 | <i>Setaria italica</i> | Foxtail, Italian, German, Hungarian Siberian, Kangani, navane | China, India. Eastern Europe |

| | | | |
|---|-------------------------------|--|--|
| 4 | <i>Panicum milliaceum</i> | Proso, common, hog, broom, samai, Russian, Panivarigu, panic | China, Russia, Kazakhstan, Ukraine, India, Japan |
| 5 | <i>Panicum sumatrense</i> | Little, blue panic, heenmeneri | India |
| 6 | <i>Paspalum scrobiculatum</i> | Kodo, varagu, bastard, ditch, naraka, water couch, Indian paspalum, creeping pas palumm, amu | India |
| 7 | <i>Echinochola crus-galli</i> | Barnyard, Japanese, sanwa, sawan, korean, kweichou | India, China, Japan, Malaysia |
| 8 | <i>Eragrostic tef</i> | Teff, Abyssinian lovegrass | Ethiopia, Eritrea, Australia |
| 9 | <i>Digitaria exilis</i> | Fonio, fundi, hungry, rice, acha, crabgrass | West Africa, Sudan, Ethiopia, Nigeria, Mali |

Par ailleurs, en Algérie, les noms les plus populaires sont Elbechna ou Eldokhn. et qui sont appelées dans plusieurs différentes régions avec d'autres dénominations. **Tableau 4 (Rahal-Bouziane, 2016).**

Tableau 4. Dénomination internationale de mil (Rahal-Bouziane, 2016)

| Pays | Algérie | Maroc | Tunisie | Libye | France | UK/USA | Italie |
|---------------------------|--------------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|
| Dénomination Vernaculaire | الدخن/البشنة | إيلان | درع | قصب | Mil | Mil | Miglio |

I.4. Position systématique de (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)

La position systématique de la plante est décrite dans le **tableau 5** :

Tableau 5. Classification botanique de *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br (Saidou, 2011)

| Classification ancienne | | APG3 | |
|-------------------------|--------------------------------------|---------|--------------------------------|
| Régne | Plantae | Régne | Plantae |
| Division | Magnoliophyta | Clade | Angiospermes |
| Classe | Monocotylédones | Clade | Monocotylédones |
| Ordre | Cyperales | Clade | Commelinidées |
| Famille | Poaceae | Ordre | Poales |
| Sous-famille | Panicoideae | Famille | Poaceae |
| Tribu | Paniceae | Tribu | Paniceae |
| Sous-tribu | Panicineae | Genre | <i>Pennisetum</i> |
| Section | Penicillariae | Espèce | <i>Pennisetum glaucum</i> (L.) |
| Genre | <i>Pennisetum</i> | | |
| Espèce | <i>Pennisetum glaucum</i> (L.) R. Br | | |

I.5. Différents types de mil

Six différents types de mil sont sélectionnés dans différentes régions du monde (**Figure 2**)



Figure 2. Les types de mil (Subhashini *et al.*, 2020)



Figure 3. Morphologie florale des mils avec leurs noms communs et botaniques

I.5.1. PEARL MIL (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.)

I.5.1.1. Historique de PEARL MIL

Il existe peu de documents archéologiques étayés sur *Pennisetum*. Les études du genre, y compris les types sauvages et cultivés, ont pris en compte la distribution géographique, les similitudes morphologiques et les différences génétiques, tels que les isozymes et l'analyse du polymorphisme de longueur des fragments de restriction (**Andrews et Kumar, 1992 ; Tostain, 1992**).

La domestication a probablement eu lieu il y a 5 000 ans ou plus en Afrique dans la savane au sud du Sahara et à l'ouest du Nil (**Andrews et Kumar, 1992**). Comme, elle peut avoir eu lieu

Parmi différentes populations isolées au fil du temps remontant à 7500 à 7000 ans avec des indications de coexistence étroite avec les mil sauvages il y a 3000 ans ; cependant, l'intergression continue à l'heure actuelle (**Tostain., 1992**). Des différences génétiques ont été identifiées entre les types sauvages et cultivés, mais on considère que la domestication a impliqué relativement peu de gènes (**Andrews et Kumar., 1992**).

Son introduction en Inde est incertaine, mais remonte probablement à environ 3 000 ans. Il était cultivé aux États-Unis en 1873, tandis que son introduction en Amérique centrale et du Sud provenait probablement du sud de l'Europe et de la France. Sa culture s'y est plus ou moins arrêtée vers la fin du XIXe siècle. Il a été cultivé en Europe, mais son utilisation était plus importante au 19^{ème} qu'au 20^{ème} siècle (**Rachie et Majmudar., 1980**).

Le mil perlé est connu sous plusieurs noms : scirpe, quenouille et mil à pointes en anglais ; bajra en hindi ; dukhn en arabe ; et mil chandelles dans une grande partie de l'Afrique de l'Ouest et du Nord (**Rachie et Majmudar., 1980**).

I.5.1.2. Taxonomie de PEARL MIL

En 1934, Staff a divisé le genre *Pennisetum* en cinq sections : *gymnothrix*, *eupennisetum*, *penicillaria*, *heterostachya* et *brevivalvula*. Les taxons cultivés appartiennent à la section *penicillaria*, dans laquelle Staff a identifié 32 espèces, dont les six trouvées en Afrique sont les progénitures probables du mil cultivé. Ce sont toutes des espèces annuelles ; il y a une plante vivace à rhizome (*P. purpurum*). **Brunken et al. (1997)** a simplifié la taxonomie du mil perlé en regroupant la forme sauvage *P. viol aceum* (Lam.) L. et la forme cultivée *P. glaucum* dans la même espèce biologique. Ces derniers temps, le mil perlé cultivé a été connu taxonomiquement comme *P. glaucum*, *P. typhoides* et *P. americanum* (**Rachie et Majmudar., 1980**), mais actuellement connu sous le nom de *P. glaucum* (L.) R. Br. (**Andrews et Kumar, 1992**).

Les sous-espèces de mil perlé sauvages et adventices *monodii* et *stenostachyum* sont les plus utiles à croiser avec le mil perlé pour son amélioration (**Hanna, 1987**).

I.5.1.3. Distribution de PEARL MIL

Les pays les plus importants qui cultivent le mil perlé sont l'Inde, le Nigéria, le Niger, le Tchad, le Mali, la Tanzanie, l'Éthiopie, la Chine (y compris la Mandchourie) et les régions les plus sèches de l'ancienne U.R.S.S. Les petits producteurs comprennent l'Ouganda, le Burkina Faso, le Sénégal, et le Soudan (**Rachie et Majmudar., 1980**).

Il y a beaucoup d'autres pays qui cultivent la récolte, en particulier en Afrique. Les variétés à

Maturation précoce se trouvent de l'Afrique de l'Est au Mali, la plus grande diversité se trouve au Niger. Les cultivars indiens ont une similitude culturelle avec ceux trouvés en Afrique australe et ressemblent davantage aux cultivars tardifs d'Afrique de l'Ouest (**Chowdhury et Smith, 1988**).

Cinq groupes géographiquement divers ont été identifiés parmi les types sauvages d'Afrique du Nord : 1) Darfour, Soudan et l'est du Tchad ; 2) l'ouest du Tchad et du Nigeria ; 3) la région de l'Air au Niger ; 4) l'est du Mali et du Niger ; et 5) Sénégal, Mauritanie et ouest du Mali (**Tostain, 1992**). Ces groupes sont isolés les uns des autres géographiquement.

Le mil perlé est semé sur environ 15 millions d'hectares en Afrique et 12 millions d'hectares en Asie (**Riley et al., 1993**).

I.5.2. FOXTAIL MIL (*Setaria italica* (L.) P. Beauv.)

I.5.2.1. Historique de FOXTAIL MIL

Des graines de mil des oiseaux ont été trouvées dans des sites néolithiques d'Asie orientale et centrale, d'Europe et du Moyen-Orient, ce qui suggère qu'il s'agit de l'une des céréales les plus anciennes domestiquées en Eurasie. *Setaria viridis* est un ancêtre probable. Les preuves suggèrent que la domestication s'est probablement produite de l'Asie centrale à l'Europe. Le déplacement vers l'ouest, vers l'Europe et vers l'est et le sud-est de l'Asie et les îles du Pacifique a été graduel accompagné d'une différenciation des plantes. La différenciation peut avoir eu lieu en Asie de l'Est mais non pas la domestication. Découvertes du néolithique Yang-shao suggère la possibilité d'un centre d'origine chinois (**Sakamoto., 1987**).

Des graines de séttaire ont été trouvées dans les premiers sites en Suisse et en Autriche datant de 3 600 ans, et elles étaient largement utilisées comme nourriture à l'âge du bronze. Aucun reste de vulpin n'a été trouvé au Proche-Orient ou dans l'Egypte ancienne, ni dans des sites anciens en Inde (**Prasada Rao et al., 1987**).

I.5.2.2. Taxonomie de FOXTAIL MIL

La séttaire verte cultivée a été reconnue par Linnaeus en 1753 sous le nom de *Panicum italicum*. Un certain nombre de taxons ont été reconnus et introduits dans *Setaria italica* par Beauvoir en 1812.

I.5.2.3. Distribution de FOXTAIL MIL

La race *moharia* se trouve en Europe, dans le sud-est de la Russie, en Afghanistan et au Pakistan. Race *maximum* est cultivée dans l'est de la Chine, au Japon et en Corée et a été introduite aux États-Unis. Il est également présent au Népal et en Assam, dans les contreforts de l'Himalaya,

dans le nord de l'Inde et en Géorgie dans l'ex-URSS.

La race *indica* se trouve dans toute l'Inde et au Sri Lanka et est probablement issue de croisements entre *moharia* et *maxima* (Prasada Rao *et al.*, 1987).

I.5.3. FINGER MIL (*Eleusine coracana* L. Gaertn. Subsp. *Coracana*).

I.5.3.1. Historique de la plante FINGER MIL

L'éleusine est le deuxième mil le plus important en Afrique après le mil perlé. Il a été domestiqué en Afrique, avec des archives archéologiques remontant à environ 3 000 ans. À peu près à la même période, il a été introduit en Inde. Cinq races sont reconnues et sont probablement toutes nées en Afrique ; il y a eu peu de diversification en Inde (De Wet., 1978).

I.5.3.2. Taxonomie de la plante FINGER MIL

L'hybride entre les sous-espèces *africana* et *coracana* forme des graines qui se produisent avec la culture cultivée en Afrique. Ces hybrides appartiennent à la race *spontanea*.

I.5.3.3. Distribution de FINGER MIL

L'éleusine est cultivée de manière plus intensive autour du lac Victoria en Afrique de l'Est, dans les parties sud-est du Karanataka, certaines parties du Tamil Nadu et de l'Andhra Pradesh dans le sud de l'Inde et au Népal.

En Afrique de l'Est, l'éleusine se trouve le plus souvent en Ouganda, en Tanzanie, au Rwanda, au Burundi, dans l'est du Zaïre, au Kenya et, dans une moindre mesure, en Éthiopie, au Soudan et en Somalie.

Il est également cultivé au Zimbabwe, au Malawi, en Zambie, en Tanzanie, au Botswana et à Madagascar (Gupta *et al.*, 1986). C'est une culture mineure disséminée dans les provinces du sud et du sud-ouest de la Chine (Jiaju, 1986). Il est cultivé dans une mesure limitée au Bangladesh (Majid *et al.*, 1986) et au Sri Lanka (Ponnuthurai, 1989).

I.5.4. PROSO (*Panicum miliaceum* (L.))

I.5.4.1. Historique de PROSO

L'ancêtre Wild du proso n'a pas encore été identifié de manière satisfaisante, mais il est probable qu'une domestication ait eu lieu en Mandchourie (de Wet., 1986).

Les formes adventices se propagent du bassin de la Caspienne d'Aralo au Sinkiang et à la Mongolie. Plus récemment, ces types sauvages se sont répandus en Europe et en Amérique du Nord. Les premiers vestiges de proso ont été datés du Ve millénaire av. en Europe orientale et centrale (Zohary et Hopf., 1988).

Des sites ont été découverts en Ukraine, en Tchécoslovaquie et en Allemagne. D'autres découvertes datant de la même période ont eu lieu en Géorgie. Découvertes au quatrième millénaire av. inclure la Yougoslavie, et au Néolithique Yang Shao villages du nord de la Chine. Proso a probablement été introduit en Europe il y a au moins 3 000 ans ; des restes d'épillets et de fleurons ont été trouvés dans les premiers sites agricoles datés d'environ 1600 av. (**de Wet, 1986**). Elle est apparue après cette période au Proche-Orient et en Inde (**Zohary et Hopf., 1988**).

I.5.4.2. Taxonomie de PROSO

La race *miliaceum* ressemble au *Panicum miliaceum* sauvage par les caractéristiques de la panicule. Les autres races ont des caractéristiques morphologiques différentes.

I.5.4.3. Distribution de PROSO

Le proso est important dans le nord-ouest de la Chine, étant la culture principale dans certaines régions. Il est moins utilisé dans le nord-est à Mongolie intérieure, Shanxi, Gansu, Ningxia et Heilong jing (**Jiaju, 1986**).

Les principales zones de culture de l'ex-URSS se trouvent dans la région de la Volga et dans certaines parties du Kazakhstan (**Illyin et Zolotukin, 1986**).

I.5.5. LITTLE MIL (*Panicum sumatrense* Roth. ex Roem. & Schult.)

I.5.5.1. Taxonomie de LITTLE MIL

L'espèce *psilopodium* comprend l'ancêtre sauvage de *P. sumatrense* (sarna). Les deux sous-espèces se croisent pour produire des hybrides fertiles, que l'on trouve souvent comme mauvaises herbes dans les champs de sarna (**Prasada Rao et al., 1991**).

Le comportement méiotique des croisements suggère que les génomes des deux espèces sont similaires (**Hiremath et al., 1980**).

I.5.5.2. Distribution de LITTLE MIL

Sarna est cultivé dans une grande partie de l'Inde, au Népal et dans l'ouest de Bunna. Il revêt une importance particulière dans les Ghâts orientaux de l'Inde. La race robusta est cultivée dans le nord-ouest de l'Andhra Pradesh et dans une partie de l'Orissa où elle se croise avec la race nana. La sous-espèce *psilopodium* est distribuée du Sri Lanka au Pakistan et vers l'est jusqu'en Indonésie.

I.5.6. KODO MIL (*Paspalum scrobiculatum* L.)

I.5.6.1. Historique de KODO MIL

Le mil kodo a été domestiqué en Inde il y a près de 3 000 ans. L'espèce se trouve dans tout l'Ancien Monde dans les habitats humides des tropiques et des subtropiques. Le croisement se produit facilement entre les races cultivées et les mauvaises herbes, et les semences des hybrides sont récoltées avec celles de la culture semée ; par conséquent, la différenciation raciale n'est pas nette malgré les années de culture en Inde (**De Wet, 1986**).

I.5.6.2. Taxonomie de KODO MIL

Paspalum orbiculare et *Paspalum commersonii* sont des types sauvages. On pense que *Paspalum commersonii* est apomictique et d'origine hybride (**Christopher et al., 1987**).

Les espèces sauvages adventices et cultivées se confondent dans tous les caractères évalués à des fins taxonomiques (**Prasada Rao et al., 1991**).

Cependant, des irrégularités dans la méiose des croisements soutiennent l'identification des trois espèces (**Christopher et al, 1987**).

I.5.6.3. Distribution de KODO MIL

Paspalum scrobiculatum est largement répandu dans les tropiques de l'Ancien Monde, en particulier dans les zones humides. C'est une céréale sauvage, elle est récoltée en Afrique de l'Ouest et en Inde. Elle est largement répandue en Inde, du Tamil Nadu et du Kerala au sud au Rajasthan et au Bengale occidental au nord (**De Wet, 1986**). Le kodo est cultivé dans une mesure limitée au Bangladesh (**Majid et al., 1986**).

I.6. Caractérisation botanique et morphologique

I.6.1. Caractérisation Botanique

Le mil est un type de graminée annuelle. C'est la seule espèce diploïde de la section *Penicillaria* du genre *Pennisetum* dans la famille Poaceae, sous-famille Panicoideae, tribu Paniceae, avec $x = 7$ ($2n = 14$ chromosomes) (**Tostain et Marchais, 1993**).

Le millet est une plante allogame, bisexuelle, hermaphrodite avec une protogynie prononcée (**Andrews, 1993 ; Do, 1994**).

Le mil a un port dressé et des tiges épaisses. A maturité, la plante peut atteindre une hauteur de 1 à 6 m, selon la variété. Chaque nœud de la tige contient un bourgeon axillaire, qui peut donner naissance à une pousse axillaire dans certaines conditions (pousse aérienne). Des racines adventives émergent des nœuds à la base de chaque tige (figure 4). Le tallage est important et peut atteindre 40 tiges. (**Vietmeyer, 1996**)



Figure 4. Plante de mil avec plusieurs talles

I.6.2. Morphologie de la plante

Le mil est une plante érigée aux tiges épaisses qui atteint une hauteur de 1,5 à 3 mètres, mais le mil peut atteindre une hauteur de 4 mètres (Moumouni, 2014).

Le système racinaire est groupé, avec une seule racine principale de graine suivie de plusieurs racines adventives. La formation importante des racines du mil, qui peut atteindre une profondeur de 300 cm à la récolte, est l'une des raisons pour lesquelles il s'adapte si bien aux conditions épidémiologiques des zones semi-arides (Ahmadi *et al.*, 2002 ; ROCAFREMI,2002)

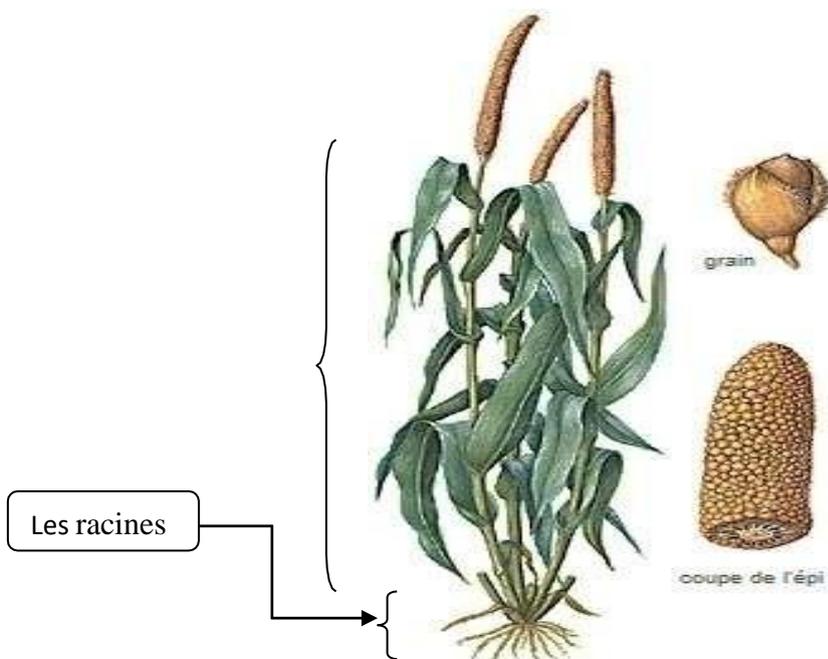


Figure 5. Éléments de mil chandelles

I.6.2.1. L'appareil racinaire

Les tiges du mil sont droites et rigides, avec des entrenœuds fermes (**Bouzou, 2009**). Les entrenœuds de base sont longs au début et courts à la fin. Des talles secondaires et tertiaires peuvent être générées par le nœud de base. Le nombre de divisions productives varie entre un et sept (**Anonyme, 2004**). Les chandelles de mil envoient occasionnellement des branches pour former de petits épis (**Illiassou, 2009**).

I.6.2.2. L'appareil végétatif

❖ Dans les nœuds, **les feuilles** à nervures parallèles sont utilisées en alternance. Elles sont constituées d'un fourreau et d'un limbe lancéolé qui entoure complètement le manche (**anonyme, 2004**). Ses feuilles, qui peuvent atteindre 1 m de long, sont nues, légèrement minces, lisses ou velues.

❖ **Les inflorescences** sont des épis apicaux cylindriques et coniques, durs et compacts. Il mesure généralement 2-3 cm de diamètre et 15-45 cm de longueur, mais il peut atteindre 18 cm de diamètre et 15-45 cm de longueur. Cependant, certaines variétés locales (Zongo du Nigeria) peuvent atteindre 150 cm de haut. (**Anonyme, 2004 ; Moumouni, 2014 ; Hamadou, 2015**). Dans le descripteur du mil, on trouve 9 formes (**Figure 6**) de panicule (**IBPGR & ICRISAT, 1993**).

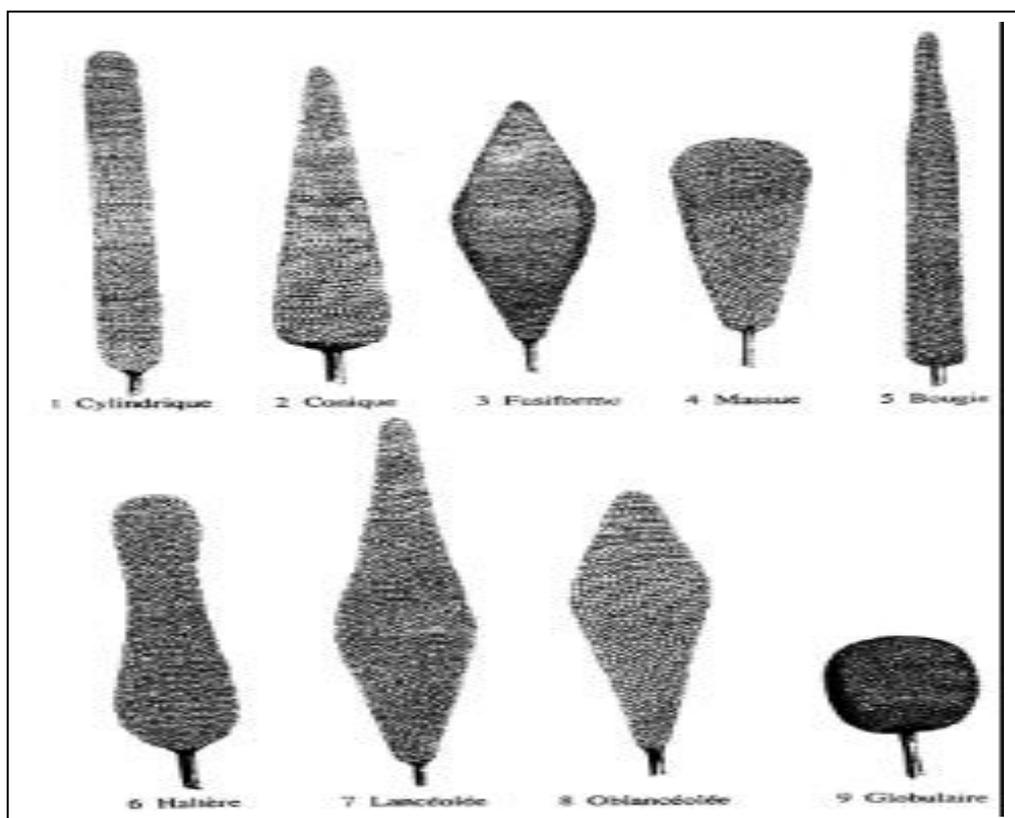


Figure 6. Formes de la panicule du mil (**IBPGR & ICRISAT., 1993**)

❖ **La panicule** est constituée d'un rachis (axe central) droit, cylindrique, dur et de 8 à 9 mm d'épaisseur. Il s'étend sur toute la longueur de l'inflorescence. Il est mou et recouvert de poils courts. Ces pédicelles possèdent une gaine intégrée au sommet du pédicelle, qui est constituée d'un faisceau de soies avec des épillets (Loumerem, 2004). Chaque panicule peut produire 870 à 3000 épillets, avec une moyenne de 1600. Les épillets peuvent être uniflores, biflores, triflores, ou avoir jusqu'à six fleurs. Chaque épillet est composé de deux (2) glumes : une glume inférieure courte, plus large que longue, et une glume supérieure plus longue qui fait environ la moitié de la longueur de l'épillet. La glume supérieure est ovale et possède trois ou quatre nervures. Certaines fleurs des épillets sont fertiles et produisent des caryopses

❖ Les caryopses sont enfermés dans des glumes et des glumelles pour former les fruits. Les graines mesurent de 3 à 5 mm de long et sont de forme obovale à globulaire (**Figure 7**). (**IBPGR & ICRISAT, 1993**). Les teintes vont du gris cendré au bleu clair. Certaines couleurs comprennent le brun grisâtre, le beige et même le noir. (**Figure 8**).

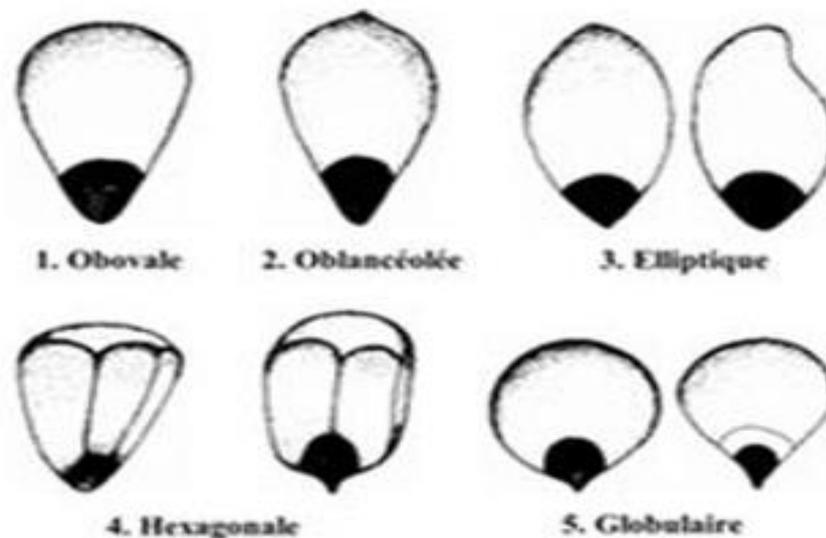


Figure 7. Formes du grain du mil (IBPGR & ICRISAT., 1993)



Figure 8. Classes de couleurs de grains de mil (Haussmann, 2007).

I.7. Croissance et développement

Le cycle de croissance du mil peut être subdivisé en trois phases : végétative, reproductive et maturation des grains (Figure 9)

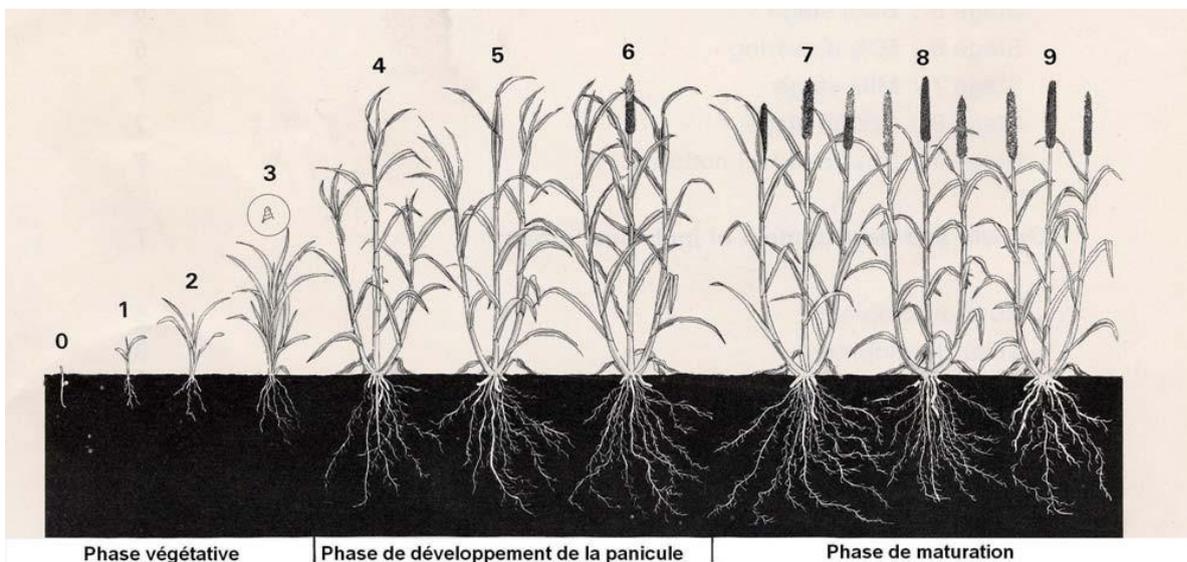


Figure 9. Phases de la croissance et de développement du mil (Maiti et Bidinger, 1981)

I.7.1. Phase végétative

La phase végétative dure 30 à 50 jours de la levée à la formation de la panicule. Elle commence par la germination de la graine et l'apparition des jeunes plantes, le tallage et se poursuit jusqu'au début de la panicule (Maiti et Bidinger, 1981).

La germination s'est produite très rapidement dans des sols généralement chauds (20°C ou plus) et humides, et la germination prend généralement 2 à 3 jours. La graine gonfle, puis le tégument se brise, à mesure que la peau et la racine principale se détachent. La gaine du bourgeon primaire est allongée, commence à émerger du sol et la première feuille apparaît rapidement, le mésocotyle se développe pendant cette période et un nœud se forme à partir de la base de la gaine du bourgeon primaire juste en dessous de la surface du sol 6-7 jours après l'apparition de la gaine du bourgeon primaire. Ensuite, les racines secondaires commencent à se développer aux nœuds, où elles diffèrent en diamètre de la racine principale (étant plus grandes) et le point de départ est à la base de la tige. Leur nombre varie de 3 à 5 tiges. Ces racines se développent rapidement pour fournir à la plante de l'eau et des nutriments tout au long de son cycle de vie.

Le tallage, la libération des bourgeons secondaires commençant par les bourgeons primaires, commence 15 jours après l'émergence et dure 10 à 20 jours. A ce stade, l'accumulation de biomasse affecte principalement les feuilles et le système racinaire (Figure 10) (Inconnu, 2004).

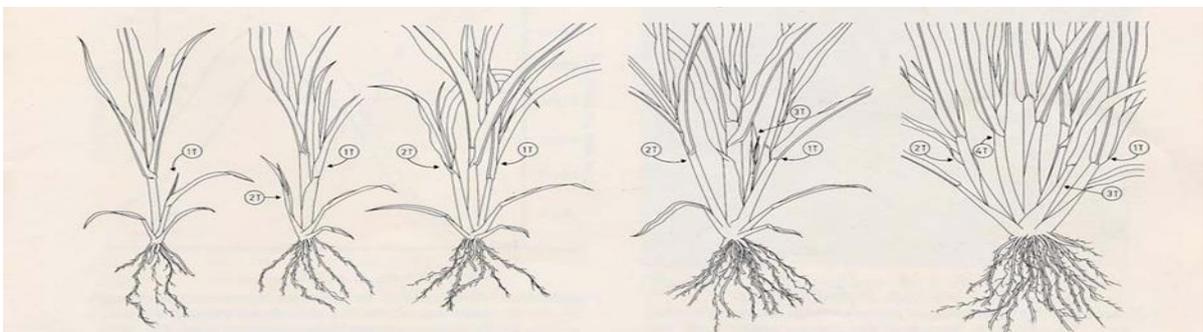


Figure 10 : Le développement de talles : 1T= la première talle, 2T= la deuxième talle, etc. (Maiti & Bidinger, 1981)

Le tallage est l'élongation séquentielle des entre-nœuds en commençant par la base, ce qui entraîne l'allongement de la tige. Les talles passent par les mêmes étapes que la tige principale, mais avec un léger retard (Loumerem, 2004). L'accumulation de biomasse touche aussi bien la tige que les racines et les feuilles (Anonyme, 2004). La transformation du bourgeon végétatif apical en bourgeon floral, synonyme du début d'une phase suivante, marque l'initiation de la panicule.

I.7.2. Phase de reproduction

Elle commence entre 22 et 30 jours après l'émergence avec l'initiation de la panicule de la tige principale (**Anonyme, 2004**). Ce stade comprend l'épiaison, la floraison et la fructification. Il dure de 18 à 25 jours selon les variétés et se distingue par le développement complet des feuilles ainsi que par la sénescence des feuilles à la base de la tige principale (Loumerem, 2004).

Pendant la montaison, la feuille paniculaire se gonfle dans la gaine 6 à 10 jours avant l'émergence de la panicule (= épi). La panicule subit une série de changements, notamment la différenciation de l'épillet, de la glume, du stigmate de la fleur et de l'anthere. Les parties femelles des fleurs s'ouvrent en premier, exposant les stigmates bifides blanchâtres, dès que l'épi émerge (épiaison). Les parties femelles des fleurs sont les premières à s'ouvrir, révélant les stigmates bifides blanchâtres. Les anthères ne s'ouvrent que trois à cinq jours après l'émergence de l'épi : c'est la floraison (**Anonyme, 2004 ; Loumerem, 2004**). Le pollen des anthères ouvertes sur d'autres épis, en général, fertilise les ovaires de ceux qui émergent sous l'effet du vent, des insectes ou d'autres sources de pollinisation.

La fécondation donne naissance à l'ovule, qui produit la graine : on parle alors de fructification ou de corps fructifère. L'épi finit par former une masse allongée à l'intérieur de la feuille paniculaire au sommet de la tige.

I.7.3. Phase de maturation

La maturation est le développement progressif du caryopse ou fruit, de l'extrémité de l'épi à sa base. Cette phase commence avec la fécondation des fleurs de la panicule principale et se poursuit jusqu'à la maturation de la plante entière (tige principale et talles). (**Loumerem, 2004**).

Selon le type, les grains arrivent généralement à maturité 22 à 30 jours après la fertilisation.

Comme les talles se développent tardivement, l'accumulation de biomasse se produit principalement dans les caryopses mais peut se poursuivre dans d'autres parties (**Anonyme, 2004**).

Dans d'autres régions, en raison du développement tardif des talles (**Anonyme, 2004**). C'est une étape de développement des substances de réserve (amidon, protéines), de leur migration vers l'albumen du grain et de la formation de l'embryon (**Loumerem, 2004**). Les grains atteignent la maturité physiologique 20 à 50 jours après la floraison, selon les variétés, après être passés par trois stades (laiteux, cireux et vitreux) (**Dutordoir, 2006**). Les grains présentent des caractéristiques différentes du stade laiteux à la pleine maturité (**Moumouni, 2014**) :

- À ce stade, le grain est brun verdâtre et laiteux.

- Stade cireux ou pâteux : le grain a presque atteint son aspect définitif, et son contenu est pâteux.
- À pleine maturité, le grain est dur et ne peut être cassé avec l'ongle. La déshydratation naturelle est à son maximum. À ce stade, le grain a atteint sa couleur et sa taille définitive.

I.8. Exigences environnementales

Les mils pénicillaires sont des graminées semi-arides avec des températures moyennes de 28°C pendant la saison de croissance de trois à six mois (**Ahmadi et al. 2002**). Le mil pousse mieux à des températures comprises entre 27 et 30 degrés Celsius. Le mil est une plante à jours courts, bien que certaines variétés ne soient pas affectées par la longueur du jour. Une journée de 12 heures et des températures comprises entre 28 et 30°C sont idéales pour la croissance des cultures (**Upadhyaya et al., 2008**). Le mil pousse mieux à des températures allant de 2050 à 2550°C. Les températures de germination varient de 10 à 12 degrés Celsius (minimum), 37 à 44 degrés Celsius (optimum), et 44 à 50 degrés Celsius (maximum) (**Loumerem., 2004**).

Le mil, qui est moins exigeant que le sorgho, est généralement cultivé dans des sols argilo-sableux légers, bien drainés et à faible pH. Il peut résister à la sécheresse et à une faible fertilité du sol (**Ahmadi et al., 2002**).

Le mil est principalement cultivé au Niger sur des terres dunaires légères et sablonneuses à faible fertilité. On le trouve parfois sur des terres plus fertiles, comme les terrasses sablo-argileuses ou les terres autour des cases qui sont principalement réservées au maïs et occasionnellement au sorgho (**Moumouni, 2014**). Il ne tolère pas les excès d'eau dans les bas-fonds. Le mil pousse mal ou pas du tout sur les sols durs, lourds et dégradés (**Illiassou, 2009**).

Une pluviométrie annuelle de 350 à 500 mm, répartie uniformément sur au moins 75 jours, peut assurer une bonne récolte de mil (**Upadhyaya et al., 2008**). **Moumouni (2014)** a constaté que les mils tardifs se trouvent surtout entre 600 et 1000 mm de précipitations, tandis que les mils précoces se trouvent surtout entre 350 et 600 mm de précipitations. Les faibles précipitations et l'humidité relative sont des conditions idéales pour le mûrissement et la maturation des graines (**Upadhyaya et al., 2008**). Sur les sols à faible teneur en matière organique, la culture se fait généralement sans irrigation. Les rendements sont faibles (moins de 1 tonne/ha) dans ces conditions de culture extensive.

I.9. Contraintes à la production du mil

De nombreuses contraintes pèsent sur la production céréalière, notamment celle du mil. Elles sont à l'origine de la baisse des rendements du mil observée en milieu paysan. Toutes ces contraintes peuvent être classées comme abiotiques ou biotiques.

I.9.1. Contraintes abiotiques

Les rendements du mil sont réduits en raison d'un manque de bilan hydrique, ainsi que d'un déclin progressif de la fertilité des sols, de la culture de terres marginales et de l'absence de jachères (BA et al. 2014 ; Zakari et al., 2016). En effet, la pluviométrie varie considérablement dans les zones semi-arides où le mil est couramment cultivé. Au Niger, cette variabilité varie de 200 à 800 mm par année (Moumouni., 2014). La forte croissance démographique au Niger accélère la surexploitation des sols, entraînant un appauvrissement des terres cultivées et, par conséquent, des rendements de plus en plus faibles. Face à la dégradation généralisée de la fertilité des sols, les agriculteurs ont couramment recours à l'aménagement de nouvelles terres cultivées (terres marginales) qui ne sont pas utilisées pour l'agriculture (FAO, 2009). La variabilité des dates de semis en début de saison, les semis secs en cas de retard des pluies, les sécheresses potentielles en cours de saison et le peu d'intrants apportés au sol par les agriculteurs sont autant de contraintes importantes pour la croissance des plantes.

I.9.2. Contraintes biotiques

Outre les contraintes abiotiques, la pression parasitaire est un obstacle majeur à l'augmentation de la production de mil. En effet, le mil est en proie à une variété de ravageurs et d'ennemis, y compris les maladies, les insectes, les mauvaises herbes et les oiseaux.

I.10. Maladies

Les maladies (virus, champignons, bactéries, nématodes et autres) entraînent des pertes de rendement importantes, les maladies fongiques étant les plus graves. Le mildiou, le charbon et l'ergot sont des exemples de ces maladies.

- Mildiou du mil

La maladie la plus grave du mil en Inde et en Afrique de l'Ouest est le mildiou causé par le champignon *Sclerospora graminicola* (Sacc.) Schröet (Jogaiah et al., 2008 ; Sudhakar et al., 2012). Butler a été le premier à signaler la maladie (1907). C'est une maladie très destructrice que l'on retrouve dans la majorité des zones de culture du millet en Asie et en Afrique (Aparna, 2003 ; Thakur et al., 2008). La brûlure du millet peut entraîner des pertes de rendement de 20 à 40 %. (Thakur et al., 2011). Elle attaque la plante du semis à l'âge adulte, en s'attaquant aux

feuilles, à la tige et à l'épi. La maladie se distingue par la transformation partielle ou totale de l'épi en organes feuillus ou par la mort de la plante. Plusieurs études sur la lutte contre le mildiou du mil ont été menées en Afrique et en Inde. La majorité de ces études se sont concentrées sur la résistance des variétés et la lutte chimique (**Wilson et al. 2008 ; Ati et al., 2015**).

I.10.1. Charbon du mil

Le charbon, causé par *Tolyposporium peniciluriae* (Bref.) Vanky, est la deuxième maladie la plus courante après le mildiou. Cependant, son impact sur les rendements varie d'une région à l'autre et d'une année à l'autre (**Mbaye, 1993**). Elle provoque des pertes directes de grains en les remplaçant par des plaies charbonneuses, qui sont des structures remplies de téliosporos. Ces pertes de rendement peuvent atteindre jusqu'à 30%. (**Thakur et King, 1988a**). Les grains individuels sont remplacés par des sacs ovales qui sont plus longs que les grains. À maturité, ces sacs sont vert foncé et deviennent bruns ou noirs. La maladie est limitée à l'épi et pénètre dans la plante par le stigmate pendant la floraison. Le smut est principalement contrôlé par la plantation de variétés résistantes ou tolérantes, ainsi que par l'arrachage et le brûlage des plantes affectées (**Moumouni, 2014**).

I.10.2. Ergot du mil

Claviceps fusiformis provoque la maladie de l'ergot ou du millet doux. Il s'agit d'une maladie courante en Asie et en Afrique. L'ergot est la troisième maladie du mil la plus importante au Sahel. La plante est attaquée dès sa floraison et se distingue par un écoulement d'exsudats visqueux, au goût sucré mais toxique, provenant des ovaires. A la place des graines, des sclérotés se forment sur la bougie (**Mbaye, 1993**). Les pertes de rendement en grains peuvent atteindre 58 à 70 % dans des conditions favorables à la maladie (humidité relative élevée et longue protogynie), selon la variété cultivée (**Mbaye, 1993**). Les grains de millet infectés par l'ergot provoquent une intoxication et une somnolence chez l'individu (humain ou animal) qui les consomme. Les méthodes de lutte les plus courantes sont l'utilisation de variétés résistantes ou tolérantes, ainsi que l'arrachage et le brûlage des plantes atteintes.

I.10.3. Insectes nuisibles au mil

Le mil est attaqué par un plus petit nombre d'insectes que les autres céréales. Cependant, ils peuvent être très importants dans certaines zones de production ouest-africaines (**Nomaou et al., 2015**). Selon **Gahukar (1990)**, les principaux insectes ravageurs du mil peuvent être répartis en cinq catégories : les ravageurs de semis, les foreurs de tiges, les insectes phyllophages, les

Ravageurs d'épis ou de chandelles et les insectes de souche. Certains de ces ravageurs ont été signalés comme étant extrêmement coûteux sur le plan économique. Il s'agit du ver de l'oreille, des foreurs de tige et des criquets.

- Chenille mineuse de l'épi

Heliocheilus albipunctella (De Joannis) a été décrit pour la première fois comme *Raghuva albipunctella* par **Joannis en 1925**. (**Gaikobi, 1995**). Dans le sud du Niger, c'est un papillon commun. Pendant l'émergence et la floraison des épis de mil, la femelle pond ses œufs. Après l'éclosion, les chenilles restent sur l'épi et se nourrissent des grains, creusant une mine autour du rachis de l'épi pour terminer leur développement. Lorsqu'elles atteignent la maturité, elles tombent près de la plante et s'enfouissent dans le sol pour se nymphoser. Jusqu'à 70 % des épis peuvent être attaqués, ce qui entraîne des pertes de rendement pouvant atteindre 15 %. (**Youm et Owusu., 1998**). Selon **Krall et al., (1995)**, ce ravageur provoque des pertes de rendement de 8 à 95 % dans la zone sahélienne.

- Foreurs des tiges du mil

Entre un mois et demi et la récolte, une dizaine d'espèces de foreurs de tiges attaquent le millet. *Acigona* (*Coniesta*) *ignefusalis* et *Sesamia calamistis* se sont avérées être les plus dangereuses de ces espèces (**Hampson**). La première est plus importante dans les variétés précoces, tandis que la seconde est plus importante dans les variétés tardives (**Ndoye, 1982**). *C. ignefusalis* est l'espèce la plus abondante, et c'est un ennemi redoutable du mil dans les zones sahélienne et soudanienne de l'Afrique de l'Ouest (**Youm et al., 1998 ; David, 2000 ; Tanzubil et Mensah, 2000**). Les larves du papillon détruisent les feuilles au niveau de la corne et percent la moelle à travers les veines principales de la tige. Pendant la saison sèche, les larves hibernent dans la tige jusqu'à la saison suivante. La gravité et la nature des dégâts sont déterminées par la date de semis et le moment de l'infestation, selon **Drame-Yaye et al., (2003)**. Acridiens Le mil est attaqué par un grand nombre d'espèces acridiennes (Criquets et Sauterelles), dont une vingtaine sont susceptibles d'être économiquement significatives compte tenu de l'importance des dégâts qu'elles causent (**Launois., 1978**). Parmi les Sauterelles, *Oedaleus senegalensis* (**Krauss**) cause des pertes financières importantes aux agriculteurs en raison de son abondance, de sa capacité à migrer et des dégâts qu'il cause aux cultures en général et au mil en particulier. Cet insecte vit dans la zone tropicale sèche et s'aventure rarement dans les zones désertiques ou la zone tropicale humide (**Mbaye, 1993**). Pendant la croissance végétative, l'invasion est plus sévère que pendant le développement du grain. Cependant, ce type de criquet n'est grégaire qu'occasionnellement (**Moumouni, 2014**). Le criquet pèlerin, *Schistocerca gregaria*, est l'espèce

De criquet la plus dangereuse (Forsk.). Il forme fréquemment des essaims dévastateurs qui peuvent parcourir de longues distances. Lorsqu'une population atteint une certaine densité, des migrations se produisent. Cela rend cette espèce unique par sa capacité à passer d'un comportement solitaire à un comportement grégaire (**Obeng-Ofori et al., 1993**). Ce criquet mange chaque jour son poids en verdure et ravage tout ce qui est vert sur son passage. En cas d'invasion, le criquet peut provoquer des pertes de mil allant jusqu'à 100%. (**Mbaye., 1993**).

I.10.4. Adventices

Les mauvaises herbes constituent un problème majeur pour la culture du mil dans la zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest. Le mil est généralement menacé par trois types d'adventices : les dicotylédones annuelles, les graminées annuelles (le groupe d'adventices le plus important affectant le mil), et les *Cyperaceae* (**Carson., 1988**). Au Sahel, elles provoquent des pertes de rendement d'environ 30%. (**Lagoke et al., 1988**). *Striga hermonthica* (Del.) Bent. est l'un des principaux facteurs responsables de la diminution du rendement du mil dans la zone sahélienne (**Mbaye, 1993**). C'est une plante parasite obligée qui se nourrit de mil. Elle infeste plus de 40% des zones de production céréalière et provoque des pertes de rendement de 90% à 100% certaines années (**Wilson et al., 2000**). Les infestations par *S. hermonthica* peuvent être gérées en réduisant la quantité de graines dans le sol et en augmentant la fertilité du sol par des techniques culturales (**Wilson et al., 2004**).

I.10.5. Oiseaux

Les attaques d'oiseaux sur les épis de mil sont fréquentes et causent des dégâts importants. Les dégâts des oiseaux granivores sont particulièrement importants dans les vallées et bassins fluviaux (fleuve Sénégal, boucle du Niger et bassin du lac Tchad). *Quelea* (ouvrier à bec rouge), *Q. erythrops* (ouvrier à tête rouge), *Ploceus cucumillatus* (gendarme), et *Passé luteus* sont les espèces les plus dangereuses (moineau doré). Ces espèces sont polyphages, et le pourcentage de dégâts sur le mil varie de 10 à 30%, et parfois plus, surtout sur les variétés précoces qui mûrissent avant les autres (**Mbaye, 1993**).

I.11. La relation entre le stress et le mil

I.11.1. Impact du stress abiotique chez les mils

La salinisation des terres arables due à des systèmes de drainage inadéquats, à des roches sous-jacentes à forte teneur en sel, à l'irrigation des cultures dans les régions arides et semi-arides avec

De l'eau salée et au manque d'eau de bonne qualité due au manque de précipitations affecte les caractéristiques du sol. La salinité du sol a rendu les terres agricoles sans valeur et a eu un impact dangereux sur la croissance de nombreuses plantes.

Les ions Na^+ et Cl^- présents dans une eau de mauvaise qualité sont à des niveaux excessifs et provoquent des dommages osmotiques, une toxicité spécifique aux ions et des troubles nutritionnels chez les plantes conduisant au stress de salinité (**Flowers et Yeo, 1989 ; Neocleous et al., 2017**). Trente-trois pour cent des terres agricoles irriguées mondiales et 20 % des terres cultivables sont affectées par la salinité, et cela peut augmenter jusqu'à 50 % d'ici 2050 (**Mustafa et al., 2019**)

Le stress de salinité entraîne une réduction du RWC qui pourrait être due au stress osmotique dans les racines causées par une teneur élevée en sel. Cela limite l'absorption d'eau et conduit à la déshydratation (**Makarana et al., 2019**). L'éleusine, qui est modérément tolérante au stress salin, a montré une diminution (1) du poids sec des pousses, du nombre de feuilles, de la surface foliaire et de la teneur en chlorophylle des feuilles, et une augmentation de (2) la succulence des feuilles, la destruction du chloroplaste, la chlorose des feuilles, dommages graves aux tissus, lignification des vaisseaux du xylème, fuite d'électrolyte, teneur en peroxyde d'hydrogène et en proline en cas d'augmentation de la salinité (**Satish et al., 2016**). En outre, le stress de salinité chez l'éleusine a entraîné une réduction des taux de germination, de la croissance des racines et des pousses, de la teneur en chlorophylle, de la teneur relative en eau des feuilles et de la concentration en K^+ des feuilles, ainsi que de la chlorose et une augmentation de la teneur en sel et en Malonaldéhyde (**Mukami et al., 2020**)

La salinisation et l'alcalinisation ont entraîné une réduction du poids sec des plantes, du taux de croissance relatif (RGR), du taux d'assimilation nette (NAR), du rapport de surface foliaire (LAR), du RWC et de l'azote dans le mil des oiseaux et les mil communs. Cependant, les effets néfastes étaient plus importants sur le vulpin que sur les mil communs, ce qui indique que le mil communs est plus tolérant aux deux stress (**Islamet al., 2011**).

Il a été signalé que les accessions tolérantes de mil communs étaient riches en chlorophylle a dans des conditions salines. La teneur en chlorophylle a peut-être lié à la tolérance au sel du mil commun (*Panicum miliaceum*). La tolérance au sel d'une espèce végétale détermine le degré de réduction de la chlorophylle totale (**Sabir et al., 2009**).

La sécheresse, qui entraîne une grave pénurie d'eau, a des effets dévastateurs sur la productivité des cultures. La fermeture stomatique due à la sécheresse entraîne une accumulation excessive de ROS conduisant à un stress oxydatif. Ce stress entraîne une peroxydation des lipides et des

Dommages aux autres biomolécules (**Bhatt et al., 2011**).

L'acide abscissique (ABA) et l'éthylène (ET) font partie des phytohormones souvent impliquées dans la signalisation et la tolérance au stress hydrique. L'acide salicylique (SA) et l'acide jasmonique (JA) améliore la tolérance des plantes contre la sécheresse, la salinité et les stress thermiques (**Tiwari et al., 2017**)

Le stress dû à la sécheresse chez le mil perlé a entraîné une réduction significative de la hauteur des plantes, de la biomasse végétale, du poids des plantes et du nombre de grains (**Debieu et al., 2018**).

Le stress hydrique sur l'éleusine noire et brune a entraîné une diminution de la chlorophylle, de la photosynthèse et du RWC, et une augmentation de la teneur en proline ; l'éleusine brune a montré des niveaux de tolérance plus élevés que l'éleusine noire (**Khatoon et Singh., 2016**).

Le stress oxydatif induit par la sécheresse chez l'éleusine a entraîné des pousses tombantes, un enroulement des feuilles, une augmentation de la teneur en proline et en malondialdéhyde (MDA), une fuite d'électrolytes, une intégrité membranaire endommagée et une augmentation significative de H₂O₂. La sécheresse a entraîné une augmentation des activités des enzymes antioxydantes telles que la glutathion réductase (GR), le superoxyde dismutase (SOD), l'ascorbate peroxydase (APX), la glutathion peroxydase (GPX) et la catalase (CAT) (**Bhatt et al., 2011**)

I.11.2. Adaptations morphologiques au stress

Le cycle de vie court et la hauteur des plantes, les petites surfaces foliaires, les parois cellulaires épaissies et les systèmes racinaires denses sont divers traits qui aident les mils à résister au stress. Être des plantes C₄ est très avantageux car cela augmente l'efficacité de l'utilisation de l'eau (WUE) et l'efficacité de l'utilisation de l'azote (NUE) (**Bandyopadhyay et al., 2017**)

La floraison du mil perlé peut changer avec le régime des précipitations (**Bidinger et al., 2007**). Une augmentation de la longueur des racines et une diminution de la longueur des pousses ont été observées chez *Panicum sumatrense* subissant des traitements de sécheresse (**Ajithkumar et Panneerselvam., 2014**). Il a en outre été rapporté que le mil perlé est composé d'un système racinaire primaire à croissance rapide et d'une colonisation rapide des horizons plus profonds du sol (**Passot et al., 2016**).

Les rendements des mil chandelles sont réduits en raison du stress hydrique après la floraison qui affecte à la fois le remplissage du grain et la formation des graines. Les variétés à tallage élevé

Ayant des grains de petite taille et de petites panicules minimisent les altérations du remplissage des grains liées à la sécheresse (**Aparna et al., 2014**).

Les plantes de mil sétaires produisent des poils absorbants plus longs et plus denses formant une grande rhizogaine qui produit plus de biomasse racinaire, ce qui pourrait aider à pénétrer profondément dans les sols secs (**Liu et al., 2019**). IL a été signalé que les agriculteurs des zones sèches préféraient les variétés de mil perlé de courte durée et à tallage élevé, qui assuraient un meilleur rendement et une meilleure valeur fourragère. Le mécanisme d'échappement à la sécheresse des mil chandelles est le court « Période de floraison » qui s'achève avec peu d'eau disponible (**Van et al., 1996**).

Le mil perlé a un système racinaire variable en fonction de la limitation en eau, avec une profondeur de racine allant de 140 cm à 3 m avec racine latérale diffusion. Le taux de transpiration est maintenu élevé en ajustant les mouvements stomatiques avec une maximisation de la fixation du carbone tant que l'eau est disponible (**Vadez et al., 2012**)

Les réponses adaptatives du mil perlé au stress hydrique comprennent une augmentation de la longueur de ses racines pour augmenter l'absorption d'eau (**Faye et Sine., 2019**).

Stay green est un trait de tolérance à la sécheresse qui est une caractéristique de certains génotypes où la photosynthèse active est prolongée en retardant la sénescence des feuilles via un réseau de signalisation complexe. Les lignées consanguines semi-naines de mil perlé développées en Les États-Unis ont cette caractéristique de "rester vert". Cela permet aux plantes de poursuivre la photosynthèse quelle que soit la teneur en eau du sol et de maintenir un bon rendement en grain dans des conditions de stress hydrique (**Serba et al., 2016**). Sécheresse les accessions de mil perlé tolérantes ont montré diverses réponses morphologiques et physiologiques au stress telles que le repliement vertical des feuilles qui réduit la surface d'évaporation, une plus grande capacité d'ajustement osmotique des jeunes feuilles et des tiges et une accumulation plus élevée de NO⁻, K⁺, acides aminés, proline, saccharose, composés de glucose et d'ammonium (**Kusaka et al., 2005**). Il a été rapporté qu'une augmentation de la résistance à la traction des feuilles conduit à une augmentation de la tolérance à la sécheresse chez trois espèces d'Eragrotis (**Balsamo et al., 2006**)

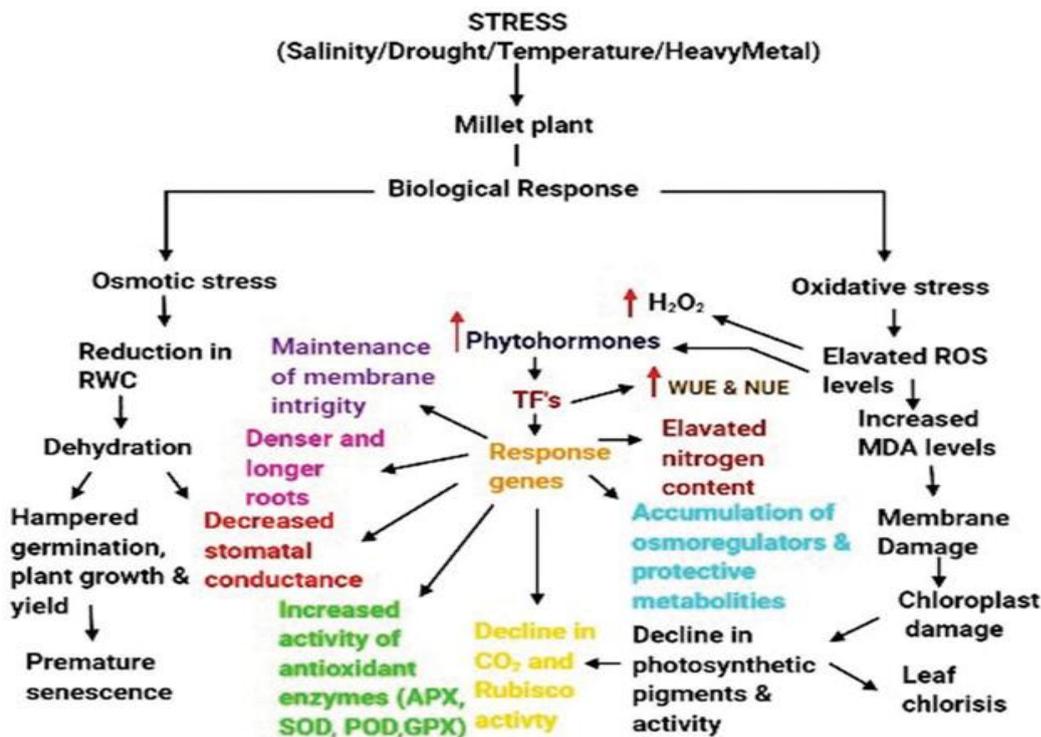


Figure 11. Réponses biologiques des plantes à divers stress abiotiques. (Seerat Saleem *et al.*, 2020)

I.11.3. Adaptations biochimiques et physiologiques aux stress chez les mils

Les osmoprotecteurs jouent un rôle vital dans l'amélioration de l'hyperosmolarité qui est causée par le stress de salinité et établit des conditions homéostatiques ioniques cellulaires. La réponse biochimique adaptative au stress salin chez l'éleusine incluait une teneur élevée en proline, une augmentation de la concentration réduite en sucre et des protéines totales des feuilles (Mukami *et al.*, 2020).

La proline, qui est un acide aminé important, joue un rôle vital en tant que molécule osmotique compatible et dans l'ajustement du potentiel osmotique ; il contribue ainsi à améliorer la tolérance à la sécheresse. Il agit également dans la défense antioxydante, la chélation des métaux et la signalisation du stress (Shivhare et Lata, 2019).

Les enzymes antioxydantes représentent le mécanisme adaptatif des plantes exposées aux dommages oxydatifs causés par le stress. Il s'agit de SOD, CAT, peroxydase (POD) et APX. Le stress métallique chez les mils a entraîné des activités élevées de POD et de SOD avec une réduction de l'activité de CAT (Gupta *et al.*, 2017). Une variété de mil perlé bien adaptée aux environnements salins a montré de bonnes réponses physiologiques et biochimiques à

l'augmentation de la salinité, telles qu'une augmentation de la teneur en proline, en protéines solubles totales et en cire épicuticulaire (**Makarana et al., 2019**).

On a constaté que les variétés tolérantes au sel de l'éleusine et du riz avaient des rapports Na^+/K^+ des pousses plus faibles et des teneurs en glucides des feuilles beaucoup plus élevées ; il a été conclu que la régulation des ions ainsi que le métabolisme des glucides conduisaient à une tolérance au sel chez le riz et l'éleusine (**Vijayalakshmi et al., 2014**).

L'ascorbate est un antioxydant soluble dans l'eau dans les plantes qui est nécessaire pour l'activité efficace de l'APX, qui joue un rôle important dans le processus de piégeage de conversion de H_2O_2 en H_2O . Une augmentation de 200 % de l'ascorbate a été signalée dans les variétés d'éleusine tolérantes à la sécheresse, ce qui implique que l'ascorbate augmente la tolérance au stress hydrique (**Bartwal et al., 2016**).

Une expression plus élevée de gènes de métabolites secondaires associés aux voies métaboliques des alcaloïdes, des terpénoïdes, des flavanols, de la lignine, de la cire, de l'acide mévalonique (MVA) et de l'acide shikimique (SA) a été observée chez le mil perlé stressé par la sécheresse au stade de la floraison qu'au stade végétatif ; cela a aidé à maintenir le potentiel osmotique et l'intégrité de la membrane. Une accumulation plus élevée de métabolites secondaires a été trouvée dans les génotypes de mil tolérants à la sécheresse (**Shivhare et al., 2020**).

Les phytohormones telles que l'auxine, la cytokinine, l'ABA, la gibbérelline et l'éthylène jouent un rôle vital dans les réponses adaptatives au stress (**Bartwal et al., 2016**).

I.11.4. Adaptations moléculaires des mils aux stress

La réponse de la plante à divers facteurs environnementaux est différemment perçue et exprimée au niveau moléculaire. Dans une étude sur la limitation du phosphore dans le mil des oiseaux, les adaptations moléculaires incluent l'expression régulée à la hausse de SiPHT1 ; 1, SiPHT1 ; 4 dans les racines et celle de SiPHT1 ; 2 dans les racines et les pousses pour une absorption et une translocation améliorée du phosphore dans des conditions de stress (**Faye et al., 2019**).

Le QTL de tolérance à la sécheresse du mil perlé a contribué à réduire l'absorption de sel et à améliorer le stress de la croissance sous le sel (**Sharma et al., 2014**). Le gène tardif de l'embryogenèse abondante (LEA), à savoir SiLEA14, du mil des oiseaux a été induit par le stress osmotique, le NaCl et l'ABA. Il a augmenté la tolérance au sel chez *Arabidopsis* transgénique et, lorsqu'il est surexprimé dans le mil transgénique, il a amélioré la tolérance au sel et à la

sécheresse (Wang et al. 2014). Le facteur de transcription EcNAC1 (NAM, ATAF1/2 et CUC2) induite par le stress de l'éleusine, qui est induit par la salinité et la sécheresse, a été caractérisé et exprimé dans des plants de tabac transgéniques. Il en est résulté une tolérance accrue à divers stress abiotiques tels que le stress osmotique et le stress de salinité. Le gène de transfert lipidique (SiLTP) exprimé dans tous les tissus du mil des oiseaux a amélioré la tolérance à la sécheresse et au sel chez cette espèce en augmentant la teneur en proline et en sucres solubles totaux. Ce gène peut être utilisé pour améliorer la tolérance à la sécheresse et au stress salin chez les plantes cultivées (Pan et al., 2016).

Les gènes de protéolipides de la membrane plasmique du mil perlé (PgPmp3-1 et PgPmp3-2), en association avec d'autres protéines, ont montré une expression accrue pendant les stress du froid, de la sécheresse et du sel et ont fourni aux plantes une tolérance au stress abiotique en codant pour des protéines hydrophobes et en maintenant l'homéostasie des ions cellulaires (Yeshvekar et al., 2017).

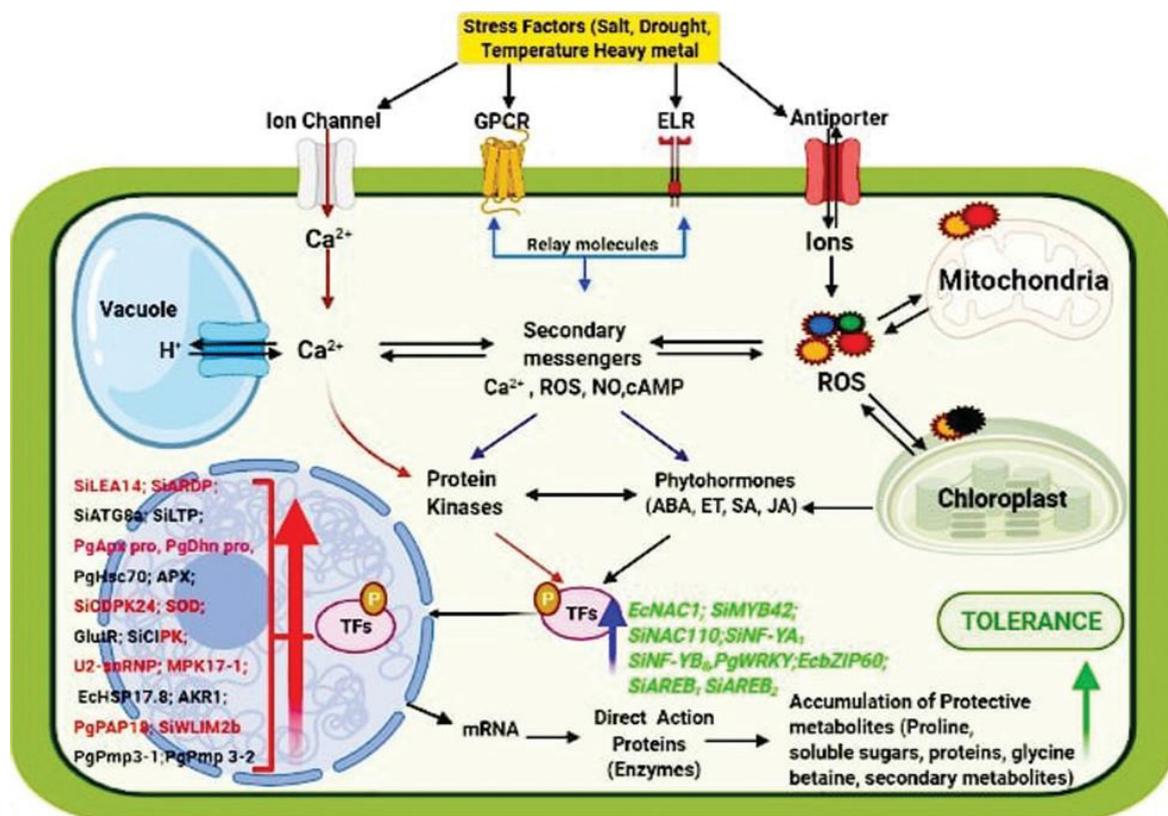


Figure 12. Mécanisme moléculaire d'adaptation chez les mils au niveau du gène fonctionnel (Seerat Saleem et al., 2020)

I.11.5. Analyse transcriptomique des mils

L'analyse transcriptomique d'un cultivar de mil des oiseaux tolérant au sel et d'un mil des oiseaux sensible a révélé que 159 transcrits exprimés de manière différentielle produisaient un changement > 2 fois supérieur en réponse au stress de salinité. Parmi ceux-ci, 115 ont été régulés à la hausse et 44 ont été régulés à la baisse. Il a été conclu que l'expression des facteurs de transcription et des gènes de signalisation était plus élevée chez la variété tolérante que chez la variété sensible, ce qui contribue à leurs mécanismes de perception du signal dans des conditions salines (**Puranik et al., 2011**). Quatre-vingt-un miARN conservés et 14 nouveaux miARN régulés différentiellement ont été identifiés au cours d'un petit séquençage d'ARN sur les génotypes de mil perlé tolérants à la salinité. Au total, 448 gènes ont été identifiés comme gènes cibles, et 122 parmi ceux-ci facteurs de transcription codés. Ces miARN et leurs gènes cibles peuvent réguler la voie de réponse de l'auxine, et donc jouer un rôle dans la tolérance au stress salin chez le mil perlé (**Shinde et al., 2020**). Vingt-neuf protéines à expression différentielle régulées à la hausse et à la baisse (impliquées dans diverses énergies, lipides, azote, glucide, nucléotide, métabolisme lié au stress, transduction du signal et photosynthèse) ont été identifiés dans les semis de mil des oiseaux, et ils semblaient être impliqués dans la tolérance au stress salin (**Veeranagamallaiah et al., 2008**).

Les modifications du transcriptome chez un mil sétaires tolérant à la sécheresse ont été analysées après un stress hydrique induit par le PEG. Parmi les 327 transcrits exprimés de manière différentielle identifiée, la technique de Northern inverse a identifié 86 transcrits régulés positivement, ce qui suggère leur fonction possible dans l'adaptation à la déshydratation. La plupart des transcrits régulés à la hausse étaient impliqués dans le métabolisme, la régulation de la transcription, la signalisation, la dégradation des protéines et le stress. Une induction de 5 à 11 fois de la protéine DREB2 (Dehydration Responsive Element Binding type) a été observée par analyse qRT-PCR (**Lata et al., 2010**). Analyse comparative du transcriptome des cultivars tolérants et sensibles à la salinité du mil perlé ont identifié 11 627 DEG, 1 287 unigènes régulés positivement et 1 451 unigènes régulés négativement qui étaient communs aux deux cultivars. Parmi les gènes différentiellement exprimés, il y avait les gènes codant pour des facteurs de transcription, des transporteurs d'ions, et les voies métaboliques impliquées dans les réponses au stress. La lignée tolérante présentait une régulation à la hausse des gènes de la voie de biosynthèse de la protéolyse et des phénylpropanoïdes médiée par l'ubiquitine. D'autre part, les unigènes de glycolyse/gluconéogenèse et les gènes de ribosome ont été régulés à la baisse dans la variété sensible (**Shinde et al., 2018**). Trois mille soixante-six gènes différentiellement

exprimés (DEG) ont été identifiés (1404 surexprimés et 1662 surexprimés) dans une variété de mil des oiseaux tolérant à la sécheresse, ce qui a conduit à la formation de réseaux de régulation impliquant la photosynthèse, la transduction du signal, la régulation osmotique, la régulation redox, signalisation hormonale, biosynthèse de la cuticule et de la cire et amélioration de la tolérance à la sécheresse (Shi *et al.*, 2018).

I.11.6. Atténuation du stress chez les mils

Une option économiquement réalisable pour lutter contre les effets du stress sur les plantes est l'application de bactéries favorisant la croissance des plantes (PGPB). Éleusine inoculée avec de l'acide 1-aminocyclopropane-1-carboxylique (ACC) désaminase productrice de *Pseudomonas* spp. A entraîné une croissance améliorée et une activité antioxydante accrue chez les plantes bien arrosées et stressées par la sécheresse. L'ACC désaminase convertit le précurseur immédiat de l'éthylène (ACC) en α -cétobutyrate (α -KB) et en ammoniac, réduisant ainsi le niveau d'éthylène des plantes et favorisant la croissance (Chandra *et al.*, 2018).

Pseudomonas fluorescentes (SPF-33, SPF-37, SPF-5), qui sont des rhizobactéries favorisant la croissance des plantes (PGPR), ont été signalées pour atténuer le stress salin chez l'éleusine sensible à la salinité. Cela a été fait en augmentant la hauteur de la plante et le nombre d'épillets, la germination, la chlorophylle totale, les composés phénoliques, les flavonoïdes, les protéines, l'activité des antioxydants enzymatiques et la teneur en proline, et en diminuant sa peroxydation lipidique et H₂O₂ (Mahadik et Kumudini., 2020). Mils inoculés avec des rhizobactéries halophiles *Enterobacter* sp. PR14 a montré des traits favorisant la croissance tels que l'acide indole acétique (IAA), l'aminocyclopropane-1-carboxylate désaminase (ACCD), la solubilisation du phosphate et les enzymes antioxydantes. Cela a conduit à une augmentation de la germination des graines, de la longueur des racines et des pousses et du poids sec, améliorant ainsi le stress de salinité chez les mils (Sagar *et al.*, 2020).

L'éleusine et l'éleusine inoculées avec des mutants bactériens de *Sphingomonas faeni* portant le gène ACC désaminase, qui est connu pour réguler l'éthylène, ont évolué pendant le stress dû au froid qui à son tour a entravé la croissance des plantes. Le blocage de l'éthylène a entraîné une amélioration de la longueur des racines et des pousses, de la teneur en biomasse et une augmentation de l'activité antioxydante, atténuant ainsi le stress dû au froid chez l'éleusine et la séttaire (Srinivasan *et al.*, 2017).

Le mil des oiseaux stressé par le NaCl avait un système enzymatique antioxydant amélioré

lorsqu'il était traité avec de la putrescine (Put) et de la spermidine (Spd), des amines biogènes. Les plantes de mil des oiseaux ont montré une réduction du niveau de peroxyde d'hydrogène et des fuites d'électrolytes, permettant une augmentation de la teneur en biomasse, de la teneur relative en eau, de la chlorophylle totale, des niveaux de caroténoïdes et une plus grande activité de SOD, CAT, APX et GPX (**Rathinapriya et al., 2020**). IL a été rapporté que le *Bacillus amyloliquefaciens* EPP90 endophyte, tolérant au sel et favorisant la croissance des plantes du mil perlé est un anti-stress potentiel et un promoteur de croissance. Ces bactéries halophiles ont été obtenues à partir des racines, des feuilles et de la tige du mil perlé hôte (**Kushwaha et al., 2020**). L'inoculation de *Panicum miliaceum* avec les champignons endophytes colonisant les racines *Piriformospora indica* a entraîné une augmentation du nombre de grains, de la hauteur de la plante et de la longueur du pinacle, ainsi qu'une plus grande teneur en azote, en protéines, en phosphore et en chlorophylle des grains dans des conditions d'eau abondante et de sécheresse. (**Ahmadvand et Hajinia, 2018**).

Le sulfure d'hydrogène (H₂S) en combinaison avec la proline atténue les dommages causés par le cadmium (Cd) dans le mil des oiseaux (**Tian, 2016**). Les semis d'éleusine surchargés en nickel ont réduit l'effet toxique du Ni lorsqu'ils étaient traités avec du nitroprussiate de sodium (SNP) et de l'acide salicylique (SA) en améliorant la longueur^{des} racines et des pousses, la teneur en chlorophylle, la concentration en minéraux et la masse sèche (**Kotapati et al., 2017**). Les dommages oxydatifs induits par le cadmium (Cd²⁺) dans le mil des oiseaux ont été atténués par le dioxyde de soufre (SO₂) en améliorant les activités des enzymes antioxydantes, en augmentant la teneur en glutathion et en phytochélatines et en réduisant l'absorption et la translocation du Cd²⁺ (**Han et al., 2018**).

Microbes tolérants à la sécheresse et solubilisant le phosphore *Acinetobacter calcoaceticus* et *Penicillium* sp. Atténué les effets néfastes du stress hydrique chez le mil des oiseaux en améliorant l'accumulation de glycine bêtaïne, de sucres et de proline (**Kour et al., (2020)**).

Les semis de mil chandelles ont amélioré leur tolérance au stress salin lorsqu'ils ont été inoculés avec l'néophyte *Aspergillus terreus* ; cela était dû à une teneur accrue en chlorophylle, en RWC, en sucre soluble, en phénol et en flavonoïdes (**Khushdil et al., 2019**).

La **figure 12** illustre l'amélioration du stress abiotique chez les mils par les bactéries favorisant la croissance des plantes (PGPB)

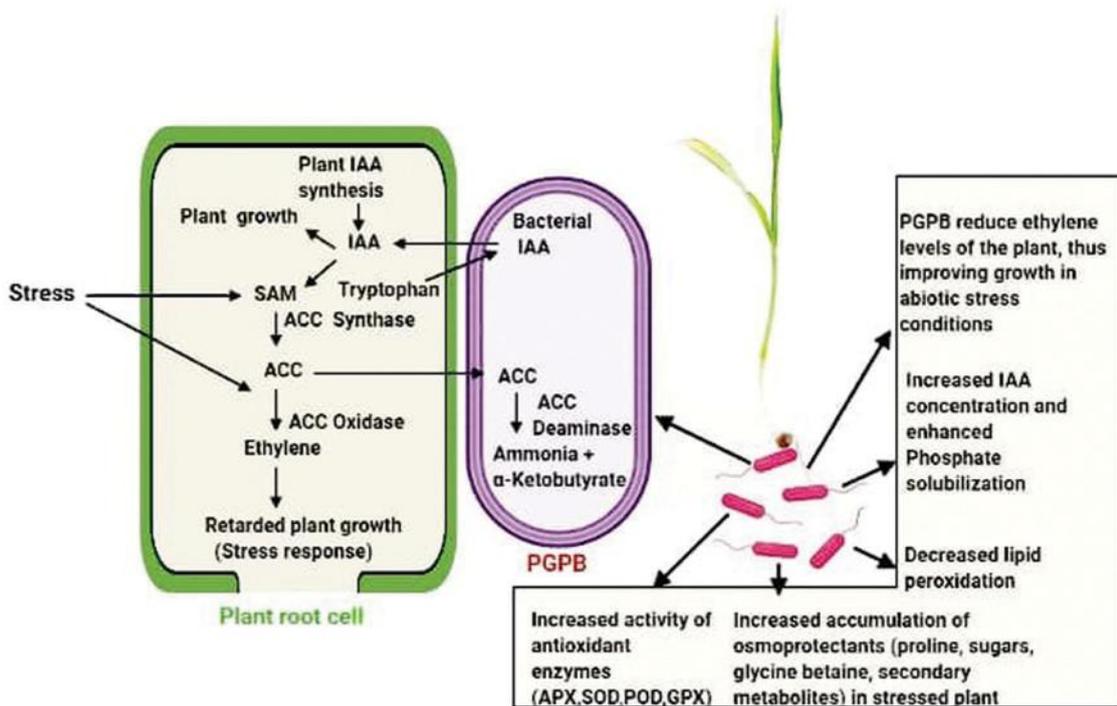


Figure 13. Amélioration du stress abiotique chez les mils par des bactéries favorisant la croissance des plantes (PGPB) (Seerat Saleem et al.,2020)

I.12. Composition chimique de *Pennisetum glaucum* (L.)

D'après Singh *et al.* (1987, cités par Rai *et al.*, 1997), le grain du mil est constitué de 67% d'amidon, 11% de protéines et 5% de lipides. D'autres constituants chimiques du mil figurent dans le **tableau 6** avec leurs valeurs de concentration moyenne.

Tableau 6. Composition chimique du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) (Cerighelli, 1955)

| Constitutions | Balland (1907) | | | | Piédallu (1923) | |
|---------------|------------------|----------|--------------|--------------|-----------------|---------|
| | Moyennes (a) (%) | | Minima (%) | Maxima (%) | Moyennes | |
| | État naturel | État sec | État naturel | État naturel | (B)(%) | (c) (%) |
| Eau | 13,06 | 0,00 | 11,00 | 14,00 | 13,15 | 13,65 |
| Lipides | 4,25 | 4,89 | 2,35 | 6,25 | 4,50 | 6,15 |
| Protides | 11,65 | 13,40 | 8,78 | 16,10 | 13,56 | 7,26 |
| Cellulose | 2,16 | 2,49 | 1,35 | 3,85 | 4,12 | 4,00 |
| Glucides | 67,41 | 77,53 | 60,75 | 71,17 | 62,26 | 66,65 |
| Cendres | 1,47 | 1,69 | 0,80 | 2,10 | 2,25 | 1,90 |

(a) Moyennes de 7 analyses

(b) Analyse non dosée = 0,16%

(c) Analyse non dosée = 0,39%

La composition chimique est généralement fonction de la variété et des conditions agro climatiques. Le mil pénicillaire contient plus de protéines et de lipides que le sorgho. Les deux céréales sont déficientes en lysine comme toutes les autres céréales, mais dans l'ensemble la valeur protéique du mil est supérieure à celle du sorgho (Tchuenbou., 2006). Les glucides sont composés : de l'amidon constituant le plus important, de sucres solubles, de pentosanes, de cellulose et d'hémicellulose. Les minéraux sont plus concentrés dans les parties périphériques du grain (péricarpe, germe et couche à aleurone). Le germe et le péricarpe représentent respectivement 7 % et 3% du grain de mil et de 10 % et de 2 % du grain de sorgho. Ils contiennent respectivement pour le mil et le sorgho, 72 % et 68 % (germe) et 14 % et 11% (péricarpe) du total des minéraux du grain (Tableau 7).

Tableau 7. Composition (%) du mil (Serna-Saldivar et Rooney, 1995)

| | | Grain entier (%) | Albumen (%) | Germe (%) | Péricarpe (%) |
|-----|--------------|------------------|-------------|-----------|---------------|
| Mil | Grain entier | 100 | 75,1 | 16,5 | 8,4 |
| | Protéines | 13,3 | 10,9 | 24,5 | 17,1 |
| | Lipides | 6,3 | 0,5 | 32,2 | 5 |
| | Amidon | 71,6 | - | - | - |
| | Cendres | 1,7 | 0,3 | 7,2 | 3,2 |

Comparé aux autres céréales telles que le riz, le blé et le maïs, le mil a une valeur nutritionnelle élevée (**Amadou et al., 2013**). Ainsi on a :

➤ **Hydrates de carbone** : Le mil est plus riche en hydrates de carbone que le maïs. Le mil a une haute teneur en fibres variant de 1,2 à 2,2g/100g de grain (**NIN, 2003**). Les grains du mil, ont un faible indice de glycémie (IG=55), le mil conviendrait alors, à certains égards pour traiter des diabétiques.

➤ **Protéines** : Le mil a des teneurs de 8 à 60 % en protéines brutes et de 40% en acide aminé lysine et méthionine. La teneur en lysine du mil est de 21% et 36% plus élevée que respectivement pour le maïs et le sorgho (**Amadou et al., 2013**). Le grain du mil est sans gluten

et il est le seul grain qui conserve ses propriétés alcalines après la cuisson ce qui convient pour les personnes ayant une allergie au blé (**Irén Léder, 2004**).

➤ **Lipides** : Les grains du mil sont 2 fois plus riche en lipides libres que ceux des céréales standard avec des teneurs variant de 3 à 7,4% contenant 2 à 12 mg/100 g d'acides gras libres, 75% d'acides gras non-saturés et de 24% d'acides gras saturés (**Ramulu et Rao, 2003**). La digestibilité des matières grasses était plus élevée chez le mil que chez le maïs (**Adeola et Orban, 1994**).

➤ **Vitamines** : Les grains du mil sont plus pauvres en vitamines que ceux du maïs, exceptée la vitamine A (132 équivalents rétinol contre 64 (blé) ; 0 (riz) ; 47 (sorgho) et 32 (maïs)). La teneur en vitamine B1 (thiamine) varie de 0,375 à 1,006 mg/100 g selon les variétés (**Andrews et al., 1993**). Dans les pays du tiers monde, les ressources en vitamine A sont très limitées et le mil peut aider à résoudre ce problème si l'on sélectionne des variétés plus riches en vitamine A (**Jayaraman, 2002**).

➤ **Minéraux** : Le mil est plus riche que le maïs en phosphore, 3 fois plus en fer et 5 fois plus en calcium. Des traces de baryum, chrome, cobalt, cuivre, plomb, manganèse, molybdène, nickel, argent, strontium, étain, titanium, vanadium, zinc et d'iode ont également été observées (**Rooney et McDonough, 1987**).

➤ **Facteurs antinutritionnels chez le grain du mil** : Le grain du mil renferme un certain nombre de composés antinutritionnels tels que : les polyphénols et le tannin, l'acide phytique, le

➤ phytate et l'acide oxalique (Irén Léder, 2004). Les polyphénols et les composés tanniques sont

Concentrés dans le son. Le décorticage diminue de manière significative la quantité de tanins avec une augmentation correspondante de la digestibilité des protéines (Irén Léder, 2004).

Tableau 8. Composition chimique des grains du mil à chandelle (Adeola et Orban, 1994).

| Nutriment | Grains du mil | | | |
|------------------------|-----------------------------------|-------------------|-------|-------------------------|
| | Mil variétés A (Adeola O 1995) | Mil variétés B | Mil C | Mils (Awika JM 2004) |
| Matière sèche % | 89,08 | 90,12 | | |
| Protéine brute % | 10,03 | 12,06 | | 11,8 |
| Energie brute % | 4132,00 | 4307,00 | | 353,0 |
| Fibre % | 3,84 | 3,62 | | 1,9 |
| Minéraux mg/kg | | | | |
| Zinc | 35,00 | 43,00 | 0,004 | 2,0 |
| Phosphore | 3148,00 | 3343,00 | 0,00 | 339,0 |
| Manganèse | 11,00 | 12,00 | 0,147 | 0,8 |
| Fer | 40,00 | 51,00 | 0,003 | 9,80 |
| Magnésium | 1239,00 | 1351,00 | | 114,0 |
| Calcium | 153,00 | 208,00 | 0,211 | 37,0 |
| Cuivre | 5,00 | 6,00 | | 0,5 mg |
| Acides aminés % | | | | |
| Acide aspartique | 0,83 | 0,91 | | |
| Acide glutamique | 1,90 | 2,16 | | |
| Serine | 0,49 | 0,55 | | |
| Glycine | 0,27 | 0,29 | | |
| Histidine | 0,27 | 0,39 | | |
| Arginine | 0,56 | 0,63 | | |
| Thréonine | 0,42 | 0,42 | | |
| Alanine | 0,79 | 0,91 | | |

I.13. Composition phytochimique de mil

I.13.1. Phénoliques et flavonoïdes

Les composés phénoliques sont des métabolites secondaires aromatiques des plantes qui jouent

Un rôle important dans la couleur (gris, jaune, vert et blanc crème), les qualités sensorielles et nutritionnelles et les propriétés Antioxydants des aliments (**Reichert, 1979**). Ils sont naturellement présents dans les mils et les sources végétales. Ces composés font partie de l'alimentation quotidienne et sont également utilisés comme médicaments ou suppléments. Les composés phénoliques, tels que les acides phénoliques, les flavonoïdes, les stilbènes, les tanins et les lignanes peuvent piéger les radicaux libres et éteindre les ROS, et fournissent donc des moyens efficaces pour prévenir et traiter les maladies médiées par les radicaux libres (**Subba Rao., 2002**). Les polyphénols sont capables d'éliminer les radicaux libres, de chélater le catalyseur métallique, d'activer les enzymes antioxydantes, de réduire les radicaux α -tocophérol et d'inhiber les oxydases (**Singh & Raghuvanshi, 2012**).

Les substances phénoliques comme les flavonoïdes et les acides phénoliques dans les aliments se comportent comme des antioxydants naturels et des médicaments thérapeutiques en raison de leurs bienfaits nutraceutiques et pour la santé (**Siddhuraju & Becker, 2007**). Les mils sont connus pour leurs riches sources de composés bioactifs, y compris les vitamines, les composés phénoliques et les flavonoïdes et leurs glucosides, l'acide folique, les caroténoïdes, les coumarines, les fibres hautement fermentescibles et le potassium aux propriétés potentiellement bénéfiques pour la santé (**Viswanath, Urooj et Malleshi, 2009**). Ces composés bioactifs sont connus pour agir comme piègeurs de radicaux libres, pour moduler les activités enzymatiques et pour protéger contre une variété de maladies, en particulier les maladies cardiovasculaires et aussi certains types de cancer (**Chandrasekara & Shahidi, 2011**). Les grains de mil sont de bonnes sources de polyphénols (**Chethan, 2008**).

Les flavonoïdes sont la principale classe de polyphénols, la structure chimique de base qui contient un squelette hétérocyclique C6-C3-C6 (**Hwang *et al.*, 2012**). De nombreuses plantes sont considérées comme d'excellentes sources de flavonoïdes qui pourraient être utilisées pour contribuer à une alimentation saine avec des conservateurs alimentaires. Les flavonoïdes sont des composants importants des mils. Les flavonoïdes alimentaires sont considérés comme des antioxydants encore plus puissants que les vitamines C et E (**Sokol-Letowska *et al.*, 2006**). Les flavonoïdes couramment trouvés dans les mils sont la catéchine, la quercétine, la lutéoline,

l'orientine, l'apigénine, l'isooriétine, la vitexine, la myricétine, l'isovitexine, la daidzéine, la sponarine, la violanthine, la lucénine-1 et la tricine (**Pathak et al., 2018**). Les flavonoïdes du

mil ont montré un large éventail de propriétés thérapeutiques pour des applications médicales et cliniques, telles que des effets anti-inflammatoires, antihypertenseurs, diurétiques, analgésiques, anticancéreux et hypolipidémiques (**Ekta & Sarita., 2016**).

Fibre alimentaire

Les fibres font partie de la nourriture végétale et non de la viande. C'est un nutriment moins essentiel, mais important comme élément d'entretien interne. Fibre est un glucide complexe non absorbable qui provient des parois cellulaires des plantes. Il existe deux types de fibres dont les fonctions alimentaires varient ; les fibres solubles et insolubles. Les fibres ne sont pas décomposées chimiquement dans le corps, mais facilitent la digestion, réduisent le cholestérol et les aliments faibles en calories sans graisse animale (**Ahuja et al., 2010**). De nombreuses recherches ont révélé la relation entre l'apport de DF et l'incidence de la constipation, de l'obésité, des maladies cardiovasculaires, du cancer du côlon et du diabète sucré (**Balasubramanian., 2013**).

La fibre peut être utilisée à des fins technologiques, telles qu'un agent de charge ou un substitut de graisse, ainsi qu'à des fins nutritionnelles. Les actions physiologiques du DF sont probablement basées sur ses propriétés physicochimiques, telles que les capacités de rétention d'eau et d'huile, l'absorption de molécules organiques, la dégradation bactérienne, la capacité d'échange de cations et l'activité antioxydante (**Lestienne et al., 2007**).

Le tégument du mil contient de la pectine, de la cellulose et des hémicelluloses qui résistent à la dégradation par les enzymes digestives et sont donc des sources de fibres alimentaires (**Chethan & Malleshi, 2007**). La présence de fibres alimentaires dans le tégument des grains de mil est bénéfique pour la santé humaine, ce qui affecte plusieurs processus métaboliques et digestifs, tels que les effets sur l'absorption du glucose et le taux de cholestérol (**Upadhyaya et al., 2011**). La matière du tégument contient une teneur élevée en fibres qui peuvent être utilisées comme une bonne source de fibres alimentaires et produit une quantité importante de sous-produits, qui sont principalement utilisés comme farine composite dans la préparation des biscuits (**Rateesh, et al., 2008 ; Rateesh et al., 2011**).

I.14. Variabilité agronomique et génétique

Le mil est une espèce diploïde avec un génome composé de $2n = 14$ chromosomes (**Manning et al. 2011 ; Saïdou, 2011**). C'est une plante C4, préférentiellement allogame grâce à une

protogynie prononcée et anémophile, ce qui lui confère une grande hétérogénéité tant morphologique que génétique. L'émergence du stigmate précède celle de l'anthere, et ceci entraîne une exogamie élevée provoquée par le vent (**Loumerem, 2004 ; Upadhyaya et al., 2008**). La fréquence élevée de croisements spontanés entre espèces cultivées et espèces sauvages

Explique la forte variabilité observée au niveau des populations ou variétés du mil. Outre la sélection naturelle, la sélection par l'homme a permis une augmentation significative de cette variabilité (**Ahmadi et al., 2002**).

Il existe maintenant une collection de près de 20 503 échantillons du mils cultivés, cultivars traditionnels et mils sélectionnés confondus, originaires de 47 pays (**Loumerem, 2004**). A partir de quatorze (14) caractères botaniques, **Marchais et al., (1993)** concluent à l'existence de cinq (5) groupes géographiques pour l'Afrique de l'Ouest, alors que les autres grandes régions comme l'Inde ou l'Afrique.

Australe forment des groupes peu divers et homogènes. Les principaux caractères qui permettent de discriminer les cultivars traditionnels sont la date de floraison, la hauteur des plantes, le diamètre des tiges, la longueur du premier épi et la production d'épis et de grains (**Ouendéba, et al., 1995**). Selon ces critères, les mils du Niger se rapprochent de ceux du Nigeria et du Sénégal. Les cultivars traditionnels correspondent cependant à une réalité paysanne et au choix délibéré d'un type plutôt que d'un autre. A titre d'illustration, on peut citer, pour le Niger, les groupes Haïni Kiré, Guerguéra et Zongo (variétés précoces de l'Ouest), les groupes Ba-Angouré, Ankoutess et Boudouma (variétés précoces de l'Est), le groupe Maïwa (variétés tardives de l'Ouest et du centre), auxquels il faut ajouter les mils d'oasis cultivés dans le massif de l'Aïr (**Bezançon et al., 1997**).

En utilisant le critère longueur du cycle, **Ahmadi et al., (2002)** classent les mils cultivés en Afrique en deux groupes : les mils hâtifs ou précoces (75 à 100 jours) et mils tardifs (110 à 150 jours). Les mils tardifs se rencontrent dans les zones où les pluies sont les plus abondantes et les mieux réparties (**Bezançon et al., 1997**). Ils sont nommés « Maiwa » ou Somno » au Niger et

Nigeria, « Sanio » au Sénégal et Mali. Les mils tardifs sont photosensibles (jours courts) et fleurissent en fin septembre dans les conditions du Niger. Ils sont surtout cultivés dans la partie Sud du pays où la pluviosité est élevée et étalée pour leur permettre d'accomplir leur cycle de développement. Leur contribution dans la production globale est inférieure à 10% (**Illiassou, 2009**). Les mils hâtifs ou précoces sont appelés « Guero » au Niger et Nigeria, « Souna » au

Sénégal et Mali. Au Niger, les variétés améliorées mises au point par l'Institut National de Recherches Agronomiques du Niger (INRAN) et actuellement vulgarisées ou en pré-vulgarisation (P3 Kolo, HKP, HKB, ZATIB, etc.) peuvent être classées en groupe à cycle intermédiaire (85 à 95 jours) et groupe à cycle court (80 à 85 jours). Ces variétés sont peu sensibles à la photopériode et fleurissent aux environs de 60 jours après le semis.

I.15. Utilisations et importance économique

La culture du mil remonte à la plus haute antiquité. Il était déjà utilisé et cultivé dans les temps préhistoriques dans beaucoup d'endroits (**Loumerem, 2004**). Le mil occupe la 7ème place parmi les céréales les plus importantes au monde (**Moumouni, 2014**). En 2007, la production mondiale du mil a atteint environ 32 millions de tonnes (**Amadou et al., 2013**). Dans le monde, la culture du mil couvrait plus de 33,11 millions d'hectares en 2013 avec une production de 25,9 millions de tonnes (**Hamadou et al., 2017**).

La production des principaux pays producteurs du mil en 2016 était de 26,9 millions de tonnes avec l'Inde en tête (10,2 millions de tonnes) suivi du Niger (3,8 millions de tonnes) (**FAOSTAT, 2018**).

En Inde, où le mil arrive au quatrième rang des céréales après le riz, le blé et le maïs, sa culture est plus importante dans les Etats de Rajasthan, de Maharashtra, de Gujarat, d'Uttar Pradesh et de Haryana (**Yadav et Rai, 2013**). En Afrique, la culture du mil s'étend sur plus de 21 millions d'hectares où près de 500 millions de personnes en dépendent pour leur survie (**Saïdou, 2011**). Approximativement 40% de la production mondiale du mil provient de l'Afrique (**Samba et al., 2015**) et l'Afrique de l'Ouest fournit environ 80% de cette production (**ROCAFREMI, 2002**). Dans certains pays du Sahel, le mil représente plus de 75% des céréales cultivées (**Goudia et al., 2016**). En effet, le mil est la culture sahélienne par excellence du fait de son adaptation aux conditions particulières de production dans cette région (**Saïdou, 2011**). Les principaux pays producteurs d'Afrique de l'Ouest sont : le Nigéria, le Niger, le Burkina Faso, le Tchad, le Mali, la Mauritanie et le Sénégal. En Afrique de l'Est, le Soudan et l'Ouganda sont les plus gros

producteurs, alors qu'en Afrique australe, les cultures du mil ont quasiment disparu. Le mil est aussi cultivé dans les pays d'Afrique du Nord tels que la Tunisie, l'Algérie, la Libye et le Maroc (**Loumerem, 2004**).

Le mil est cultivé dans les régions arides et semi-arides de l'Afrique et de l'Inde essentiellement pour l'alimentation humaine et accessoirement comme fourrage et matériau de construction

(**Kholova et Vadez 2013 ; Kanan et al., 2014**). Ainsi, le mil fait objet de multiples usages selon les zones géographiques et les pratiques socioculturelles. Ces usages vont de la transformation de grains comme ressource alimentaire ou médicinale à la valorisation de la paille (chaume) comme œuvres d'art, fourrage, biocarburant ou comme bois de chauffe (**Hamadou et al., 2017**). Du Roti fabriqué à partir du mil perlé a été la principale nourriture des agriculteurs dans le Gujarat en Inde (**FAO, 2009**).

En Afrique, les grains du mil sont souvent moulus en farine, roulés en grosses boules, étuvés, puis consommés sous forme de la patte, de la bouillie ou de la boulle. Le mil est parfois utilisé dans la fabrication des boissons alcoolisées dans certains pays. De ce fait, les mils représentent une composante unique de la biodiversité dans les systèmes de sécurité agricole et alimentaire de millions d'agriculteurs pauvres d'Afrique subsaharienne (**Amadou et al., 2013**). C'est une culture vivrière de subsistance majeure dans la région sahélienne de l'Afrique de l'Ouest où il constitue l'alimentation de base de plusieurs millions de personnes (**Saleem et al., 2016 ; Goudiaby et al., 2018**) bien que l'Inde soit le plus grand producteur (**Bhattacharjee et al., 2007**). En Australie et aux États-Unis, le mil constitue une plante fourragère très appréciée. Il est devenu, dans les États du Sud des États-Unis, comme la Géorgie, la plante fourragère annuelle d'été la plus cultivée avec une superficie annuelle d'environ 40 000 ha. Mais au Nebraska, il est cultivé pour les grains destinés à l'alimentation des volailles et des porcs (**Hamadou et al., 2017**).

Principale source d'énergie des millions de personnes au Sahel, le mil est la deuxième céréale riche non seulement en protéines, mais aussi en calcium et en fer. La quantité de lipides et de riboflavine le place en première position chez les céréales (**Latham., 2001**). En outre, la valeur énergétique du mil est l'une des plus élevées parmi les céréales (**Nambiar et al., 2011**).

En effet, le grain du mil contient environ 10,6% de protéines, 5,1% de lipides, 66,7% d'amidon, 1,3% de fibres brutes et 1,9% d'éléments minéraux (**ROCAFREMI., 2002**). Avec 8 à 19% de protéines et 56 à 65% des carbohydrates, la valeur nutritionnelle du mil est supérieure à celle du riz, du sorgho et du maïs (**Saritha et al., 2017**). Aussi, le grain du mil est sans gluten et il est le

seul grain qui conserve ses propriétés alcalines après la cuisson ce qui convient pour les personnes ayant une allergie au blé (Léder., 2004). Par ailleurs, les grains du mil sont plus pauvres en vitamines que ceux des autres céréales, exceptée la vitamine A (132 équivalents rétinol) contre 64 (blé) ; 0 (riz) ; 47 (sorgho) et 32 (maïs). La teneur en vitamine B1 (thiamine) varie de 0,375 à 1,006 mg / 100 g selon les variétés (Andrews *et al.*, 1993). Il a été rapporté que le mil a de nombreuses fonctions nutritives et médicales (Yang *et al.*, 2012).

I.15.1. Rôles pharmacologiques de mil

La recherche sur les grains de mil a fait des progrès significatifs ces dernières années. Il a été démontré que le mil produit une variété de composés et qu'il possède une activité biologique d'une valeur pharmaceutique potentielle. Au cours des dernières décennies, les composés isolés et les extraits bruts de divers grains de mil ont suscité un énorme intérêt dans l'industrie pharmaceutique. Cette revue couvrira les domaines liés à l'activité antimicrobienne, anti-

Inflammatoire, antidiabétique, anticancéreuse et antioxydante des variétés de mil qui peuvent être étayées par la science et la justification des allégations.

❖ **Activité antimicrobienne et anti-inflammatoire**

Les grains de mil ont divers métabolites secondaires qui présentent un large éventail de propriétés biologiques. Les métabolites secondaires bioactifs des variétés de mil, tels que les composés phénoliques et flavonoïdes, présentent des activités antibactériennes et antifongiques (Xu *et al.*, 2011). Radhajeyalakshmi *et al.* (2003) ont rapporté l'activité antifongique plus élevée de l'extrait protéique de mil chandelles que les autres variétés de mil contre les champignons phytophages, tels que *Rhizoctonia solani*, *et al.* (2012) ont rapporté le rôle des composés phénoliques et flavonoïdes de l'éleusine contre l'activité inhibitrice de la prolifération des pathogènes bactériens, tels que *Escherichia coli*, *Bacillus cereus*, *Listeria monocytogenes*, *Staphylococcus aureus*, *Streptococcus pyogenes*, *Serratia marcescens*, *Proteus mirabilis*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumonia* et *Yersinia enterocolitica*.

Les activités antimicrobiennes des composés phénoliques des grains d'éleusine peuvent être utilisées comme alternative pharmaceutique puissante pour le traitement de diverses infections bactériennes et fongiques (Viswanath *et al.*, 2009). Siwela *et al.* (2010) ont examiné le mécanisme de la perte de la fonctionnalité fongique sur l'extrait phénolique du tégument de

l'éleusine. Selon ceux-ci, les extraits phénoliques d'éleusine jouent un rôle de radicaux libres pour l'oxydation des membranes microbiennes et des composants cellulaires des champignons et des composés phénoliques et inactivent l'activité enzymatique des protéines fongiques. Très peu de chercheurs se sont penchés sur le potentiel anti-inflammatoire des grains de mil en tant que médicaments dans le domaine pharmaceutique. Les mils, en particulier l'éleusine ont été largement étudiés en tant que riche source de composés bioactifs et examinés sur le processus de cicatrisation cutanée chez les rats diabétiques avec une modulation de l'inflammation médiée par le stress oxydatif (**Rajasekaran *et al.*, 2004**).

❖ **Activité antidiabétique**

Les composés bioactifs des variétés de mil possèdent des effets antidiabétiques en raison de leur capacité à inhiber les principales enzymes digestives des maladies cliniques.

Pertinence, à savoir l' α -amylase et l' α -glucosidase (**Kumari & Sumathi., 2002**). Ils ont été examinés pour les facteurs antinutritionnels du régime à base d'éleusine pour réduire la digestibilité et l'absorption de l'amidon qui provoquent un effet glycémique plus faible. La

Biomolécule active de ces grains à un potentiel antidiabétique grâce à la modulation du stress oxydatif induit par le glucose et à l'inhibition des enzymes digestives de l'amidon. Le concentré protéique de mil vulpins coréens et de mil proso a amélioré les réponses glycémiques et aurait considérablement diminué le taux d'insuline et augmenté les taux plasmatiques de diponectine et de cholestérol HDL par rapport au régime à base de caséine chez les souris diabétiques de type 2 (**Choi *et al.* 2005 ; Park, 2008**).

Ito, Ozasa *et al.*, (2008) ont confirmé l'effet protecteur du concentré de protéines de mil communs contre les lésions hépatiques induites par la D-galactosamine chez le rat. L'extrait aqueux de graines de *S. italica* (Foxtail mil) a montré des activités anti-hyperglycémiques et anti-lipidémiques contre les rats diabétiques induits par la streptozotocine (**Sireesha *et al.*, 2011**). Les graines de *S. italica* pourraient éventuellement diminuer les niveaux de triglycérides, de LDL total (lipoprotéines de basse densité), de cholestérol VLDL (lipoprotéines de très basse densité) et d'augmenter le cholestérol HDL (lipoprotéines de haute densité) chez les rats diabétiques traités par rapport à ceux de rats diabétiques non traités.

Lee, Chung *et al.*, (2010) ont examiné l'activité anti-hyperlipidémique de la consommation de mil des oiseaux sur des rats hyperlipidémiques et ont constaté une diminution du taux de

triglycérides.

Shobana, Sreerama et Malleshi (2009) ont prouvé l'activité hypoglycémique, hypocholestérolémiante, néphroprotectrice et anti-cataractogène de l'éleusine contre les rats induits par le diabète.

Jain et al., (2010) ont confirmé l'activité antidiabétique significative de l'extrait aqueux et éthanolique de mil kodo (*P. scrobiculatum*) contre les rats diabétiques induits par l'alloxane.

❖ **Activité antioxydante**

Les composés phénoliques et les flavonoïdes sont présents dans les grains de mil et ont la

capacité de servir d'antioxydants en chélatant les ions métalliques, d'agents protecteurs contre les dommages cellulaires induits par les radicaux libres, empêchant la formation de radicaux et améliorant le système endogène antioxydant (**Miller, 2001**). L'activité antioxydante significative de différents grains de mil, à savoir. Le mil kodo, l'éleusine, le petit mil, les mil sétaires, le mil pied-de-coq, le grand mil et leurs variétés blanches ont été signalés en termes de capacité de réduction du DPPH ainsi que de potentiel antioxydant réducteur ferrique (**Quesada et al., 2011**). Le potentiel antioxydant et la teneur en composés phénoliques des grains de mil peuvent servir

D'agent antiviellissement et protéger les cellules contre le syndrome métabolique (**Hegde et al., 2004**).

Viswanath et al. (2009) ont étudié l'activité antioxydante de l'éleusine et ont confirmé le potentiel de piégeage des radicaux libres du contenu phénolique du tégument. **Bellato et al., 2013** ont proposé que la consommation régulière de grains entiers puisse protéger l'organisme contre plusieurs types de troubles chroniques dus à la présence de composés antioxydants, tels que les composés phénoliques et les flavonoïdes.

Chandrasekara et Shahidi (2011) ont étudié le potentiel antioxydant, tel que la teneur totale en phénols, la teneur totale en flavonoïdes, l'activité de chélation des ions ferreux et la capacité de piégeage de l'oxygène singulet de sept variétés de mil et ont confirmé que les extraits phénoliques de mil présentaient une activité anticancéreuse en piégeant radicaux peroxy et hydroxyle. **Pradeep et Guha (2011)** ont examiné l'effet de la transformation sur l'activité nutraceutique et antioxydante des petits mils (*P. sumatrense*) et ont rapporté que les échantillons torréfiés ont notablement amélioré les propriétés nutraceutiques en termes d'augmentation de la teneur en potentiel de piégeage des radicaux.

Wei *et al.*, 2018 ont étudié l'effet d'une teneur élevée en sel sur l'hypertension et les lésions myocardiques induites par un régime enrichi en mil à l'aide de modèles animaux. Ils ont constaté qu'un régime enrichi en mil avait des effets significatifs sur la réduction de la pression artérielle et ont conclu que l'effet de stress antioxydant du mil contribuait à la protection des dommages myocardiques causés par l'apport de HS.

A decorative rectangular frame with a shadow, featuring intricate black scrollwork and flourishes along its border. The frame is centered on the page and contains the chapter title.

***Chapitre II.
Métabolisme
Secondaire***

II.1. Définition

Le terme « métabolite secondaire », qui a probablement été introduit par Albrecht Kossel en 1891, est utilisé pour décrire une vaste gamme de composés chimiques dans les plantes, qui sont responsables des fonctions périphériques indirectement essentielles à la vie des plantes. Telles que la communication intercellulaire, la défense, la régulation des cycles catalytiques (**Yezza et Bouchama., 2014**).

Les métabolites secondaires (SM) sont présents dans toutes les plantes supérieures, et ayant une répartition limitée dans l'organisme de la plante. Dont plus de 200.000 structures ont été définies (**Hartmann, 2007**) et sont d'une variété structurale extraordinaire mais sont produits en faible quantité. Ces molécules marquent de manière originale, une espèce, une famille ou un genre de plante et permettent parfois d'établir une taxonomie chimique (**Yezza et Bouchama., 2014**).

II. 2. Relation entre les métabolismes primaires et secondaires

Le métabolisme primaire représente tous les processus de bases, comme la croissance ou la respiration, qui sont vitaux pour la plante. Les métabolites primaires proviennent de ces réactions et sont les composés essentiels de la machinerie moléculaire de la cellule. Le métabolisme secondaire a été défini par rapport à cette définition, et constitue donc tous les autres processus. Initialement la notion de métabolites secondaires résidait dans trois principales observations : une difficulté à attribuer une fonction précise à ces composés dans la physiologie de la plante, leur répartition très inégale selon les végétaux et au sein même des plantes, et enfin leur inertie biochimique (**Macheixj et al., 2005**).

II.3. Utilisation

II.3.1 En médecine : Les métabolites secondaires qui font la base des remèdes pour homme sont utilisés en :

-Urologie, dermatologie, gastrites aiguës, toux, ulcères d'estomac, laxatifs, sommeil.

-Systèmes cardio-vasculaires, par exemple : Flavoce est un médicament constitué par la flavone non substitué en combinaison avec la rutine et isoquercétine est utile dans le traitement de l'athérosclérose

II.3.2. En alimentation : Les épices et les herbes aromatiques contenant des divers métabolites sont considérées comme condiments et aromates.

II.3.3. En cosmétique : Des produits de beauté, parfums et articles de toilette, produits hygiène (**Mohammedi., 2006**).

II.4. Classification des métabolites secondaires

On peut classer les métabolites secondaires en quatre grands groupes selon leur structure chimique :

- Les composés phénoliques.
- Les terpènes.
- Les alcaloïdes.
- Les hétérosides.

II.4.1. Composés phénoliques

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 sont présents dans toutes les parties des végétaux supérieurs (racines, tiges, feuilles, fleurs, pollens, fruits, graines et bois) (**Figure 14**) (**Bouchouka, 2016**).

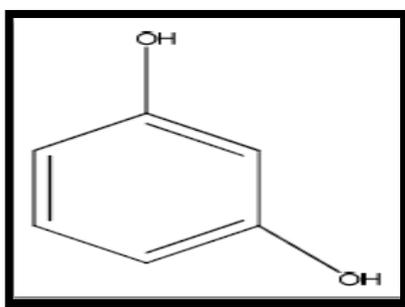


Figure 14. Structure d'unité de base des polyphénols (**Ghnimi., 2015**).

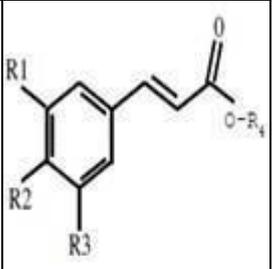
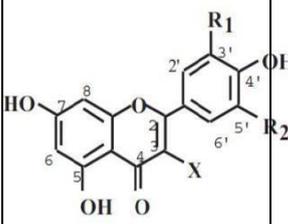
Ces molécules jouent un rôle majeur au niveau de la croissance des végétaux et dans la lutte contre des agents pathogènes et des infections. La couleur des fruits, des fleurs et des feuilles est une des caractéristiques d'une sous-classe des flavonoïdes (**El-gharras, 2009**).

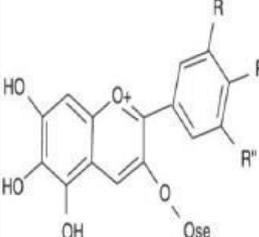
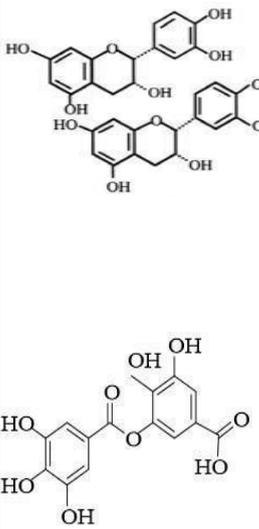
Les polyphénols, qui forment une immense famille de plus de 8000 composés naturels, sont divisés en plusieurs catégories : les flavonoïdes qui représentent plus de la moitié des polyphénols ; les tanins qui sont des produits de la polymérisation des flavonoïdes ; les acides phénoliques, les coumarines, les Lignanes et d'autres classes existent en nombres considérables (**Dacosta, 2003**).

De nombreuses études sont en faveur d'un impact positif de leur consommation sur la santé. En effet, les polyphénols pourraient permettre de prévenir de nombreuses pathologies comme le cancer (**Brown et al., 1998**), les maladies dégénératives et cardio-vasculaires (**Paganga et al., 1999**). Un encouragement à la consommation d'aliments d'origine végétale riches en composés phénoliques constitue désormais une des principales recommandations en santé publique. Parmi les antioxydants végétaux, les composés phénoliques apparaissent parmi les plus efficaces quant à leurs effets protecteurs dans l'organisme (**Gee et Johnson., 2001**).

L'élément structural fondamental qui caractérise les composés phénoliques est la présence d'au moins un noyau benzénique auquel est directement lié au moins un groupement hydroxyle ainsi que des groupes fonctionnels (ester, méthyle ester, glycoside...) (**Bruneton, 1999**). Les composés phénoliques sont commodément classés selon le nombre d'atomes de carbone dans le squelette de base (**Dacosta, 2003**).

Tableau 9. Classification des polyphénols (**Pincemail et al., 2002**).

| Classe | Sous classe | Caractéristiques | Fonctions | Structure de bases |
|---------------------------|--|---------------------------------|---|---|
| Les acides phénoliques | Les dérivés de l'acide hydroxy benzoïque | Composés organiques naturelle | -Une fonction acide -Plusieurs fonctions phénols |  |
| Les flavonoïdes | -Anthocyanidines -Flavanols -Flavones -Isoflavones -Flavanols -Flavanones | Pigment universels des végétaux | -Forme libre (aglycone) -Forme hétéroside |  |

| | | | | |
|-----------------|---|--|---|--|
| Les anthocyanes | Anthocyane | Répondu dans les fleurs, fruits Chargé positivement | Groupement hydroxyle |  |
| Les tannins | <ul style="list-style-type: none"> -Tannins condensés -Tannins hydro-lysolables | <ul style="list-style-type: none"> -Macromolécule avec une activité antioxydant très puissante -Se combine avec les protéines pour donner des composés insolubles et stables | <ul style="list-style-type: none"> -Esters de glucoses -Composé phénolique hétérogène |  |

II.4.1.1. Acides phénoliques

Ces composés sont dérivés de deux sous-groupes distingués : Les acides hydroxy cinnamiques (**figure 15**), dont les plus abondants sont l'acide caféique, l'acide férulique, l'acide chlorogénique. Et les acides hydroxy benzoïque (**figure 16**), mais les plus répandus sont l'acide salicylique et l'acide gallique. Sont contenus dans un certain nombre de plantes agricoles et médicinales et présents chez toutes les céréales (**Yezza et Bouchama., 2014**).

Ils sont considérés comme substances phytochimiques avec des effets probiotique, antioxydant, de chélation et anti-inflammatoire. Leur toxicité est très faible car ils sont considérés non toxiques (**Yezza et Bouchama, 2014**).

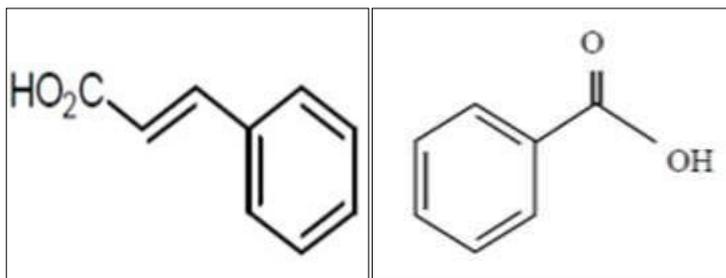


Figure 15. Acide cinamique
(Aref et Heded, 2015).

Figure 16. Acide benzoïque
(Aref et Heded, 2015)

II.4.1.2. Flavonoïdes

Les flavonoïdes constituent le groupe le plus large des phénols végétaux, représentant plus de la moitié des huit milles composés phénoliques naturels. Les flavonoïdes sont des composés de faible poids moléculaire qui consistent en 15 atomes carboniques, disposés sous la configuration : C6-C3- C6 (**Figure 17**) (**Balasundram *et al.*, 2006**). Les flavonoïdes sont composés généralement de deux cycles benzéniques (cycles A et B) liés par un hétéro- cycle contenant un oxygène (cycle C) (**Tsao et Deng, 2004**).

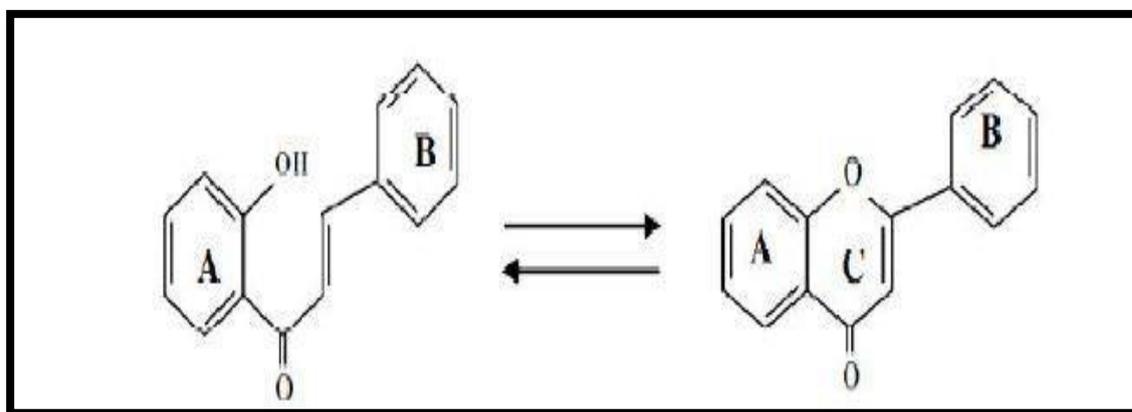


Figure 17. Structure de base d'un flavonoïde (**Missaoui, 2018**).

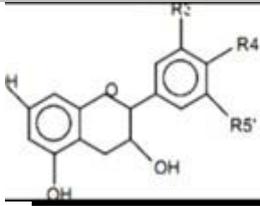
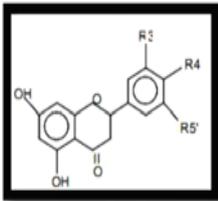
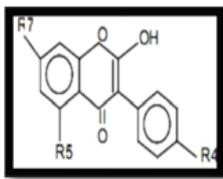
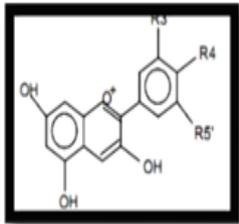
Des variations dans des modèles de substitution dans le cycle C a pour résultat les principales classes de flavonoides, c.à.d. les flavones, les flavonols, les flavanes, les flavanones, et les anthocyanidines, dans lesquelles : les flavones et les flavonols sont les plus répandues et structuralement diverses (**Tableau 9**). Des substituants des cycles A et B donnent naissance à des composés différents à l'intérieur de chaque classe de flavonoides. Ces substitutions peuvent impliquer l'oxygénation, l'alkylation, la glycosylation, l'acylation et la sulfatation

(Balasundram *et al.*, 2006).

➤ Propriétés physico-chimiques des flavonoïdes

Les hétérosides de flavonoïdes sont en général solubles dans l'eau et les alcools. Les génines sont pour la plupart, solubles dans les solvants organiques apolaires. L'extraction par macération est réalisée habituellement à l'aide du méthanol ou éthanol ou de mélanges méthanol-eau ou d'éthanol-eau parfois d'acétonitrile-eau. (Sarni-Manchado *et al.*, 2006).

Tableau 10. Présente quelques classes distinctes des flavonoïdes (Bougandoura, 2011).

| Sous-Classe | Formule | Source | Propriétés |
|-------------|---|---------------------------------------|---|
| Flavanols |  | - Raisins - Thé - Cacao | -Antioxydants naturels - Anticancéreuses. |
| Flavanones |  | - Orange - Citron | -Neutralisation des radicaux libres - Le prévention des cancers de la peau. |
| Isoflavones |  | - Soja | -Phytoestrogéniques -Source de phytoestrogène |
| Anthocyane |  | - Myrtille - Aubergine - Prume. | -Antiseptiques urinaires -Présente comme des couleurs brillant dans les fruits et légumes. |

➤ Activités biologiques des flavonoïdes

Comme cela a été démontré par de nombreux travaux, les flavonoïdes sont des molécules de défense contre les organismes pathogènes, leurs propriétés ont été exploitées pour leur un potentiel en thérapeutique contre les microorganismes. On leur reconnaît des activités antivirales,

Antitumorales, anti-inflammatoires, antiallergiques et anticancéreuses. Ils ont également des actions positives sur le diabète, les maladies d'Alzheimer et de Parkinson (**Saffidine, 2015**).

II.4.1.3. Coumarines

Les coumarines sont des hétérocycles oxygénés ayant comme structure de base le benzo-2-pyrone, dérivent des acides hydroxy cinnamiques par cyclisation interne de la chaîne latérale.

Ils ont été isolés pour la première fois par Vogel en 1820 dans le *Coumarounaodorata*. Du point de vue structural, ils sont classés en coumarines simples avec des substituants sur le cycle du benzène, les furanocoumarines, les pyranocoumarines, les coumarines substituées en position 3 et/ou 4. Le dernier groupe serait celui des dimères (**Figure 18**) (**Sakagami et al. 2005**).

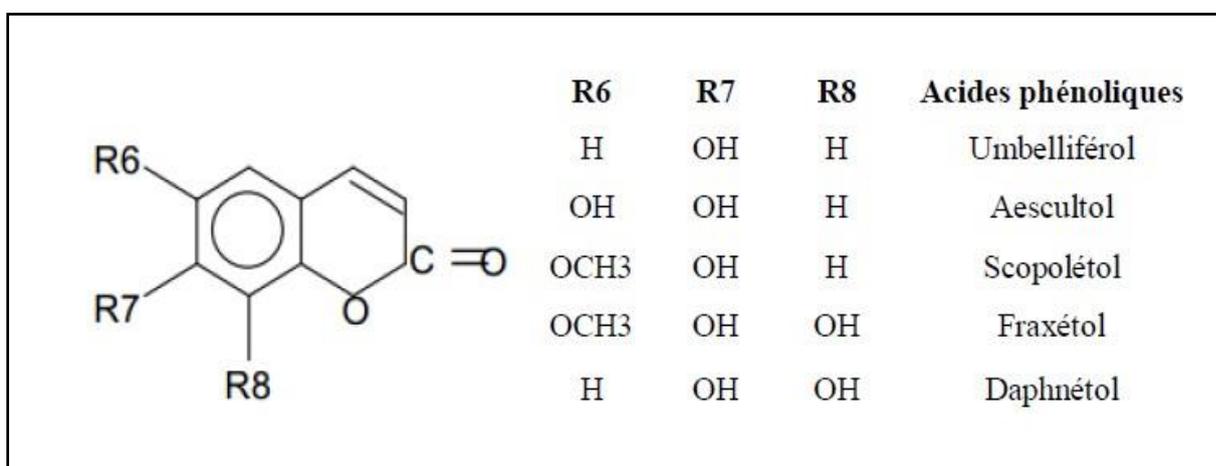


Figure 18. Principaux types de coumarines (**Macheix et al. 2005**).

II.4.1.4. Tanins

Cette classe désigne le nom général descriptif du groupe des substances phénoliques polymériques, ayant une masse moléculaire comprise entre 500 et 3000 qui présente, à côté des réactions classiques des phénols, la propriété de précipiter les alcaloïdes, la gélatine et d'autres protéines (**Bouchouka, 2016**).

Les tanins sont présents dans une variété de plantes utilisées dans l'alimentation notamment les céréales et les légumineuses (haricots secs, petit pois) et les fruits comme orange, pêche, poire, kaki, fraise et les raisins (**Peronny, 2005**).

Sur le plan structural, les tanins sont divisés en deux groupes : les tanins hydrolysables et

Tanins condensés (**Figure 19**) (**Santos- buelga et Scalbert, 2000**).

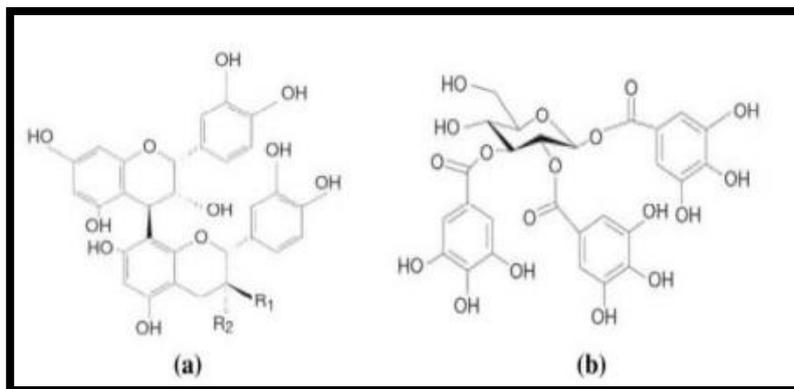


Figure 19. Structures chimiques (a) d'un tanin condensé et (b) d'un tanin hydrolysable (**Favier, 2003**).

II.4.1.5. Anthocyanes

Ce sont des pigments rouges en milieu acide, virant au bleu en milieu alcalin ; ils sont très répandus dans les fleurs et les fruits.

Les anthocyanes sont des dérivés du cation 2-phényl-1-benzopyrylium (flavylium) porteur de 3 cycles aromatiques conjugués d'où l'absorption de lumière visible. Dans la nature, ces pigments n'existent pas sous forme aglycone, mais sous forme d'hétérosides.

Les sucres sont liés au chromophore en position 3, mais aussi en position 5 et plus rarement en position 7 (**Brouillard, 1986**) (**Figure 20**).

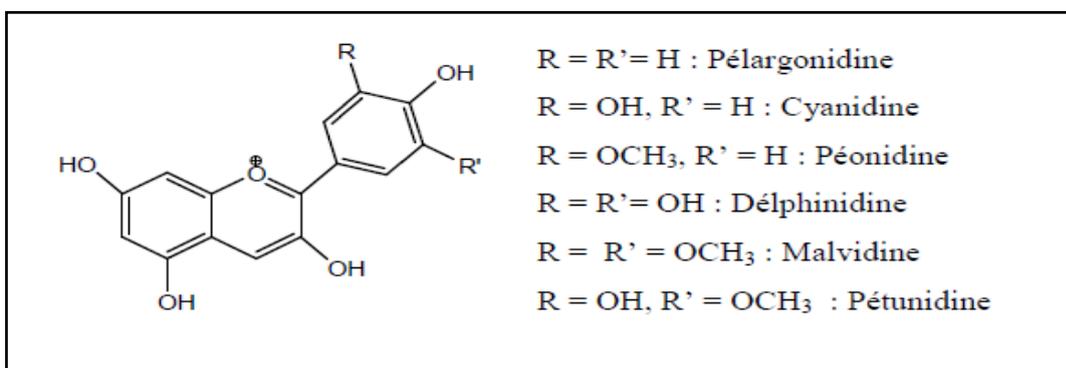


Figure 20. Différentes classes de l'anthocyane (**Brouillard, 1986**).

II.4.1.6. Lignanes

Sont un groupe de phytonutriments largement distribués dans le règne végétal (**Imran et al., 2015**). Ce sont des composés dimères formés par le couplage de deux fragments (C6-C3) monomères dérivées de la voie des phénylpropanoïdes (**Figure 21**) (**Gilani et Anderson, 2002**).

Les Lignanes phénoliques se trouvent dans la plupart des plantes riches en fibres, y compris les graines de citrouille, graines de sésame, les céréales, les fruits et les légumes (**Imran et al., 2015**). En fonction de la structure, les lignanes peuvent être classés en cinq familles de composés : lignanes, néolignanes, sesquilignanes, dineolignanes, norlignans et des lignanes hybrides (**Calvo-Flores et al., 2015**).

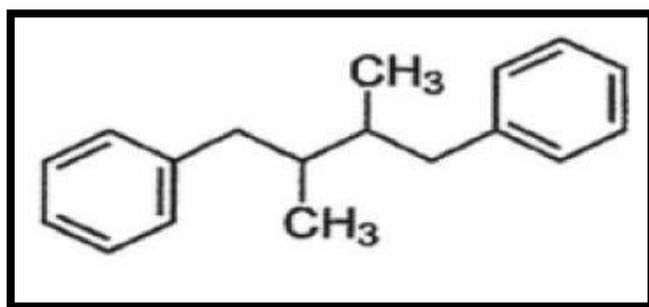


Figure 21. Structure de lignane (**Jost et Jost-Tse, 2016**).

II.4.2. Terpènes

Les terpènes sont des hydrocarbures naturels, de structures soit cyclique soit chaîne ouverte : leur formule brute est $(C_5H_x)_n$ dont x : est variable en fonction de degré d'insaturation de la molécule et n peut prendre des valeurs (1-8) sauf dans le polyterpènes qui peut atteindre plus de 100 (le caoutchouc), la molécule de base est l'isoprène de formule C_5H_8 (**Figure 22**) (**Bezzaz, 2014**).

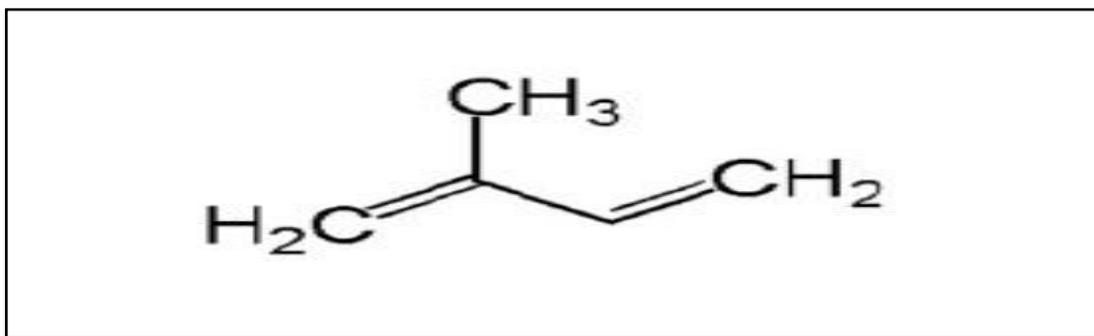


Figure 22. Structure de l'isoprène (Hininger, 2011).

II.4.3. Les alcaloïdes

Le terme « alcaloïde » a été introduit par W. Meisner au début du XIX^{ème} siècle, la définition admise des alcaloïdes est celle donnée par **Winterstein et Trier en 1910**. Un alcaloïde est une substance organique azotée d'origine végétale à caractère alcalin et présentant une structure moléculaire hétérocyclique complexe (**Badiaga, 2011**).

Généralement, les alcaloïdes sont produits dans les tissus en croissance : jeunes feuilles, jeunes racines. Puis, ils gagnent ensuite des lieux différents et, lors de ces transferts, ils peuvent subir des modifications. Chez de nombreuses plantes, les alcaloïdes se localisent dans les pièces florales, les fruits ou les graines, ces substances sont trouvées concentrées dans les vacuoles (**Krief, 2003**). Ce sont des composés relativement stables qui sont stockés dans les plantes en tant que produits de différentes voies biosynthétiques (**Mauro, 2006**).

Les alcaloïdes sont des hétérocycliques à caractère alcalin contenus essentiellement dans les plantes (**Ouahas, 1996**) (**Figure 23**).

Selon leur structure chimique et surtout leur structure moléculaire, on peut diviser les alcaloïdes en plusieurs groupes selon **Volack et Stodola (1983)** :

- Des phénylalanines** : capsaïcine du piment, colchicine du colchique ;
- Des alcaloïdes isoquinoléiques** : morphine, ethylmorphine, codéine et papavérine contenus dans l'opium du pavot ;
- Des alcaloïdes quinoléiques** : tige feuillée de la rue commune ;
- Des alcaloïdes pyridiques et pipéridiques** : ricine du ricin, trigonelline du fenugrec
- Des alcaloïdes dérivés du tropane** : scopolamine et atropine de la belladone ;
- Des alcaloïdes stéroïdes** : racine de vératre, douce-amère ou aconit (aconitine) par exemple.

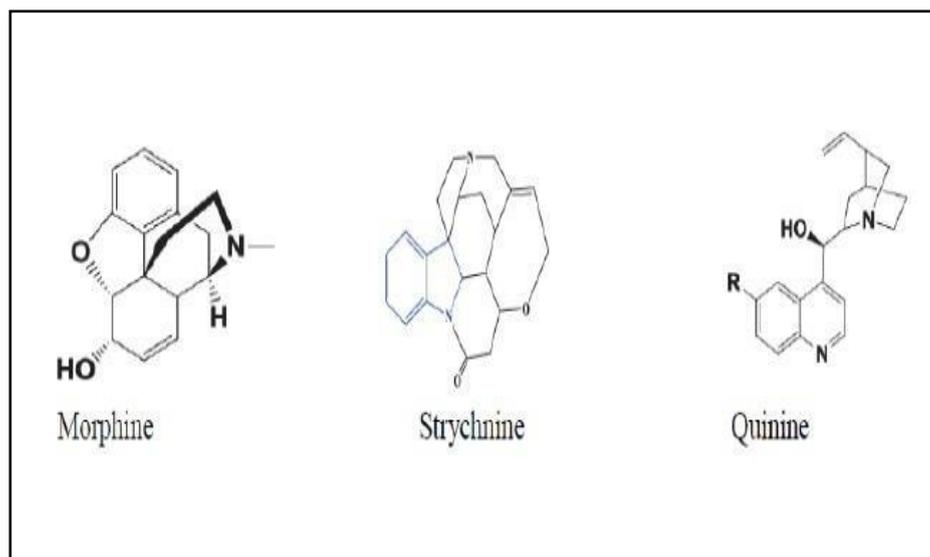


Figure 23. Exemples des dérivés d'alcaloïdes (Badiaga, 2011).

II.4.4. Hétérosides

Les hétérosides ou glycosides sont des molécules formées par combinaison d'oses et de substances non glucidique appelées aglycones ou génines.

Ce sont les substances du métabolisme secondaire les plus anciennement connues. Ils forment des substances de réserve localisés dans la vacuole cellulaire.

Les hétérosides se différencient entre eux par leurs génines qui appartiennent à tous les groupes du métabolisme secondaire et par le mode de liaison entre la génine et l'ose, ainsi que par la nature de la partie glucidique. Ils sont classés selon la nature de la liaison C, N, O, S- hétérosides (Guignard, 2000).

A decorative rectangular frame with a shadow, featuring intricate black scrollwork and flourishes along its border. The frame is centered on the page and contains the text.

Partie 02 :
expérimentales



***Chapitre I.
Matériel et
méthodes***

Notre travail a porté sur l'étude phytochimique des feuilles de *Pennisetum glaucum* (L), Cette étude a été réalisée au niveau du laboratoire de Biochimie, Faculté des sciences de la nature et de la vie, université Frères Mentouri 1.

I.1. Matériel

I.1.1. Matériel végétal

Le matériel végétal, exploité dans cette étude, est constitué des Feuilles de *Pennisetum glaucum* L. (**Figure 24**), qui ont été récoltées au mois de juillet 2021 (période de floraison), dans la région de Constantine (Est de d'Algérie). L'identification botanique de la plante a été faite par M^{me} Labeled Hanane (Doctorant au département des sciences biologiques de l'université Frères Mentouri, Constantine 1).

Les feuilles ont été nettoyées, séchées à l'air libre, puis broyées à l'aide d'un broyeur électrique et conservées à sec dans des flacons en verre, à température ambiante et à l'abri de la lumière.



Figure 24. Feuilles de *Pennisetum glaucum* L.

I.2. Dosage des Métabolites secondaires

I.2.1. Préparation des échantillons

Deux procédés de prétraitement ont été réalisés pour faciliter l'extraction des composés phénoliques : séchage et broyage. (**Figure 25**)

➤ Séchage

Après récolte, le matériel végétal (feuilles) est séché dans un endroit sec pour assurer une bonne conservation du spécimen, et aéré à l'abri de la lumière.

➤ Broyage

Broyez les feuilles avec un broyeur jusqu'à ce qu'elles deviennent une poudre. Conserver la poudre dans des bocaux en verre propres, à température ambiante et à l'abri de la lumière. Qui est ensuite utilisé dans le processus d'extraction.

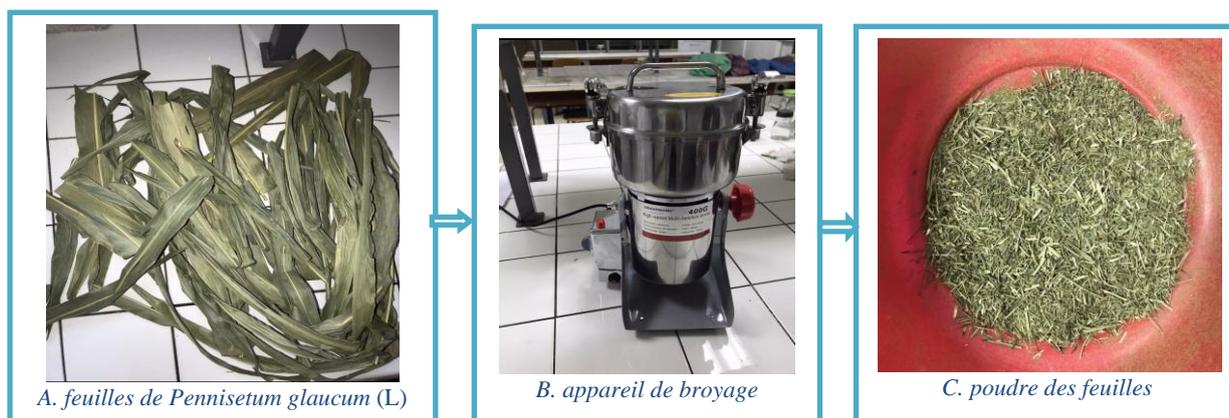


Figure 25. Préparation de la matière végétale

I.2.2 Méthodes d'extraction

Notre travail est réalisé par deux méthodes d'extraction successives, solide - liquide, et liquide - liquide, le protocole d'extraction a été réalisé selon la méthode (**Markham., 1982**)

I.2.2.1 Extraction solide-liquide

100 g de poudre de plante ont été trempés dans un mélange hydro-alcoolique (méthanol 70%, l'eau distillé 30%) sous agitation pendant 24 h (**Figure 26**). Le mélange a été filtré sur un papier filtre Whatman (0,5 μ m) par filtration sous vide (**Figure 27**), et le trempage a été répété trois fois pendant 72 h. Le solvant se réapprovisionnant toutes les 24 h pour permettre aux composés d'être dissous au maximum. Les solutions filtrées sont combinées pour donner l'extrait méthanolique (brut).

Après la troisième filtration, les deux filtras sont mélangés et évaporés à 45°C à l'aide d'un rotavapor de type BÜCHI.

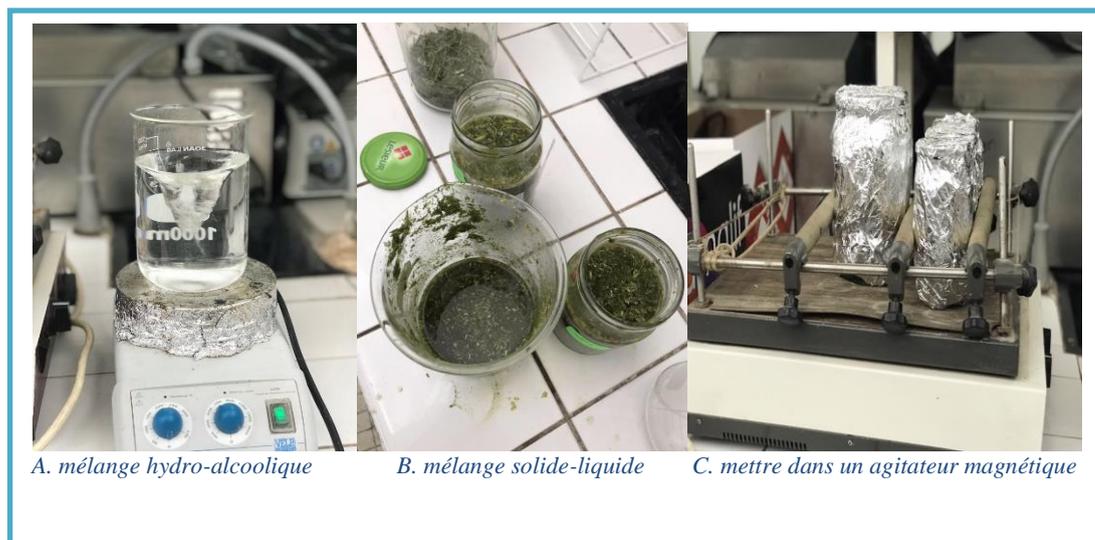


Figure 26. Macération à la température ambiante et à l'ombre 24h (Répétée trois fois)



Figure 27. Filtration des extraits avec papier filtre.

➤ Evaporation et récupération du solvant

Après l'opération de l'extraction, c'est l'installation de l'appareil « Evaporateur – rotatif ».

L'évaporateur rotatif (rota-vapeur) est un appareil utilisé en chimie afin de distiller rapidement les solvants, dans le but de concentrer partiellement ou totalement une solution ou une suspension. Le principe de cet appareil est basé sur la distillation simple sous vide, qui permet d'éliminer rapidement de grandes quantités de solvant. (Rihaneet.,2013).

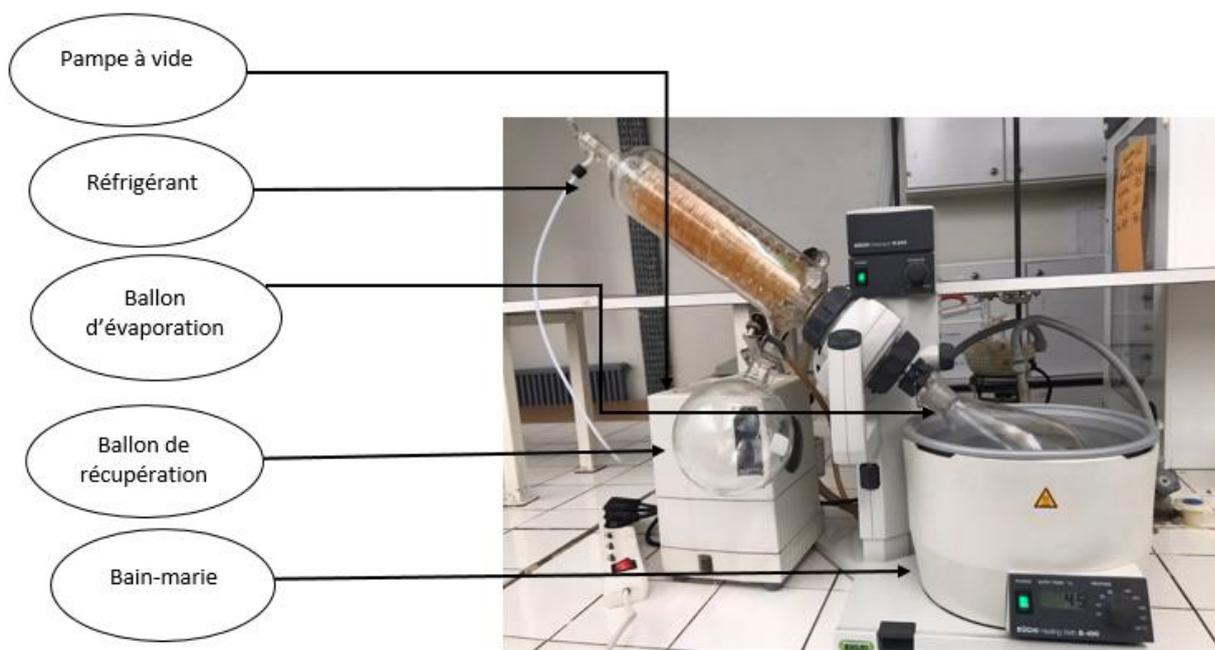


Figure 28. Rota-vapeur utilisé.

Le protocole d'évaporation est le suivant :

- Mettre la solution dans le ballon d'évaporation
- Mettre en marche le chauffage du Rota-vapeur rotatif à 45°C (**figure 28**)
- Puis le séchage se fait en évaporant le solvant mixte pour récupérer l'extrait pur.

Le Protocole de préparation des extraits méthanolique est bien détaillé dans la **figure 29**.

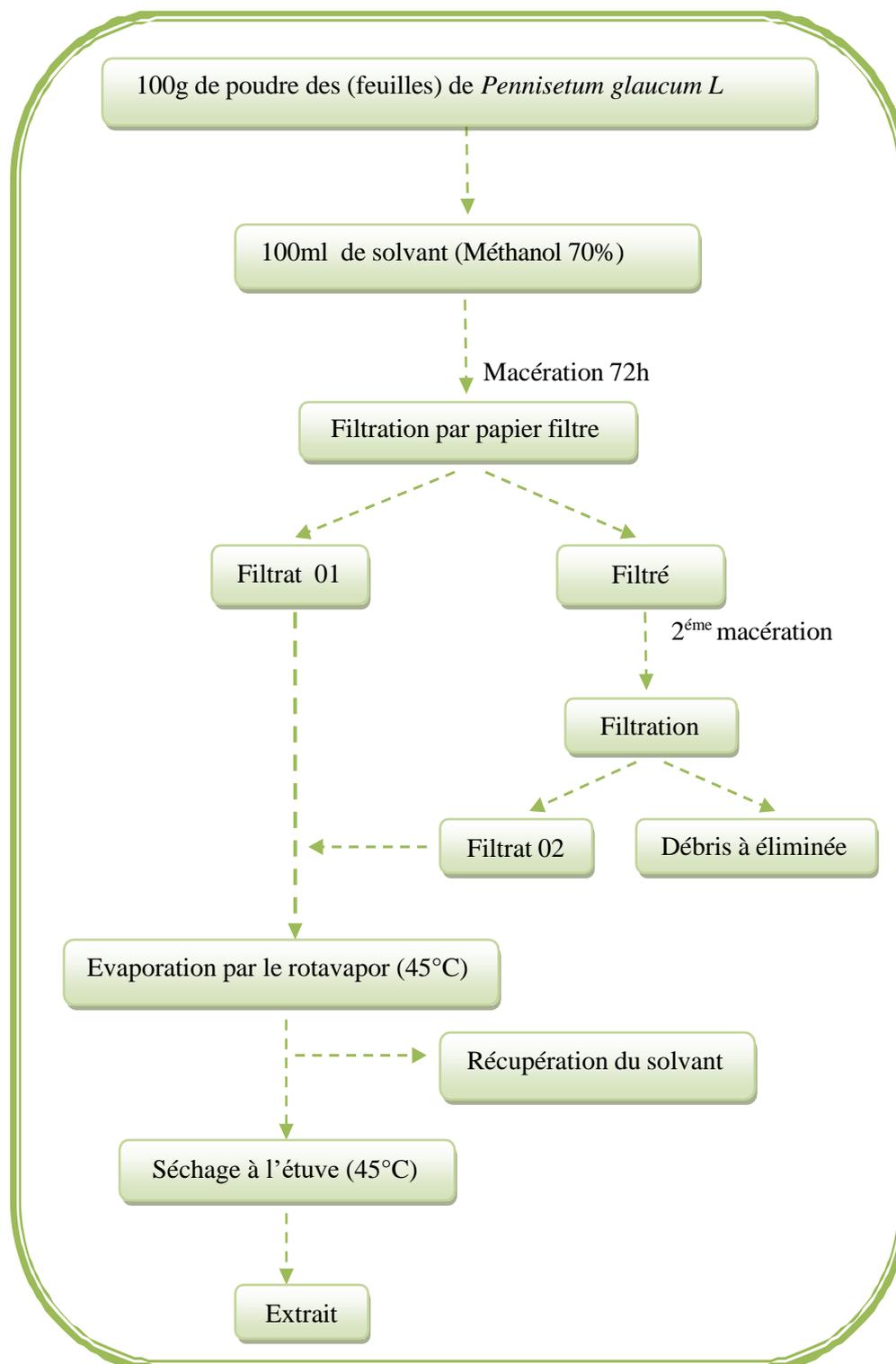


Figure 29. Protocole de préparation des extraits (méthanol)de *Pennisetum glaucum* L. (Mil).

Les étapes de réalisation de notre extrait brut sont bien illustrées dans la **figure 30**.

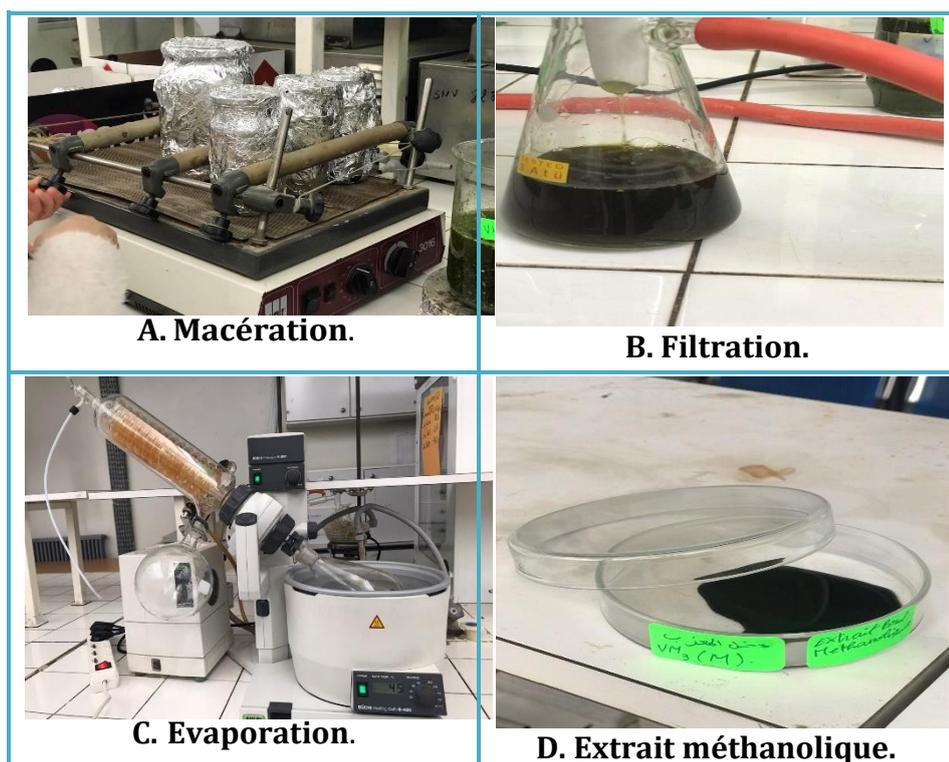


Figure 30. Les étapes de l'extraction solide -liquide.

I.2.2.2. Extraction en phase liquide- liquide

Le reste de l'extrait méthanolique sec est repris dans l'eau distillée bouillante (300 ml) qui solubilise proportionnellement les flavonoïdes. La solution obtenue est filtrée sur papier filtre Whatman (0,5) afin d'éliminer les substances non phénoliques (Impuretés, graisses, ...).

La solution aqueuse obtenue est soumise à des affrontements successifs à l'aide de Solvants de polarité croissante (**Tableau 11**) :

- ✓ Affrontement par le chloroforme
- ✓ Affrontement par l'acétate d'éthyle
- ✓ Affrontement par le n-butanol.

A l'aide d'une ampoule à décanté, la phase aqueuse subit un premier affrontement pour débarrasser des cires, des lipides et de la chlorophylle par trois lavages successifs par chloroforme avec (3X100 ml),

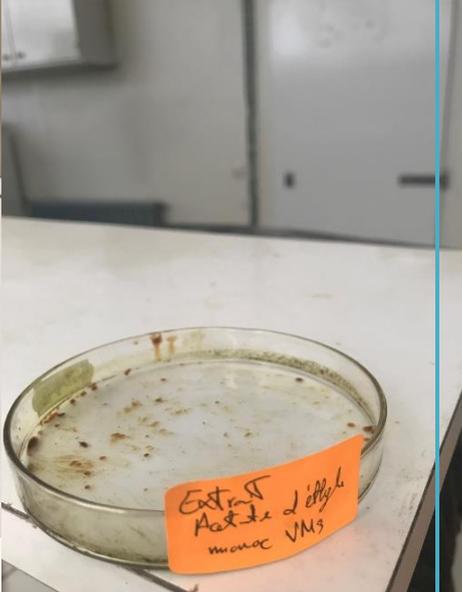
Le deuxième affrontement est par l'acétate d'éthyle (3X100 ml) afin de récupérer dans la phase organique certains flavonoïdes aglycones mais surtout les monoglycosides.

Et finalement le troisième affrontement qui sera avec le n-butanol (3X100 ml) pour récupérer

notamment les flavonoïdes di et triglycosides

Les trois phases sont à la fin récupérées (la phase chloroformique, la phase acétate d'éthyle, la phase n- Butanol), évaporées à sec sous pression réduite 45°C au rotavapor et conservées dans des boites de pétri à 4 °C jusqu'à leurs utilisations.

Tableau 11. Fractionnement de l'extrait méthanolique en phase liquide- liquide.

| Solvant | Fractionnement (deux phases) | Récupération |
|---|---|---|
| <p>Chloroforme</p> <p>(3 fois)</p> |  |  |
| <p>Acétate d'éthyle</p> <p>(3 fois)</p> |  |  |



I.2.2.3. Rendement d'extraction

Le rendement d'extraction correspond au pourcentage des métabolites secondaires dissouts dans un solvant organique et/ou aqueux utilisé pour l'extraction (Abe *et al.*, 2010).

Dans notre expérimentation, le rendement a été déterminé par rapport à une masse de 100g (M0) des parties aériennes de la plante du genre *Pennisetum glaucum* L.

Le rendement est défini comme étant le rapport entre la masse de l'extrait sec obtenue après évaporation du solvant et la masse de la poudre végétale utilisée. Ce rendement est calculé par l'équation suivant :

$$R (\%) = [M1 / M0] \times 100$$

R % : Rendement des extraits exprimés en pourcentage (%).

M1 : la masse de l'extrait sec.

M0 : la masse de la poudre végétale

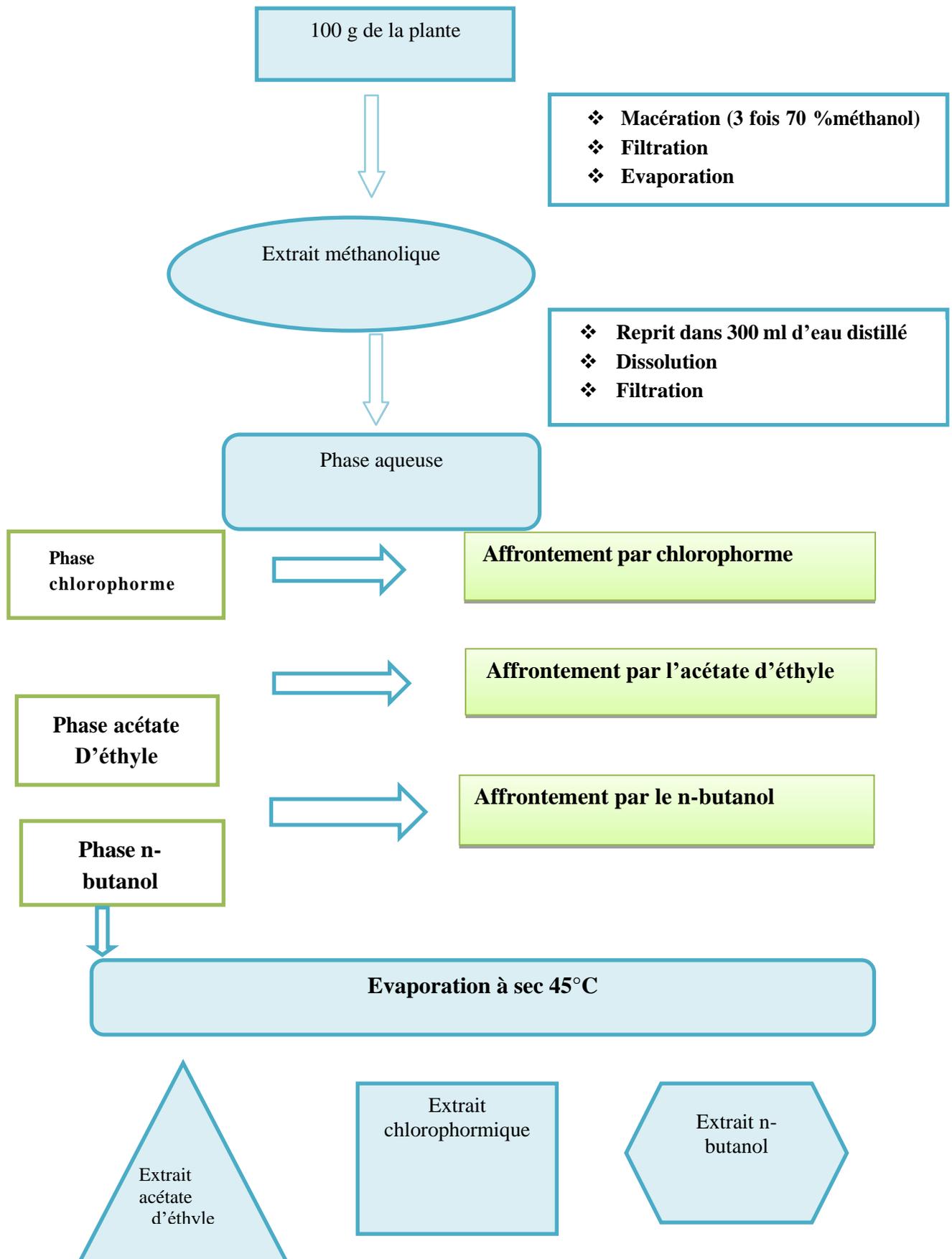


Figure 31. Schéma illustrant les différentes étapes d'extraction.

I.2.3. Analyse quantitative

I.2.3.1. Dosage de polyphénols totaux

La concentration en polyphénols a été déterminée par spectrophotométrie selon la méthode de Folin-Ciocalteu (**Singleton *et al.*, 1974**). Ce réactif de couleur jaune est constitué par un mélange d'acide phosphotungstique ($H_3PW_{12}O_{40}$) et d'acide phosphomolybdique ($H_3PMo_{12}O_{40}$). Lorsque les polyphénols sont oxydés, ils réduisent le réactif de Folin-Ciocalteu en un complexe ayant une couleur bleue constitué d'oxyde de tungstène (W_8O_{23}) et de molybdène (Mo_8O_{23}) (**Ribéreau-Gayon, 1968**). La coloration bleue produite est proportionnelle à la teneur en phénols totaux et possède une absorption maximum aux environs de 725 -750 nm est proportionnelle à la quantité de polyphénol présents dans les extraits végétaux (**Boizot et Charpentier, 2006**).

La teneur en polyphénol de nos extraits est estimée à partir de la courbe d'étalonnage $Y=0.644X+0.237$; Y= l'absorbance, X = concentration de la solution acide gallique par mg/ml

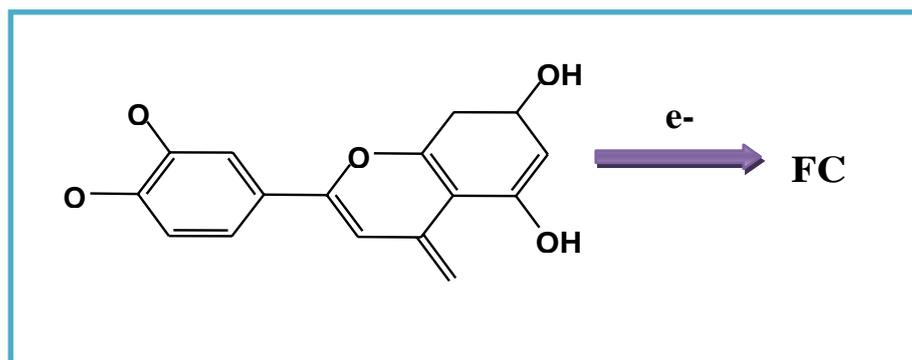


Figure 32. Mécanisme réactionnel du test polyphénols totaux (**Muller *et al.*, 2010**).

❖ Mode opératoire

Les étapes de la technique de dosage des phénols totaux sont :

- 1-introduction de 200 de l'extrait brut méthanolique des feuilles dans des tubes à essai.
- 2- Addition du mélange (1000 μ l du réactif de Folin-Ciocalteu dilué 10 fois et 800 μ l de carbonate de sodium à 7.5 %)
- 3- Agitation des tubes, puis conservation durant 30 minutes à la température ambiante, le test est répété trois fois. Parallèlement, le blanc est préparé de la même manière en remplaçant l'extrait par le solvant utilisé (Méthanol).
- 4- l'absorbance est mesurée par un spectrophotomètre (type SHIMADZU UV-1280) à 765 mm contre un blanc

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 microgramme (μg) équivalent d'acide gallique par gramme de la matière végétale sèche (mg EAG/mg de MS).

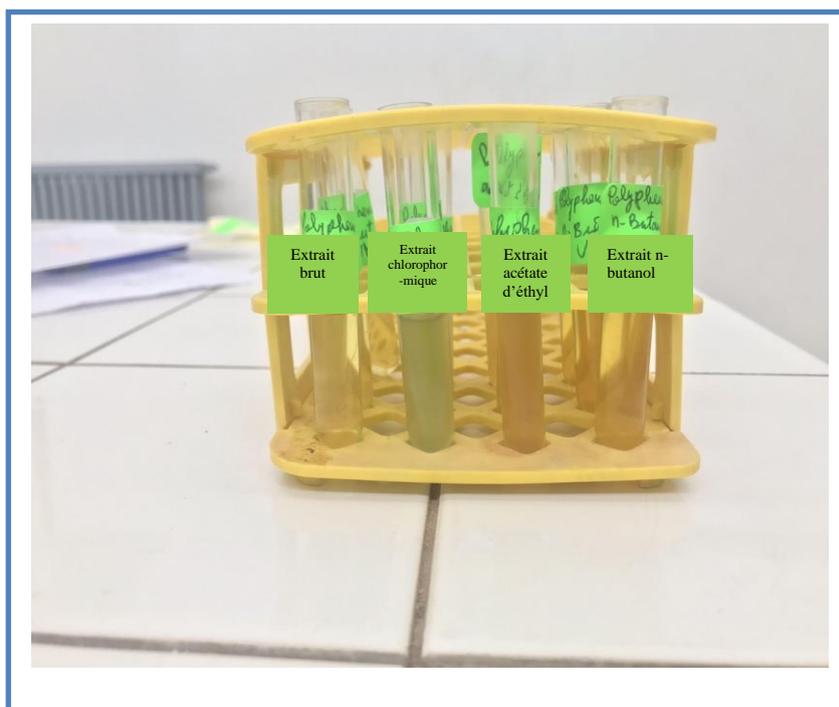


Figure 33. Dosage des phénols totaux.

❖ Expression des résultats

La détermination de la concentration des composés phénoliques totaux pour chaque extrait est faite à partir de l'équation de régression d'une courbe d'étalonnage standard (l'acide gallique) dont une gamme d'étalonnage linéaire ($y = ax + b$) est déjà réalisée dans les mêmes conditions expérimentales et le même protocole que les extraits. La teneur des composés phénoliques totaux des extraits est alors exprimée en milligramme équivalent d'acide gallique par gramme de matière sèche (mg GAE/g MS).

I.2.3.2. Dosage des Flavonoïdes

La teneur en flavonoïde de nos extraits a été estimée à partir de la courbe d'étalonnage

$$Y = 1,0207X + 0,321$$

Le dosage des flavonoïdes dans les extraits est basé sur la formation d'un complexe jaune entre

trichlorure d'aluminium (AlCl_3) et les flavonoïdes et la soude forme un complexe de couleur rose, absorbée dans le visible à 510 nm, la quantification des flavonoïdes est effectuée par une méthode adaptée par **Zhishen *et al.*, (1999)**.

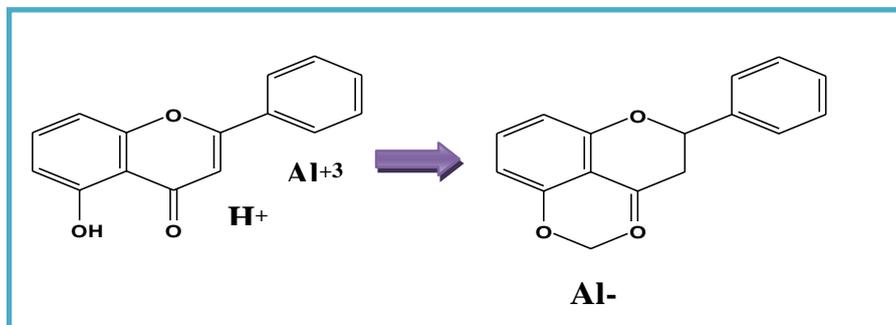


Figure 34. Mécanisme de l'interaction du chlorure d'aluminium avec les flavonoïdes (**Ribéreau-Gayon ,1968**).

❖ Mode opératoire

Les étapes de la technique de dosage des flavonoïdes sont :

- 1-Dilution de 300 μl de l'extrait brut méthanolique des feuilles avec 2700 μl d'eau distillée.
- 2-Ajout de 90 μl de nitrite de sodium (NaNO_2) à 5 %
- 3-Après 5 minutes, rajout de 90 μl de trichlorure d'aluminium (AlCl_3) à 10% (m/v) au mélange.
- 4-Après 6 min, addition de 300 μl d'hydroxyde de sodium (NaOH) à 4%.
- 5- Agitation immédiate du mélange afin d'homogénéiser le contenu



Figure 35. Dosage des flavonoïdes

❖ Expression des résultats

Les taux des flavonoïdes totaux pour chaque extrait est faite à partir de l'équation de régression

d'une courbe d'étalonnage standard (quercitrine) dont une gamme d'étalonnage linéaire ($y=ax+b$) est déjà réalisée dans les mêmes conditions expérimentales et le même protocole que les extraits. La teneur en flavonoïdes a été exprimée en milligramme équivalent de quercétine par gramme de matière sèche ($\mu\text{g EQ/g MS}$).

I.2.3.3. Dosage des Tanins

La teneur en tanins de nos extraits a été estimée à partir de la courbe d'étalonnage $Y=0.0003X+0.08$ (Boudersa, 2018) : Y = l'absorbance, X = concentration de la quercétine solution par $\mu\text{g/ml}$

Les tanins condensés sont déterminés par la méthode à la vanilline en milieu acide (**Price et al., 1978**). 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 tanins sont estimées, en utilisant la méthode de vanilline décrite par **Julkunen-Titto (1985)**.

❖ Mode opératoire

Les étapes de la technique de dosage des tanins sont :

- 1 - Ajout de 50 μl de l'extrait brut à 1500 μl de la solution (vanilline/méthanol) (4%, m/v).
- 2- mélanger à l'aide d'un vortex.
- 3- addition de 750 μl de l'acide chlorhydrique concentré (HCl).
- 4- Le mélange obtenu est laissé réagir à la température ambiante pendant 20 min.
- 5- L'absorbance est mesuré à 550 nm contre un blanc à l'aide d'un spectrophotomètre (Type SHIMADZU UV-1280).
- 6- Une courbe d'étalonnage est réalisée en parallèle dans les mêmes conditions opératoires en utilisant de la quercétine comme contrôle positif.
- 7- Les résultats sont exprimés en milligramme (mg) équivalent de quercétine par gramme de la matière végétale sèche ($\mu\text{g EAC/mg de MS}$).



Figure 36. Dosage des tanins

Tous les résultats des dosages ont été lus par un spectrophotomètre (**figure 37**)



Figure 37. La lecture de l'absorbance par le spectrophotomètre

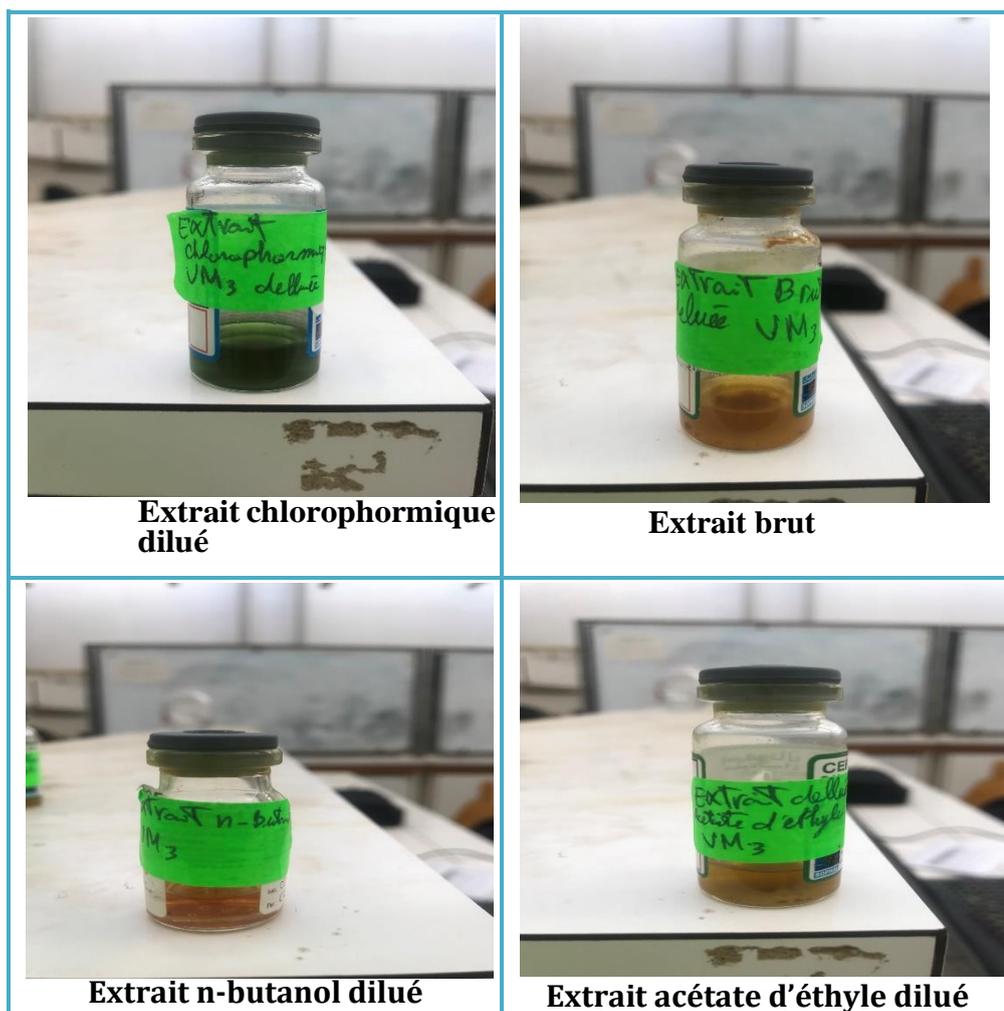
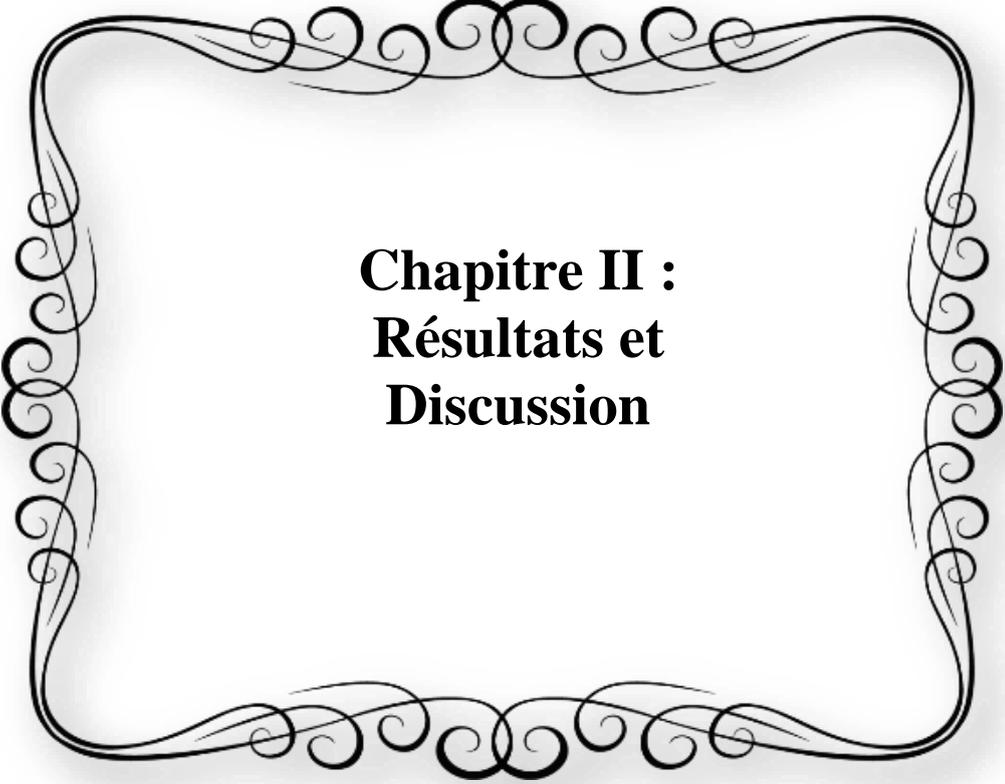


Figure 38. Les extraits dilués impliqués dans la phase de dosage

I.3. Etude Statistique

Pour corroborer les résultats obtenus, nous avons réalisé une ANOVA à un facteur suivi par le test des comparaisons des moyennes Newman Keuls au seuil 95% par le logiciel Excel Stat version 14.

A decorative rectangular frame with a shadow, featuring intricate black scrollwork and flourishes along its edges. The frame is centered on the page and contains the chapter title.

Chapitre II : Résultats et Discussion

II. Résultats et discussions

II.1. Rendement d'extraction

Les différents rendements obtenus des quatre fractions, issus de l'extrait méthanolique présentent une variabilité entre des caractéristiques de la couleur qui varie de vert foncé ou vert très foncé au marron foncé. Alors que, était visqueux chez les trois extraits à l'exception l'extrait acétate d'éthyle avait l'aspect cristallisé. (Tableau 12).

Tableau 12. Couleur, aspect et masse de chaque extrait de *Pennisetum glaucum* L

| Type d'extraction | Extraits | Masse (g) | Couleur | Aspect |
|------------------------|-------------------------|-----------|-----------------|-------------|
| Solide –liquide | Brut | 8.33g | Vert très foncé | Visqueux |
| Liquide-liquide | chlorophormique | 0.65g | Vert foncé | Visqueux |
| | Acétate d'éthyle | 0.25g | Marron foncé | Cristallisé |
| | n-Butanol | 0.30g | Marron foncé | Visqueux |

Le rendement de l'extrait brut issu de l'extraction solide-liquide, représente le rendement le plus élevé avec 8,33% (**Figure 39**). Tandis que, les différentes fractions de l'extraction liquide-liquide, issues de l'extrait brut par décantation, montrent que l'extrait chlorophormique témoigne d'un rendement moyen équivalent à 0,65%. Les deux autres extraits n-Butanol et acétate d'éthyle enregistrent des rendements bas et presque égaux équivalents 0.3 % et 0,25% respectivement.

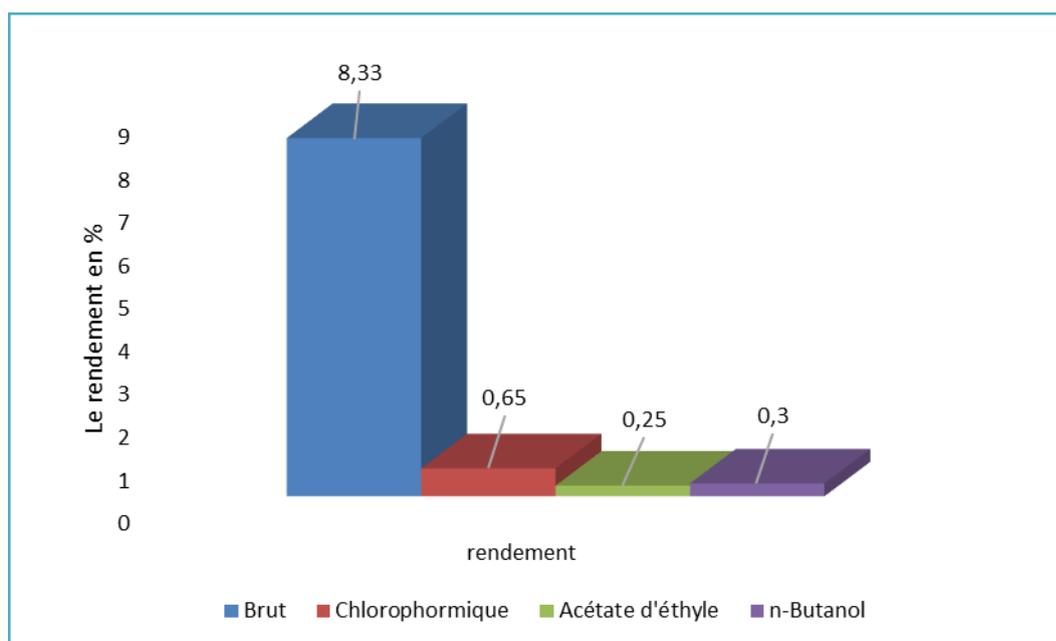


Figure 39. Les Rendements d'extraction des différents extraits

Les fluctuations du rendement d'extraction peuvent s'expliquer par des différences de solubilité du composé dans le solvant d'extraction, le degré de polymérisation ou l'implication dans d'autres structures moléculaires qui forment des complexes insolubles (**Cacace et Mazza., 2000**) dues aux différences de solubilité des composés phénoliques et d'autres métabolites secondaires (**Garciasalas et al., 2010**). Cependant, il existe d'autres paramètres qui peuvent être attribués à cette différence comme le pH, et la température du milieu, le temps d'extraction qui peut être très long, (72 heures par rapport à la méthode de décantation... (**Quy Diem Do et al., 2014**).

II.2. L'analyse quantitative des composés phénoliques

Les résultats obtenus La quantification des trois métabolites secondaires polyphénol, flavonoïde et tanins dans les quatre extraits sont présentés dans le **tableau 13**.

Tableau 13. Teneurs en polyphénols totaux, flavonoïdes et tanins dans l'extrait brut et ses fractions

| Extraits | Polyphénols (mg /ml EAG / d'extrait) | Flavonoïdes (µg/ml EQ /d'extrait) | Tanins (µg/ml EQ /d'extrait) |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Brut | 0,140 ±0,002 | 0,45 ±0,02 | 0,514 ±0,105 |
| chloroforme | 0,137 ±0,002 | 0,67 ±0,05 | 0,632 ±0,062 |
| n-butanol | 0,140 ±0,001 | 1,18 ±0,05 | 0,322 ±0,030 |
| acétate d'éthyle | 0,138 ±0,003 | 0,78 ±0,02 | 0,303 ±0,044 |

Les valeurs représentent la moyenne de 3 répétitions ± SD

II.2.1. Teneur des polyphénols totaux

Les polyphénols constituent aujourd'hui un vaste sujet des recherches et intéressent non seulement le chimiste, mais aussi les industries agroalimentaires par leurs implications, en particulier sur la saveur des aliments. Leur incidence sur la conservation des produits retient également l'attention dans le secteur alimentaire, mais aussi dans celui des cosmétiques et de la pharmacologie. Les propriétés antioxydantes ou anti-inflammatoires des polyphénols suscitent également beaucoup d'intérêt dans le domaine médical par leur caractère préventif à l'égard de diverses pathologies, comme les maladies cardiovasculaires ou dégénératives (**Cuénat, 2007**).

La quantification des polyphénols totaux a été déterminée par une méthode

spectrophotométrique de Folin-Ciocalteu (FCR). L'acide gallique est utilisé comme un étalon.

Le résultat obtenu est présenté dans une courbe d'étalonnage (**Figure 40**) dont l'équation :

$Y = 0,644X + 0,237$ avec $R^2 = 0,99966$

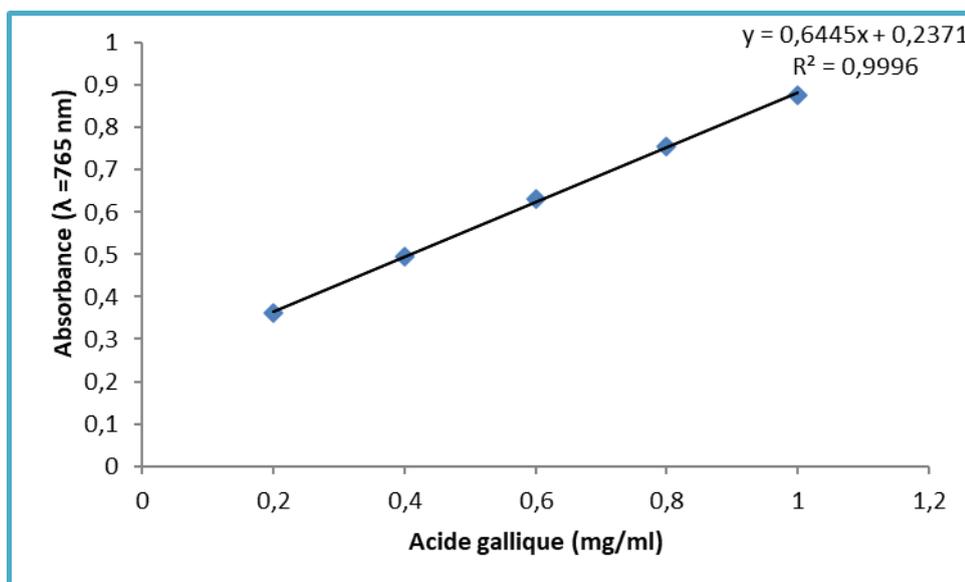


Figure 40. Courbe d'étalonnage de l'acide gallique pour le dosage des phénols totaux

Les teneurs en phénols totaux chez les deux extraits brut et n-butanol sont égaux et présentent une valeur de $0,140 \pm 0,002$ mg EAG / g d'extrait. Parallèlement, les deux extraits acétate d'éthyle et chloroformique enregistrent deux valeurs très proches avec une moyenne de $0,138 \pm 0,003$ et $0,137 \pm 0,002$ mg EAG / g d'extrait respectivement. On observe que les deux extraits brut et n-Butanol sont plus riches en phénols totaux que les deux extraits acétate d'éthyle et Chlorophormique.

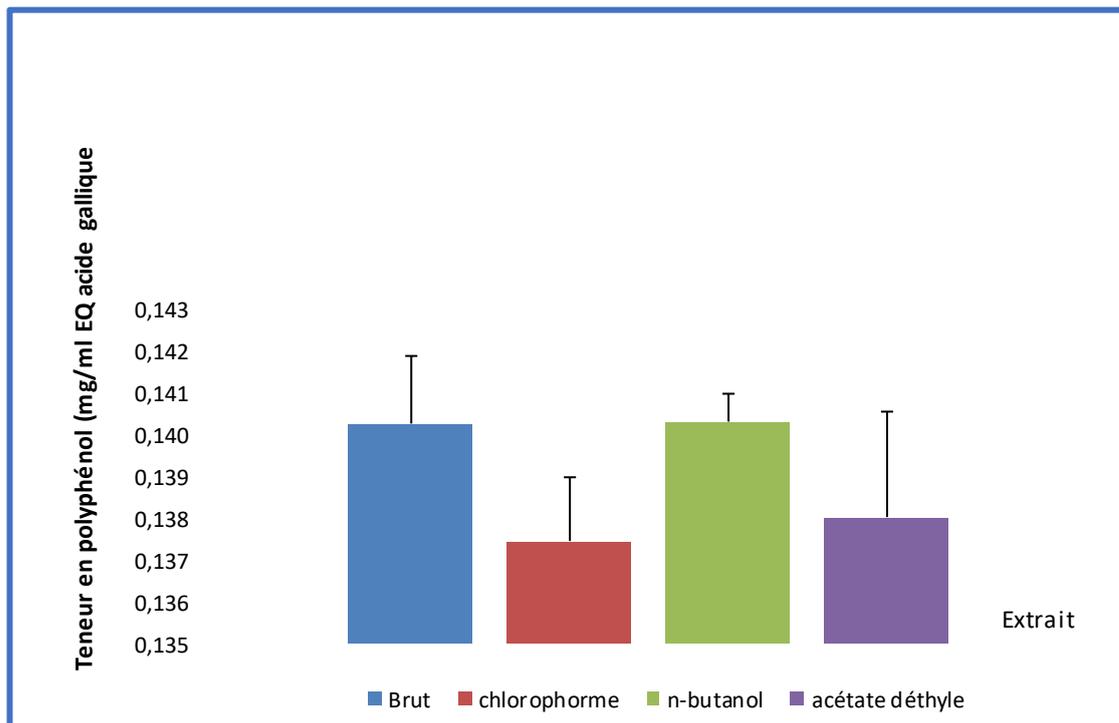


Figure 41. Teneur en phénols totaux dans les quatre extraits chez les feuilles de *Pennisetum glaucum* L.

Les différentes teneurs en composés phénoliques entre les plantes résultent de l'effet d'un certain nombre de facteurs dont les principaux sont la lumière, les précipitations, la topographie, la saison et la maturité. A ce propos, **Macheix *et al.*, 1990** signalent que la concentration des polyphénols est très variable d'une espèce à une autre et d'une variété une autre et diminue régulièrement durant la maturation et le stockage.

Nombreux travaux menés sur la détermination de la composition phénolique du millet ont été faits (**Sanaa *et al.*, 2006** ; **Gavirangappa et Krishnapura, 2012** ; **Irakli *et al.*, 2014**).

Sanna *et al.*, (2006) ont rapporté une valeur des polyphénols contenus dans les grains du millet qui n'ayant subi aucun traitement thermique, estimée à 1,387 mg GAE/g MS.

L'analyse de la variance de la teneur en polyphénols (Tableau 14) montre une différence significative entre les quatre extraits ($F= 2,289$ à $\alpha=0.155$)

Tableau 14. Analyse de variance de polyphénol

| Source | ddl | Somme des carrés | Carré moyen | F de Fisher | Pr > F |
|---------|-----|------------------|-------------|-------------|--------|
| Modèle | 3 | 0,002 | 0,001 | 2,289 | 0,155 |
| Résidus | 8 | 0,002 | 0,000 | | |
| Total | 11 | 0,004 | | | |

De ce fait, Le test Newman-keuls classe les quatre extraits dans le même groupe avec des petites différences que sont négligeable (**Tableau 15**) :

A <=> n-butanol ; brut ; acétate ; chlorophorme <=> 1.405 ; 1.405 ; 1.382 ; 1.376

Tableau 15. Classement et regroupements des groupes non significativement différents :

| Modalités | Moyenne | Regroupements |
|--------------|---------|---------------|
| n-Butanol | 1,405 | A |
| Brut | 1,405 | A |
| Acétate | 1,382 | A |
| Chlorophorme | 1,376 | A |

Cette différence de teneur en polyphénols peut être due à diverses méthodes d'extraction, notamment : Exemples : type de solvant, température, temps d'extraction (**Popovici et al., 2009**). Les polyphénols, comme leur nom l'indique, sont une classe de molécules caractérisées par la présence de nombreux groupements phénoliques attachés à des structures moins complexes et sont donc solubles dans les solvants organiques polaires et moins polaires (**Macheix et al., 2005**). Les solvants peu solubles qui ont donné les niveaux les plus élevés sont les extraits brut et n-butanol et qui sont les plus polaires.

II.2.2. Quantification des flavonoïdes

La quantification des flavonoïdes totaux a été déterminée par la méthode de **Zhishen et al., 1999**. La quercétine a été utilisé comme un standard, les résultats obtenus sont représentés dans une courbe d'étalonnage (**Figure 42**) ayant l'équation : $Y = 1,0207X + 0,321$ avec $R^2 = 0,9978$.

Dont la teneur en flavonoïdes est exprimée en mg équivalent d'acide quercétine par g d'extrait ($\mu\text{g/ml EQ / g}$).

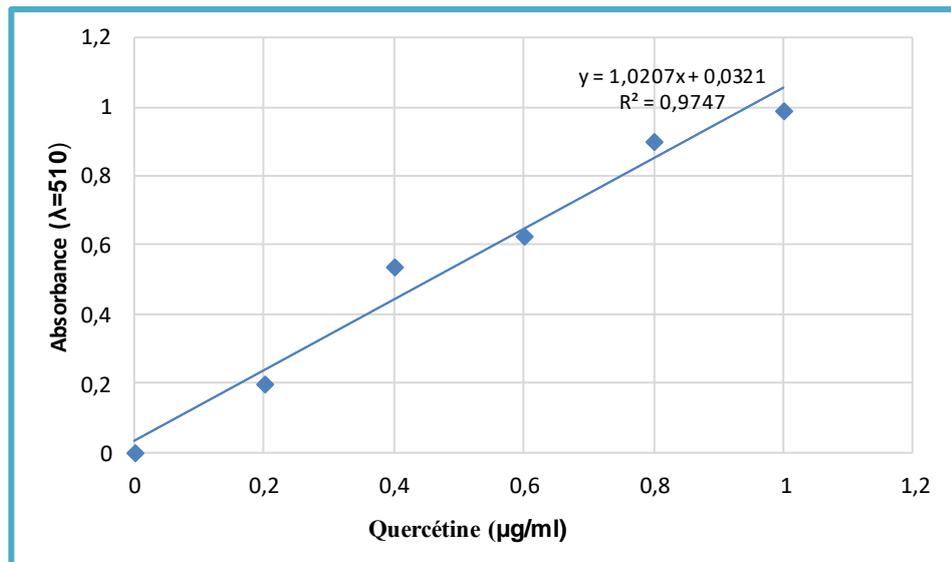


Figure 42. Courbe d'étalonnage de la quercétine pour le dosage des flavonoïdes

D'après nos résultats présentés (**Figure 43**), les teneurs en flavonoïdes des feuilles de *Pennisetum glaucum* L. révèlent que l'extrait n-butanol est plus riche en flavonoïdes avec une teneur $1,18 \pm 0,05$ µg/ml EQ g d'extrait, suivi par l'extrait acétate d'éthyle avec une teneur de $0,78 \pm 0,02$ µg/ml EQ /g d'extrait. Tandis que l'extrait chloroformique présente une teneur en flavonoïdes moyenne de l'ordre de $0,67 \pm 0,05$ µg/ml EQ g d'extrait

L'exception est soulevée uniquement avec l'extrait brut qui enregistre une faible teneur en flavonoïdes qui ne dépassant pas $0,45 \pm 0,02$ µg/ml EQ/g d'extrait.

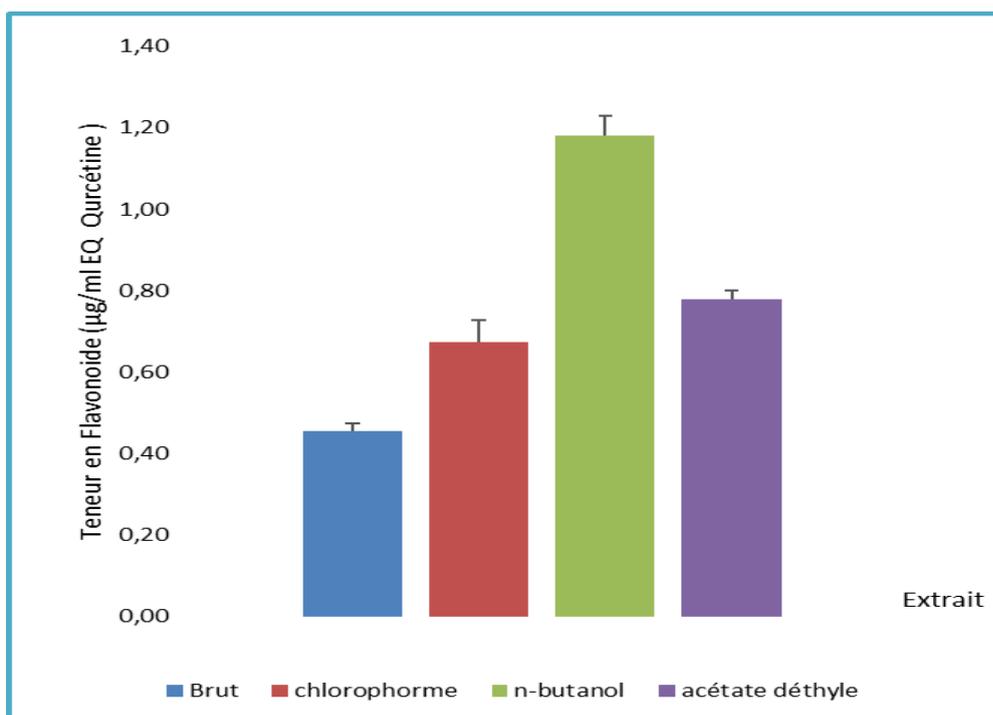


Figure 43. Teneur en flavonoïdes dans les quatre extraits chez les feuilles de *Pennisetum glaucum* L.

Ces différences des teneurs en flavonoïdes entre les extraits peuvent s'expliquer d'une part, par le nombre différent des structures sécrétoires dans les divers tissus végétaux, d'autre part par la sélectivité de chaque solvant utilisé pour le fractionnement. Car les flavonoïdes constituent le groupe le plus hétérogène des composés phénoliques, dont certaines classes sont solubles dans les solvants polaires tandis que, d'autres (les flavonoïdes aglycones) sont solubles dans les solvants apolaires donc on peut dire que *Pennisetum glaucum* L est riche en flavonoïdes polaires qu'apolaires (Macheix *et al.*, 2006 ; Kaurinovic et vastag, 2019 ; Gulcin,2020).

L'analyse de la variance de la teneur en flavonoïdes (tableau 16) montre une aucune très différence significative entre les quatre extraits ($F= 179,709$ à $\alpha=0,0001$).

Tableau 16. Analyse de variance de flavonoïde

| Source | ddl | Somme des carrés | Carré moyen | F de Fisher | Pr > F |
|---------|-----|------------------|-------------|-------------|----------|
| Modèle | 3 | 0,837 | 0,279 | 179,709 | < 0,0001 |
| Résidus | 8 | 0,012 | 0,002 | | |
| Total | 11 | 0,850 | | | |

De ce fait, le test Newman-keuls classe les quatre extraits en quatre groupes différentes (Tableau 17) :

$$A > B > C > D \leq \Rightarrow \text{n-butanol} > \text{acétate} > \text{chlorophorme} > \text{Brut}$$

$$1,182 > 0,777 > 0,674 > 0,454$$

Tableau 17. Classement et regroupements des groupes non significativement différents.

| Modalités | Moyenne | Regroupements |
|--------------|---------|---------------|
| n-Butanol | 1,182 | A |
| Acétate | 0,777 | B |
| Chlorophorme | 0,674 | C |
| Brut | 0,454 | D |

II.2.3. Quantification des tanins

La quantification des flavonoïdes totaux a été déterminée par la méthode de Price *et al.*, 1978. La quercétine a été utilisé comme un standard, les résultats obtenus sont représentés dans une courbe d'étalonnage (Boudersa, 2022) ayant l'équation : $Y = 0.0003X + 0,08$

Dont la teneur en tanins est exprimée en mg équivalent d'acide quercétine par g d'extrait

($\mu\text{g/ml EQ / g MS}$).

Les teneurs en tanins des feuilles de *Pennisetum glaucum* L. révèlent que l'extrait chlorophormique est plus riche en tanins avec une teneur $0,632 \pm 0,062 \mu\text{g/ml EQ/g}$ d'extrait, suivi par l'extrait Brut avec une teneur de $0,514 \pm 0,105 \mu\text{g/ml EQ / g}$ d'extrait. Tandis que l'extrait n-butanol présente de teneur en tanins moyenne de l'ordre $0,322 \pm 0,030 \mu\text{g/ml EQ/g}$.

L'exception est soulevée uniquement avec l'extrait acétate d'éthyle qui enregistre une faible teneur en flavonoïdes qui ne dépassant pas $0,303 \pm 0,044 \mu\text{g/ml EQ/g}$ d'extrait.

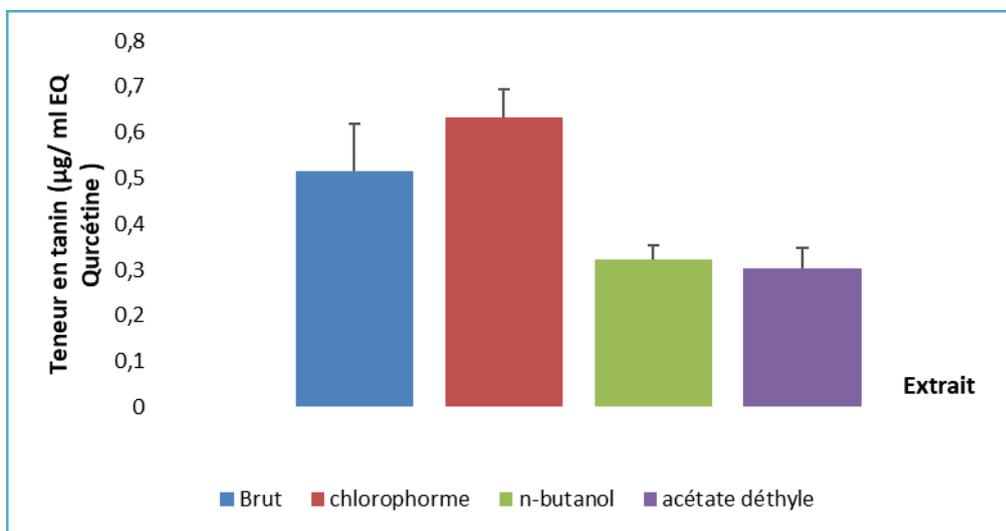


Figure 44. Teneur en tanin dans les quatre extraits chez les feuilles de *Pennisetum glaucum* L.

L'analyse de la variance de la teneur en tanins (**Tableau 18**) montre une différence hautement significative entre les quatre extraits ($F= 16,801$ à $\alpha=0.001$)

Tableau 18. Analyse de variance de tanin

| Source | ddl | Somme des carrés | Carré moyen | F de Fisher | Pr > F |
|---------|-----|------------------|-------------|-------------|--------|
| Modèle | 3 | 0,225 | 0,075 | 16,801 | 0,001 |
| Résidus | 8 | 0,036 | 0,004 | | |
| Total | 11 | 0,261 | | | |

Le test Newman-keuls classe les quatre extraits dans deux groupes distingués (**Tableau 19**) :

A > B \Leftrightarrow Chlorophorme ; Brut **>** n-butanol ; acétate \Leftrightarrow **0,632 ; 0,514 > 0,322 ; 0,303**

Tableau 19. Classement et regroupements des groupes non significativement différents

| Modalités | Moyenne | Regroupements |
|--------------|---------|---------------|
| Chlorophorme | 0,632 | A |
| Brut | 0,514 | A |
| n-Butanol | 0,322 | B |
| Acétate | 0,303 | B |

En comparaison nos résultats sur *Pennisetum glaucum* L avec des expériences précédentes sur *Triticum durum* Dsf) de la même famille Poaceae (BARA, 2017), dont la détection des composés phénoliques a été discutée, où le même solvant a été utilisé :

Les résultats pour les polyphénols sont :

➔ Teneur en polyphénol totaux de la variété VITRON (extrait de 90g) concentration en polyphénol mg/ml pour l'extrait acétate d'éthyle est $5,67 \pm 0,01$ mg EAG/g extrait

➤ Teneur en polyphénol totaux de la variété WAHA (extrait de 50g) concentration en polyphénol mg/ml pour l'extrait acétate d'éthyle est $3,50 \pm 0,08$ mg EAG/ g extrait

➔ Et ce sont des valeurs élevées par rapport aux valeurs que nous avons obtenues et estimées à $0,138 \pm 0,003$ mg EAG / g extrait

*les résultats pour les flavonoïdes sont :

➤ Teneur en flavonoïde de la variété VITRON (extrait de 90g) concentration en flavonoïde mg/ml pour l'extrait acétate d'éthyle est $7,59 \pm 0,61$ mg EQ / g extrait

➤ Teneur en flavonoïde de la variété WAHA (extrait de 50g) concentration en flavonoïde mg/ml pour l'extrait acétate d'éthyle est $4,38 \pm 0,5$ mg EQ / g extrait

➔ Les valeurs étaient également élevées par rapport aux valeurs que nous avons obtenues dans notre étude, qui étaient relativement faibles, estimées à $0,78 \pm 0,02$ µg/ml EQ g

Nous concluons que *Triticum durum* Dsf contient de grandes quantités de composés phénoliques par rapport à la plante de mil (*Pennisetum glaucum* L.)



Conclusion

Conclusion

Cette étude a été réalisée dans le laboratoire de la biochimie RDC de la Faculté des Sciences et de la Nature (F.S.N.V.) de l'université des frères Mentouri Constantine 1.

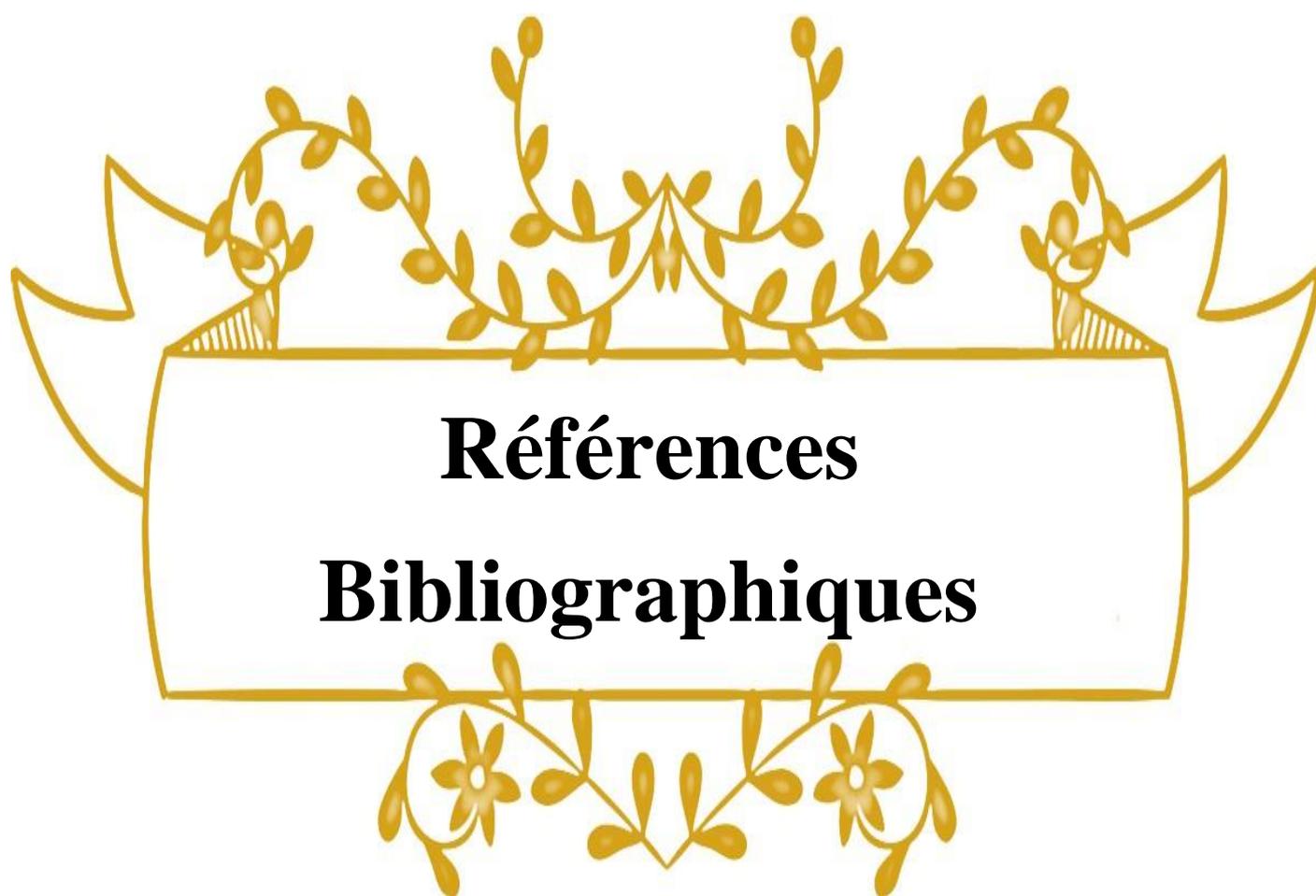
Le matériel végétal représente la partie aérienne de la plante de l'espèce mil (*Pennisetum glaucum* L), exactement les feuilles au stade floraison durant la campagne agricole 2020-2021.

Les feuilles ont subi trois macérations successives avec la solution méthanolique pendant 72h. L'extrait brut retenu représente la solution aqueuse qui a été soumise à quatre affrontements successifs par des solvants de polarité croissante (chloroformique, acétate d'éthyle, n-butanol et aqueuse).

Dans notre expérimentation, le rendement de chaque extrait a été déterminé par rapport à une masse de 100 g de la poudre végétale.

Les trois rendements issus révèlent une variabilité entre les caractéristiques à savoir couleur et aspect à l'exception la phase aqueuse qui a été contaminée.

Les résultats de l'étude quantitative des métabolites secondaires chez les quatre extraits enregistrent des valeurs différentes. L'extrait brut présente la teneur maximale en polyphénols estimée par la valeur $(1,140 \pm 0,02)$. Alors que l'extrait n-butanol représente de leur tour la plus grande valeur en flavonoïdes équivalente à $1,18 \pm 0,05$. En dernier, l'extrait chloroformique témoigne de la valeur optimale des tanins $(0,632 \pm 0,062)$.



Références

Bibliographiques

1. **A**basse T, Yayé A, Aboul Habou Z, Adamou AI, Adam T. 2013. Influence des Parcs agro-forestiers à *Piliostigma reticulatum* sur l'infestation des plants de mil par les insectes floricoles et *Coniesta ignefusalis* (Hmps) (Lépidoptère : Pyralidae) dans la zone d'Aguié au Niger. *Journal of Applied Biosciences*, 66 : 5140–5146. <http://www.m.elewa.org>
2. Abe E, Delyle SG, Alvarez JC. (2010). Liquid-liquid extraction: theory, applications and difficulties. *Annales de Toxicologie Analytique*, Vol. 22, n° 2, p 51-59.
3. Adam T. 2003. Cours d'Agriculture Spéciale Agro3. Faculté d'Agronomie, Université Abdou Moumouni, Niamey
4. ADEOLA O., Orban J.I., 1994, Chemical composition and nutrient digestibility of pearl mil (*Pennisetum glaucum*) fed to growing pigs, *J Cereal Science* 22: 177-184.
5. Afiniki BZ. 2005. Early sowing and métalaxyl seed treatment reduced incidence of pearl mil downy mildew [*Sclerospora graminicola* (sacc.)] in Samaru, Nigeria. *Journal of Plant Protection Research*, 45(3): 163-169. [http://www.plantprotection.pl/PDF 45\(3\)/JPPR](http://www.plantprotection.pl/PDF 45(3)/JPPR)
6. Ahmadi N, Chantereau J, Hekimian Lethève C, Marchand JL., Ouendeba B, 2002. Le mil. In *Mémento de l'agronome : Les céréales*. CIRAD-GRET (ed). Ministère des Affaires étrangères ; 17-23.
7. Ahmadvand, G., Hajinia, S. (2018). Effect of endophytic fungus *Piriformospora indica* on yield and some physiological traits of mil (*Panicum miliaceum*) under water stress. *Crop and Pasture Science*, 69(6), 594– 560. DOI 10.1071/CP17364.
8. Ahuja, K. G., Nath, P., & Swamy, K. R. M. (2010). *Foods and Nutrition*, 1st ed. New Delhi, India: Studium Press.
9. Ajithkumar, I. P., Panneerselvam, R. (2014). ROS scavenging system, osmotic maintenance, pigment and growth status of *Panicum sumatrense* roth. under drought stress. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 68(3), 587–595. DOI 10.1007/s12013-013-9746-x.
10. AMADOU I., GOUNGA M.E., Le G.W., 2013, Mils: Nutritional composition, some health benefits and processing - A Review, *Emir J. Food Agric*, 25: 501-508.
11. Andrews DJ, Rajewski, JF and Kumar K A: 1993. Pearl mil, new feed grain crop. In "News crops. Wiley, New York. J. Janick and J.E. Simon (éds)," pp. 198-208
12. ANDREWS, D. J., and KUMAR, K. A. 1992. Pear mil for food, feed, and forage. *Adv. Agron.*48 :89-139.
13. Anonyme. 2004. Evaluation de l'impact de techniques d'intensification sur la production de mil à l'échelle du territoire du Niger, p. 186

14. **Aparna V. 2003.** Phylogenetic analysis of *Sclerospora graminicola* using internal transcribed spacer region 2. Master thesis, Texas A&M University, Texas, p. 51
15. **Aparna, K., Hash, C. T., Yadav, R. S., Vadez, V. (2014).** Seed number and 100-seed weight of pearl mil (*Pennisetum glaucum* L.) respond differently to low soil moisture in genotypes contrasting for drought tolerance. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 200(2), 119–131. DOI 10.1111/jac.12052.
16. **Aref M. et Heded M., 2015 :** Contribution à l'étude phytochimique, les activités biologique (Antioxydante et Antibactérienne) d'une plante médicinale *Cleome arabica* L (Région d'Oued Souf). Université echahid hamma lakhdar d'el-oued faculté des sciences de la nature et de la vie département de biologie cellulaire et moléculaire. 59 pages.
17. **Ati HM, Aba DA, Ishiyaku MF, Katung MD. 2015.** Field Evaluation of Some Pearl Mil Genotypes for Downy Mildew (*Sclerospora graminicola*) Resistance and Yield. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science (IOSR-JAVS)*, 8(6): 01-06. DOI: 10.9790/2380-08620106
18. **Awika J.M., Rooney L.** "Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health." *Phytochemistry* 2004 ; 65(9) : 1199-1221.

19. **Ba MF, Samba SAN, Bassene E. 2014.** Influence des bois rameaux fragmentés (BRF) de *Guiera senegalensis* (J.F.) Gmel et de *Piliostigma reticulatum* (Dc) Hochst sur la productivité d mil, *Pennisetum glaucum* (L.). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 8(3) : 1039-1048. DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v8i3.18>
20. **Badiaga M., (2011).** Etude ethnobotanique, phytochimique et activité biologique de *Nauclea Latifolia* Smith une plante médicinale Africaine récoltée au Mali. Thèse de doctorat en chimie organique. Univ. Bamako (Mali) : P13.
21. **Balasubramanian, S. (2013).** Processing of mils. Paper presented National Seminar on Recent Advances in processing, utilization and nutritional impact of small mils. Madurai Symposium, Thamukkam Grounds, Madurai.
22. **Balasundram, N., Sundram, K. et Samman, S. (2006).** Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: antioxidant activity, occurrence, and potential uses. *Food Chemistry*, 99 ; 191-203
23. **Balsamo, R. A., Willigen, C. V., Bauer, A. M., Farrant, J. (2006).** Drought tolerance of selected *Eragrostis* species correlates with leaf tensile properties. *Annals of Botany*, 97(6), 985–991. DOI 10.1093/aob/mcl068.
24. **Bandyopadhyay, T., Muthamilarasan, M., Prasad, M. (2017).** Mils for next generation climate-smart agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 8, 1266. DOI 10.3389/fpls.2017.01266.
25. **Banerjee, S., Sanjay, K. R., Chethan, S., & Malleshi, N. G. (2012).** Finger mil (*Eleusine coracana*) polyphenols: Investigation of their anti-oxidant capacity and antimicrobial activity. *African Journal of Food*

- Science, 6, 362–374.
26. **Bara mouna, Hamadou Hadjer., 2017** : l'étude phytochimique des feuilles de blé dur des deux variétés WAHA et VITRON et l'évaluation de leur activité antioxydante, université frères Mentouri.
 27. **Bartwal, A., Pande, A., Sharma, P., Arora, S. (2016)**. Intervarietal variations in various oxidative stress markers and antioxidant potential of finger mil (*Eleusine coracana* L.) subjected to drought stress. *Journal of Environmental Biology*, 37(4), 517.
 28. **Bashir EMA, Ali AM, Ali AM, Melchinger AE, Parzies HK, Haussmann BIG. 2014**. Characterization of Sudanese pearl mil germplasm for agro-morphological traits and grain nutritional values. *Plant Genetic Resources*, 12(1) : 35-47.
 29. **Bellato, S., Ciccoritti, R., Frate, V. D., Sgrulletta, D., & Carbone, K. (2013)**. Influence of genotype and environment on the content of 5-n alkyl- resorcinols, total phenols and on the antiradical activity of whole durum wheat grains. *Journal of Cereal Science*, 57(2), 162–169. [https:// doi.org/10.1016/j.jcs.2012.11.003](https://doi.org/10.1016/j.jcs.2012.11.003)
 30. **Belton, P. S., and Taylor, J. R. N. (2004)**. Sorghum and mils: protein sources for Africa. *Trends Food Sci. Technol.* 15, 94–98. Doi : 10.1016/j.tifs.2003.09.002
 31. **Bezançon G, Renno JF, Anand Kumar K. 1997**. Le mil. In *L'amélioration des Plantes Tropicales*, André Charrier MJ, Hamon S, Nicolas D (eds). CIRAD et ORSTOM ; 457-482.
 32. **Bezzaz.N., (2014)**. Détermination structurale des métabolites secondaires, et extraction des huiles essentielles de *Mentharotundifolia*. Mémoire de magistère : chimie organique. Msila : Université de M'sila. Algérie.p : 14.
 33. **Bhatt, D., Negi, M., Sharma, P., Saxena, S. C., Dobriyal, A. K. et al. (2011)**. Responses to drought induced oxidative stress in five finger mil varieties differing in their geographical distribution. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 17(4), 347. DOI 10.1007/s12298-011-0084-4.
 34. **Bhattacharjee R, Khairwal IS, Bramel PJ, Reddy KN. 2007**. Establishment of a pearl mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] core collection based on geographical distribution and quantitative traits. *Euphytica*, 155 : 35 –45.
 35. **Bidinger, F. R., Nepolean, T., Hash, C. T., Yadav, R. S., Howarth, C. J. (2007)**. Quantitative trait loci for grain yield in pearl mil under variable postflowering moisture conditions. *Crop Science*, 47(3), 969–980. DOI 10.2135/ cropsci2006.07.0465.
 36. **Boizot, N. et Charpentier, P. (2006)**. Méthode rapide d'évaluation du contenu en composés phénoliques des organes d'un arbre foustier. *Le cahier des techniques de l'Inra*, pp: 79-82.
 37. **Bouchouka, E. (2016)**. Extraction des polyphénols et étude des activités antioxy- dante et antibactérienne de quelques plantes Sahariennes. Thèse de doctorat. Université Badji Mokhtar. Annaba, 24p.
 38. **Boudersa N. ,2018**, laboratoire de biochimie, université constantine 1. (Non publié).
 39. **Bounage N., Brac. R, 1988**. Les ressources phylogénétiques du Sahara. *Ann.Nat. Agro.El harrach* vol. 12(1). 79-94 p.
 40. **Bouzou IM. 2009**. Evaluation de l'effet du compost enrichi avec

- des urines hygiénisées sur la culture du mil. Mémoire, Université de Niamey, Niamey, p.52
41. **Brouillard R., (1986).** Bull. Liaison groupe Polyphénols, 13, p76-94.
42. **Brown, J.E., Khodr, H., Hider, R.C. et Rice-Evans, C. (1998).** Structural dependence of flavonoid interactions with Cu²⁺ ions. *Biochem. J.* 330 ; 1173-1178.
43. **Brückner D., Czimmer G., and Pinke G. 1997.** Changes in the weed flora of maize fields in Szigetköz (north-west Hungary) between 1990 and 1996. *Acta Agron. (Óváriensis) Hung.* 39 : 15–19.
44. **Bruneton, J. (1999).** Pharmacognosie, phytochimie, plantes médicinales. 3^{ème} Edition Technique et documentation Lavoisier : 784-873.
45. **Cacace JE, et Mazza G. (2000).** Extraction of anthocyanins and other phenolics from black currants with sulfured water. *Journal of agricultural and food chemistry*, Vol.50, n°21, p 5939-5946.
46. **Calvo-Flores, F.G., Dobado, J.A., Isac-Garcia, J. et Martin-Martinez, F.J. (2015).** Lignin and Lignans as Renewable Raw Materials. Edition Wiley, Chemistry, Technology and Application. Edition John Wiley & Sons, Ltd, 315p.
47. **Carson AG. 1988.** Contrôle des mauvaises herbes dans la production du mil dans le Sahel. *Sahel PV INFO N°2.* 12-13.
48. **Cerighelli R. 1955.** Cultures tropicales (tome I) : plantes vivrières. Librairie J-B. Baillière & Fils, 19, Haute feuille : 635 pp.
49. **Chandra, D., Srivastava, R., Glick, B. R., Sharma, A. K. (2018).** Drought-tolerant *Pseudomonas* spp. improve the growth performance of finger mil (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn.) under non-stressed and drought-stressed conditions. *Pedosphere*, 28(2), 227–240. DOI 10.1016/S1002-0160(18)60013-X.
50. **Chandrasekara, A., & Shahidi, F. (2011).** Determination of antioxidant activity in free and hydrolyzed fractions of mil grains and characterization of their phenolic profiles by HPLC-DAD-ESI-MSn. *Journal of Functional Foods*, 3, 144–158.
51. **Chethan, S. (2008).** Finger mil (*Eleusine coracana*) seed polyphenols and their nutraceutical potential (Thesis—Doctor of Philosophy). University of Mysore, Mysore.
52. **Chethan, S., & Malleshi, N. G. (2007).** Finger mil polyphenols optimization of extraction and the effect of pH on their stability. *Food Chemistry*, 105, 862–870.
53. **Choi, Y., Osada, Y., Ito, Y., Nagasawa, T., Choi, M. R., & Nishizawa, N. (2005).** Effects of dietary protein of Korean foxtail mil on plasma adiponectin, HDL cholesterol, and insulin levels in genetically type 2 diabetic mice. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 69(1), 31–37. <https://doi.org/10.1271/bbb.69.31>
54. **CHOWDHURY, M. D. U., and SMITH, R. L., 1988.** Mitochondrial DNA variation in pearl mil and related species. *Theor. Appl. Genet.* 76(1) :25•32.
55. **CHRISTOPHER, J., RAJ, P. S., and PILLA! K. G. 1987.**

- Cytomorphological studies of three species of *Paspalum* Linn. from South India. *Cytologia* 52(3) :487-491.
56. **Clifford, M. et Scalbert, A. (2000)**. Ellagitannins-nature, occurrence and dietary burden. *Sci. Food Agric.*, 80 ; 1118-1125.
57. **Dacosta, Y. (2003)**. Les phytonutriments bioactifs. Ed Yves Dacosta. Paris, 317 p
58. **David RH. 2000**. Chemical ecology and mating behaviour of the mil pests *Coniesta ignefusalis* and *Heliocheilus albipunctella*. Final technical report. Natural Resources Institute, Chatham Maritime, Kent ME4 4TB. 1 April 1996- 31 March 2000. p. 32.
59. **De Wet JMJ (1995)** Finger mil, *Eleusine coracana*. In: Smartt J, Simmonds NW (eds) *Evolution of Crop Plants*. Longman, Singapore, pp 137–140
60. **DE WET, J. M. J. 1978**. Systematics and Evolution of Sorghum, Sect. Sorghum (Gramineae). *Am. J. Bot.* 654: 477-484.
61. **DE WET, J. M. J. 1986**. Origin, evolution and systematics of minor cereals. Pages 19-30 in: *Small Mills in Global Agriculture*. A. Seethararna, K. W. Riley, and G. Harinarayana, eds. Proc. Int. Small Mills Workshop, 1st, Bangalore, India. Oxford and ffiH Pub! Co., New Delhi, India.
62. **Debieu, M., Sine, B., Passot, S., Grondin, A., Akata, E. et al. (2018)**. Response to early drought stress and identification of QTLs controlling biomass production under drought in pearl mil. *PLoS One*, 13(10), e0201635. DOI 10.1371/journal.pone.0201635.
63. **Dejabali.D., Boudries. N., Lemgharbi. M., Mokrane.H., Nedjemi. B., Belhaneche. N, 2005**. Les céréales locales du sorgho et mol.
64. **Devi, P. B., Vijayabharathi, R., Sathyabama, S., Malleshi, N. G., & Priyadarisini, V. B. (2011)**. Health benefits of finger mil (*Eleusine coracana* L.) polyphenols and dietary fibre: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 51(6), 1021–1040.
65. **Dida MM (1998)** Genomestudies in finger mil (*Eleusine coracana* L.). PhD Dissertation, John Innes Centre, Norwich, UK
66. **Drame Yayé A, Youm O, Ayertey JN. 2003**. Assessment of grain yield losses in pearl mil due to the mil tem borer, *Coniesta ignefusalis* (Hampson). *Insect Sci. Applic.*, 23(3) : 259–265.<http://digitalcommons.unl.edu/entomologyfacpub/328>
67. **Drame Yayé A, Youm O, Ayertey JN. 2003**. Assessment of grain yield losses in pearl mil due to the mil tem borer, *Coniesta ignefusalis* (Hampson). *Insect Sci. Applic.*, 23(3) : 259–265.<http://digitalcommons.unl.edu/entomologyfacpub/328>
68. **Dutordoir CD. 2006**. Impact de pratiques de gestion de la fertilité sur les rendements en mil dans le Fakara (Niger). Mémoire, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve, p.214.

69. **E**dge, M. S., Jones, J. M., & Marquart, L. (2005). A new life for whole grains. *Journal of American Dietetic Association.*, 105(12), 1856–1860.
70. **Ekta, S., & Sarita. (2016).** Potential functional implications of finger mil (*Eleusine coracana*) in nutritional benefits, processing, health and diseases: A review. *International Journal of Home Science*, 2(1), 151–155.
71. **El Gharra, H. (2009).** Polyphenols: Food sources, properties and applications - A review. *International Journal of Food Science and Technology* 44(12) ; 2512-2518.

72. **F**AO. 2009. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT.<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>
73. **FAOSTAT.2018.FAO.doc_12_Mars_2018_12h12.doc.**
www.fao.org/faostat/fr/
74. **Favier, A. (2003).** Le stress oxydant. Intérêt conceptuel et expérimental dans la compréhension des mécanismes des maladies et potentiel thérapeutique. *L'actualité chimique*, 108-115.
75. **Faye, A., Sine, B., Chopart, J. L., Grondin, A., Lucas, M. et al. (2019).** Development of a model estimating root length density from root impacts on a soil profile in pearl mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br). Application to measure root system response to water stress in field conditions. *PLoS One*, 14(7), e0214182. DOI 10.1371/ journal. Pone.0214182.
76. **Flowers, T. S., Yeo, A. R. (1989).** Effects of salinity on plant growth and crop yields. In: Cherry, J. H. (ed.), *Environmental stress in plants*, pp. 101–119. Berlin, Heidelberg : Springer.

77. **G**ahukar RT. 1990. Population ecology of *Acigona ignefusalis* Hampson (Lepidoptera: Pyralidae) in Senegal. *Environmental Entomology*, 19(3) : 13-19. DOI : 10.1093/ee/19.3.558
78. **Gaikobi D. 1995.** Etude de la dynamique des populations et de la distribution spatiale au champ de *Coniesta ignefusalis*, chenille foreuse des tiges et de *Heliocheilus albipunctella*, chenille mineuse des épis. Mémoire, Ecole Nationale des Cadres Ruraux de Bambey (ENCR), Bambey, p. 45.
79. **Garcia-Salas G, P, Morales-Soto A, Segura-Carretero A, Fernández-Gutiérrez A. (2010).** Phenolic-Compound-Extraction Systems for Fruit and Vegetable Samples. *Molecules*, Vol.15, n°12, p 8813- 8826.
80. **Gavirangappa Hithamani, Krishnapura Srinivasan. (2011):** Effect of domestic processing on the polyphenol content and bioaccessibility in finger millet (*Eleusine coracana*) and pearl millet (*Pennisetum glaucum*)

81. **Gee, J.M. et Johnson, I.T. (2001).** Polyphenolic compound: interactions with the gut and implications for human health. *Current Medicinal Chemistry*. 8 ; 1-182.
82. **Ghnimi, W. (2015).** Etude phytochimique des extraits de deux Euphorbiacées : *Ricinus communis* et *Jatropha curcas*. Evaluation de leur propriété anti-oxydante et de leur action inhibitrice sur l'activité cetylcholinestérase. Thèse de doctorat. Université de Lorraine (France) et Université de Carthage (Tunisie), 26p
83. **Gilani, G.S. et Anderson, J. J. B. (2002).** Phytoestrogens and health. Edition Aocs Press, 405 p.
84. **Goudia DB, Issa K, Tom HC. 2016.** Grain iron density variability among new farmer-preferred experimental mil varieties from Niger. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 10(4) : 1865-1868,
85. **Goudiaby MF, Sarr I, Sembene M. 2018.** Source of resistance in pearl mil varieties against stem borers and the ear head miner. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6(1) : 1702-1708. <http://www.entomoljournal.com>
86. **Grando.S., Gomez.H., Macpherson, 2005.** Food Barley: importance uses and local knowledge. Proceeding of the international workshops on food barley improvement. Icarda, Hammamet, Tunisia. 156p.
87. **Guignard.J.L., (2000).** *Biochimie végétale*. Ed. Masson, Paris. P 231-241.
88. **Gulcin İ. (2012).** Antioxidant activity of food constituents: an overview. *Archives of Toxicology*, Vol. 86, p345-391.
89. **Gupta, V. K.; Prasad, K. S.; Bakshi, M. P. S. ; Langar, P. N., 1986.** Improving the nutritive value of groundnut shells through fungal cultivation. *Agricultural Wastes*, 16 (3) : 161-169
90. **Gupta, V., Jatav, P. K., Verma, R., Kothari, S. L., Kachhwaha, S. (2017).** Nickel accumulation and its effect on growth, physiological and biochemical parameters in mils and oats. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(30), 23915–23925. DOI 10.1007/s11356-017-0057-4.

91. **H**amadou BH. 2015. Evaluation de trois méthodes de lutte contre le mildiou du mil (*Sclerospora graminicola*) : variété, densité et traitement. Mémoire, Université Dan Dicko Dankoulodo De Maradi (UDDM), Maradi ; p. 69.
92. **Hamadou M, Idrissa S, Mahamadou C, Oumarou S, Valentin K. 2017.** Potentialités fourragères du mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br) : Revue de littérature. *Journal of Animal & Plant Sciences*, 34(2): 5424-5447. <http://www.m.ilewa.org/JAPS>
93. **Han, Y., Wu, M., Hao, L., Yi, H. (2018).** Sulfur dioxide derivatives alleviate cadmium toxicity by enhancing antioxidant defence and reducing Cd²⁺ uptake and translocation in foxtail mil seedlings. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 157, 207–215. DOI 10.1016/j.ecoenv.2018.03.084.
94. **HANNA, W. W. 1987.** Utilization of Wild relatives of pearl mil. Pages 33-442 in: Proc. Int. Pearl Mil Workshop. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics (ICRISAT), Patancheru, A. P.,

- India.
95. **Harper, D. (n.d.) 2016-7.** Etymology of mil. Online Etymology Dictionary
96. **Hartmann T., 2007:** From waste products to ecochemicals: fifty years research of plant secondary metabolism. *Phytochemistry*. P68, 2831–2846.
97. **Haslam, E. (1989).** Plant polyphenols, Vegetable tannis revisited. University Press, Cambridge, 230p.
98. **Hausmann BIG. 2007.** Données récoltées dans la base de données du Programme de sélection du mil à l'ICRISAT.
99. **Hegde, P., Rajasekaran, N., & Chandra, T. (2004).** Effect of the antioxidant properties of mil species on oxidative stress and glycemic status in alloxan-induced rats. *Nutrition Research*, 25(12), 1109–1120. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2005.09.020>
100. **Hilu KW (1988)** Identification of the 'A' genome of finger mil using chloroplast DNA. *Genetics* 118 :163–167
101. **Hilu KW, de Wet JMJ (1976)** Domestication of Eleusine coracana. *Econ Bot* 306 :199–208
102. **Hininger-Favier I., (2011).** Biochimie, les lipides et dérivés ; Partie 4 : les composées à caractère lipidique (lipoïde). Josef Fourier (France) : P23.
103. **Hiremath SC, Salimath SS (1992)** The 'A' genomedonor of Eleusine coracana (L) Gaertn (Gramineae). *Theor Appl Genet* 84 :747–754
104. **HIREMATH, S. C., PATEL, G. N. V., and SALIMATH, S. S. 1980.** Genome homology.
105. **Hwang, S. L., Shih, P. H., & Yen, G. C. (2012).** Neuroprotective effects of citrus flavonoids. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60, 877–885.

106. **I**BPGR ET ICRISAT. 1993. Descripteurs du mil

pénicillaires [*Pennisetum glaucum* (L) R. Br]. Conseil international des ressources phytogénétiques, Rome, Italie ; Institut International de Recherches sur les Culture des Zones Tropicales Semi-arides, Patancheru, Inde ; p. 49.

107. **Illiassou Y. 2009.** Evaluation de l'effet de l'application périodique de l'urine hygiénisées sur la culture de mil (*Pennisetum glaucum*). Mémoire, Université Abdou Moumouni de Niamey, Niamey ; p. 39.
108. **Ilyin, V.A. and Zolotukhin, E.N. 1989.** Breeding of proso mil (*Panicum miliaceum* L.) in Volga region of USSR. Pages 105–114 in A. Seetharam, K.W. Riley and G. Harinarayana, eds. small mils in global agriculture. Proc. 1st Internat. small mils workshop, Bangalore, India, 1986. IDRC. Pub. by Mohan Primplani for Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, India.
109. **Imran, M., Ahmad, N., Anjum, F. M., Kamran-Khan, M., Mushtaq, Z., Nadeem, M.**

- et Hussain, S. (2015).** Potentiel protective properties of flax lignin secoisolar- iciresinol diglucoside. Nutrition journal, 14, 1 – 7.
110. **IREN LEDER, 2004,** Sorghum and Mils, in Cultivated Plants, Primarily as Food Sources, In "Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)", UNESCO, Oxford, U.K.
111. **Islam, M. S., Akhter, M. M., El Sabagh, A., Liu, L. Y., Nguyen, N. T. et al. (2011).** Comparative studies on growth and physiological responses to saline and alkaline stresses of Foxtail mil ('Setaria italica' L.) and Proso mil ('Panicum miliaceum' L.). Australian Journal of Crop Science, 5(10), 1269.
112. **Ito, K., Ozasa, H., Noda, Y., Arie, S., & Horikawa, S. (2008).** Effects of free radical scavenger on acute liver injury induced by D-galactosamine and lipopolysaccharide in rats. Hepatology Research, 38, 194–201. <https://doi.org/10.1111/j.1872-034X.2007.00252.x>

113. **Jain, S., Bhatia, G., Barik, R., Kumar, P., Jain, A., & Dixit, V. K. (2010).** Antidiabetic activity of Paspalum scrobiculatum Linn. in alloxan induced diabetic rats. Journal of Ethnopharmacology, 127, 325–328.
114. **JAYARAMAN K., 2002,** Natural "golden mil" rivals "golden rice", Science and Development Network (SciDevNet).
115. **Jogaiah S, Ananda KS, Shekar SH, 2008.** Characterization of downy mildew isolates of Sclerospora graminicola by using differential cultivars and molecular markers. Journal of Cell and Molecular Biology, 7:41 55. <http://jcmb.halic.edu.tr>
116. **Jost, J. P. et Jost-Tse, Y. C. (2016).** L'automédication chez les animaux dans la nature. Editions connaissances et savoirs, 23p.
117. **Julkunen-Titto, R., 1985.** Phenolic Constituents In The Leaves Of Northern Willows: Methods For The Analysis Of Certain Phenolics. Journal Of Agricultural And Food Chemistry 33: 213-217.

118. **Kamara, M. T., Amadou, I., & Zhou, H. M. (2012).** Antioxidant activity of fractionated foxtail mil protein hydrolysate. International Food Research Journal, 19, 59–66.
119. **Kannan B, Senapathy S, Raj AGB, Chandra S, Muthiah A, Dhanapal AP, Hash CT. 2014.** Association analysis of SSR markers with phenology, grain and stover-yield related traits in Pearl Mil [Pennisetum glaucum (L.) R. Br.]. The Scientific World Journal, 14 p, DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/562327>
120. **Khatoon, H., Singh, V. (2016).** Impact of water stress on physiological and biochemical parameters of finger mil (Eleusine coracana L.). Research in Environment and Life Science, 9(12), 1474–1477.
121. **Kholova J, Vadez V. 2013.** Water extraction under terminal drought explains the genotypic differences in yield, not the antioxidant

- changes in leaves of pearl mil (*Pennisetum glaucum*). *Functional Plant Biology*, 40(1) : 44–53.
122. **Khushdil, F., Jan, F. G., Jan, G., Hamayun, M., Iqbal, A. et al. (2019)**. Salt stress alleviation in *Pennisetum glaucum* through secondary metabolites modulation by *Aspergillus terreus*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 144, 127–134. DOI 10.1016/j.plaphy.2019.09.038.
123. **Klichowska M (1984)** Plants of the Neolithic Kadera (Central Sudan): a paleobotanical study of the plant impressions on pottery. In: Krzyniak I, Kobusiewics (eds) *Origins and Early Development of Food Producing Cultures in North-Eastern Africa*. Polish Academy of Sciences, Warsaw
124. **Kotapati, K. V., Palaka, B. K., Ampasala, D. R. (2017)**. Alleviation of nickel toxicity in finger mil (*Eleusine coracana* L.) germinating seedlings by exogenous application of salicylic acid and nitric oxide. *Crop Journal*, 5(3), 240–250. DOI 10.1016/j.cj.2016.09.002.
125. **Kour, D., Rana, K. L., Yadav, A. N., Sheikh, I., Kumar, V. et al. (2020)**. Amelioration of drought stress in Foxtail mil (*Setaria italica* L.) by P-solubilizing drought-tolerant microbes with multifarious plant growth promoting attributes. *Environmental Sustainability*, 3, 23–34. DOI 10.1007/s42398-020-00094-1.
126. **Krall S, Youm O, Kogo SA. 1995**. Panicle insect pest damage and yield loss in pearl mil. In *Panicle insect pests of sorghum and pearl mil: proceedings of an International Consultative Workshop*, Nwanze KF, Youm O (ed). ICRISAT Center Patancheru : Patancheru ; 135-145.
127. **Krief S., 2003** : Métabolites secondaires des plantes et comportement animal, thèse doctorat, muséum national d’histoire naturelle. 32p.
128. **Kumar, A., Babu, C. G., Reddy, V. C., and Swathi, B. (2016a)**. Anti-nutritional factors in finger mil. *J. Nutr. Food Sci.* 6 :491.
129. **Kumari, P. L., & Sumathi, S. (2002)**. Effect of consumption of finger mil- let on hyperglycemia in non-insulin dependent diabetes mellitus (NIDDM) subjects. *Plant Foods for Human Nutrition*, 57, 205–213. <https://doi.org/10.1023/A:1021805028738>
130. **Kusaka, M., Ohta, M., Fujimura, T. (2005)**. Contribution of inorganic components to osmotic adjustment and leaf folding for drought tolerance in pearl mil. *Physiologia Plantarum*, 125(4), 474–489. DOI 10.1111/j.1399- 3054.2005.00578.x
131. **Kushwaha, P., Kashyap, P. L., Kuppusamy, P., Srivastava, A. K., Tiwari, R. K. (2020)**. Functional characterization of endophytic bacilli from pearl mil (*Pennisetum glaucum*) and their possible role in multiple stress tolerance. *Plant Biosystems—An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 154(4), 503–514. DOI 10.1080/11263504.2019.1651773.

132. **Lagoke STO. 1988**. *Striga* in Nigeria. In *Proceedings of*

- All, African Government: Consultation on Striga control. FAO/OAD (éds) : Maroua, Cameroun ; 68-75.
133. **Lata, C. (2015).** Advances in omics for enhancing abiotic stress tolerance in mils. *Proc. Indian Natl. Sci. Acad.* 81, 397–417.
134. **Lata, C., Gupta, S., and Prasad, M. (2013).** Foxtail mil: a model crop for genetic and genomic studies in bioenergy grasses. *Crit. Rev. Biotechnol.* 33, 328–343.
135. **Lata, C., Sahu, P. P., Prasad, M. (2010).** Comparative transcriptome analysis of differentially exp-ressed genes in foxtail mil (*Setaria italica* L.) during dehydration stress. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 393(4), 720–727. DOI 10.1016/j.bbrc.2010.02.068
136. **Latham MC. 2001.** La nutrition dans les pays en développement. FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie. Disponible à <http://www.fao.org/docrep/> [cité le 7 août 2018].
137. **Launois M. 1978.** Modélisation écologique et simulation opérationnelle en Acridologie : application à *Oedaleus senegalensis* (Krauss). Ministère de la Coopération, GERDAT, Paris, p. 214.
138. **Léder I. 2004.** Sorghum and Mils. In *Cultivated Plants Primarily as Food Sources: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, György Füleky (ed). UNESCO, Eolss Publishers : Oxford, UK ; 1-17.
139. **Lee, S. H., Chung, I. M., Cha, Y. S., & Park, Y. (2010).** Mil consumption decreased serum concentration of triglyceride and C-reactive protein but not oxidative status in hyperlipidemic rats. *Nutrition Research*, 30(4), 290–296. <https://doi.org/10.1016/j.nutres.2010.04.007>
140. **Lestienne, I., Buisson, M., Lullien-Pellerin, V., Picq, C., & Trèche, S. (2007).** Losses of nutrients and anti-nutritional factors during abrasive decortication of two pearl mil cultivars (*Pennisetum glaucum*). *Food Chemistry*, 100, 1316–1323.
141. **Liu, T. Y., Ye, N., Song, T., Cao, Y., Gao, B. et al. (2019).** Rhizosheath formation and involvement in foxtail mil (*Setaria italica*) root growth under drought stress. *Journal of Integrative Plant Biology*, 61(4), 449–462. DOI 10.1111/jipb.12716.
142. **Loumerem M. 2004.** Etude de la variabilité des populations de mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) cultivé dans les régions arides tunisiennes et sélection de variétés plus performantes. Thèse, Université de Gen, Gen, p. 266
143. **Macheix J. J, Fleuriet A and Jay-Allemand C., (2005).** Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, p 4-5.
144. **Macheix J. J, Fleuriet A and Jay-Allemand C., (2005).** Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, p 4-5.
145. **Macheix, J.J., Fleuriet, A. et Jay, A. C. (2005).** Les composés phénoliques des végétaux : un exemple de métabolites secondaires d'importance économique. Ed Presses

- polytechnologiques et universitaires romandes, 4p.
146. **Mahadik, S., Kumudini, B. S. (2020).** Enhancement of salinity stress tolerance and plant growth in finger mil using fluorescent pseudomonads. *Rhizosphere*, 15, 100226. DOI 10.1016/j.rhisph.2020.100226
147. **Maiti RK, Bidinger FR. 1981.** Growth and development of the pearl mil plant. *Research Bulletin N°6, ICRISAT Patancheru, Patancheru*, p. 19.
148. **Majid, M.A., Hamid, M.A. and Mannujan. 1989.** Importance, genetic resources and breeding of small mils in Bangladesh. Pages 71–76 in A. Seetharam, K.W. Riley and G. Harinarayana, eds. *small mils in global agriculture. Proc. 1st Internat. small mils workshop, Bangalore, India, 1986.* IDRC. Pub. by Mohan Primlani for Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi, India.
149. **Makarana, G., Kumar, A., Yadav, R. K., Kumar, R., Soni, P. G. et al. (2019).** Effect of saline water irrigations on physiological, biochemical and yield attributes of dual-purpose pearl mil (*Pennisetum glaucum*) varieties. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 89(4), 624–633.
150. **Manning K, Pelling R, Higham T, Schwenniger J-L, Fuller DQ. 2011.** 4500-Year-old domesticated pearl mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) from the Tilemsi Valley, Mali: New insights into an alternative cereal domestication pathway. *Journal of Archaeological Science*, 38(2) : 312-322.
151. **Marchais L, Tostain S, Amoukou I. 1993.** Signification taxonomique et évolution de la structure génétique des mils pénicillaires. In *Le Mil en Afrique : Diversité Génétique et Agro-physiologie : Potentialités et Contraintes pour l'Amélioration Génétique et l'Agriculture*, Serge H (éds). ORSTOM : Paris ; 119-127.
152. **Maria N. Irakli a, Victoria F. Samanidou b, Costas G. Biliaderis c, Ioannis N. Papadoyannis.(2013):** Development and validation of an HPLC-method for determination of free and bound phenolic acids in cereals after solid-phase extraction
153. **Markham KR. (1982).** *Technics of flavonoids identification.* Academic Press.
154. **Mauro N.M., 2006 :** Synthèse d'alcaloïdes biologiquement actifs : la (+) -anatoxine-a et la (±) -camptothécine, thèse doctorat, l'université Joseph Fourier Grenoble, p13, 16-28.
155. **Mbaye DF. 1993.** Contraintes phytosanitaires du mil dans le sahel : Etat des connaissances et perspectives. In *Le Mil en Afrique : Diversité Génétique et Agro-physiologie : Potentialités et Contraintes pour l'Amélioration Génétique et l'Agriculture*, Serge H (éds). ORSTOM : Paris ; 173-186.
156. **McDonough, Cassandra M. ; Rooney, Lloyd W. ; Serna-Saldivar, Sergio O. (2000) ; "The Mils" ; Food Science and Technology : Handbook of Cereal Science and Technology ; CRC Press ; 99 2nd Ed : 177–210**
157. **Miller, G. (2001).** Whole grain, fibre and antioxidants. In G. A.

- Spiller (Ed.), Handbook of dietary fibre in human nutrition (pp. 453–460). Boca Raton, FL : CRC Press.
158. **Missaoui, R. (2018)**. Extraction verte et caractérisation des molécules bioactives dans les coproduits de la production d'asperge (*Asparagus officinalis*L.). Université Québec, Canada, 16p
159. **Mohammedi.Z., (2006)**. Etude du pouvoir antimicrobien et antioxydant des huiles essentielles et flavonoïdes de quelques plantes de la région de Tlemcen. Mémoire de magister. Université Abou BakrBelkaïd.Tlemcen. Algerie. Page : 155.
160. **Moumouni KH. 2014**. Construction d'une carte génétique pour le mil, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Br, par une approche de génotypage par séquençage (GBS). Mémoire, Université de Laval de Québec, Québec, p. 111.
161. **Mukami, A., Ng'etich, A., Syombua, E., Oduor, R., Mbinda, W. (2020)**. Varietal differences in physiological and biochemical responses to salinity stress in six finger mil plants. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(8), 1569–1582. DOI 10.1007/s12298-020-00853-8.
162. **Müller L, Gnoyke S, Popken AMV, Böhm V. (2010)**. Antioxidant capacity and related parameters of different fruit formulations. *LWT - Food Science and Technology*, Vol. 43, n°6, p992–999.
163. **Mustafa, G., Akhtar, M. S., Abdullah, R. (2019)**. Global concern for salinity on various agro-ecosystems. In: Akhtar, M. (ed.), *Salt stress, microbes, and plant interactions: Causes and solution*, pp. 1–19. Singapore : Springer
164. **Muthamilarasan, M., Dhaka, A., Yadav, R., & Prasad, M. (2016)**. Exploration of mil models for developing nutrient rich graminaceous crops. *Plant Science*, 242, 89–97.
165. **Nambiar VS, Dhaduk J, Sareen N, Shahu T, Desai R. 2011**. Potential functional implications of pearl mil (*Pennisetum glaucum*) in health and disease. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 1(10) : 62-67. <http://www.japsonline.com>
166. **Neocleous, D., Ntatsi, G., Savvas, D. (2017)**. Physiological, nutritional and growth responses of melon (*Cucumis melo* L.) to a gradual salinity built-up in recirculating nutrient solution. *Journal of Plant Nutrition*, 40(15), 2168– 2180. DOI 10.1080/01904167.2017.1346673.
167. **NIN, 2003**, Nutritive value of Indian Foods, Ed Gopalan and Deosthale, NIN, Hyderabad. www.trove.nla.gov.au/work/17516887
168. **Nithiyantham, S., Kalaiselvi, P., Mahomoodally, M. F., Zengin, G., Abirami, A., & Srinivasan, G. (2019)**. Nutritional and functional roles of mils—A review. *Journal of Food Biochemistry*, e12859.
169. **Nomaou DL, Yadjji G, Abdourahamane TD, Rabah L, Babou AB, Patrice D, Adamou DT, Nassirou AM, Ambouta JMK. 2015**. Effet des touffes de *Hyphaene thebaica* (Mart) sur la production du mil dans la région de Maradi (Niger). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 9(5): 2477-2487.

- O** beng-Ofori D, Torto B, Hassanali A. 1993. Evidence for mediation of two releaser pheromones in the aggregation behavior of the gregarious desert locust, *Schistocerca gregaria* (Forsk.) (Orthoptera: Acrididae). *J. Chem. Ecol.*, 19(8) : 1665-1676. DOI :10.1007/BF00982299
171. **Ouahas. C., (1996).** Chimie Organique, Science biomédicales et Sciences de la nature, Office des publications Universitaires, Alger, p 431.
172. **Ouendeba B, Eieta G, Hanna WW, Kumar KA. 1995.** Diversity among African pearl mil landrace populations. *Crop Science*, 35 : 919-924.
- P** aganga, G., Miller, N. et Rice-Evans, C. A. (1999). The polyphenolic content of fruit and végétales and their antioxidant activities. *Free Radic Res.* 30 ; 62-153.
174. **Pan, Y., Li, J., Jiao, L., Li, C., Zhu, D. et al. (2016).** A non-specific *Setaria italica* L. lipid transfer protein gene plays a critical role under abiotic stress. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1752. DOI 10.3389/fpls.2016.01752.
175. **Park, K. O., Ito, Y., Nagasawa, T., Choi, M. R., & Nishizawa, N. (2008).** Effects of dietary Korean proso-mil protein on plasma adiponectin, HDL cholesterol, insulin levels, and gene expression in obese type 2 diabetic mice. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 72(11), 2918–2925. <https://doi.org/10.1271/bbb.80395>
176. **Passot, S., Gnacko, F., Moukouanga, D., Lucas, M., Guyomarc'h, S. et al. (2016).** Characterization of pearl mil root architecture and anatomy reveals three types of lateral roots. *Frontiers in Plant Science*, 7, 829. DOI 10.3389/ fpls.2016.00829.
177. **Pathak, R. K., Gupta, A., Shukla, R., & Baunthiyal, M. (2018).** Identification of new drug-like compounds from mils as Xanthine oxidoreduc- tase inhibitors for treatment of Hyperuricemia: A molecular docking and simulation study. *Computational Biology and Chemistry*, 76, 32– 41.
178. **Peronny S., (2005).** La perception gustative et la consommation des tannins chez le MAKI (Lemur Catta). Thèse de Doctorat du Muséum national d'histoire naturelle, Discipline EcoEthologie .151p.
179. **Pinecemail, J., Karine, B., Karine, C. et Jean-Olivier, D. (2002).** Mécanismes Physiologiques de la défense Antioxydante. *Physiological Action of Antioxydant Defences. Nutritio Clinique et métabolisme.* 16(6) ; 233-239.
180. **Ponnuthurai, S. 1989.** Importance, genetic resources and breeding of small mils in Sri Lanka. Pages 77–84 in A. Seetharam, K.W. Riley and G. Harinarayana, eds. small mils in global agriculture. Proc. 1st Internat. small mils workshop, Bangalore, India, 1986. IDRC. Pub. by Mohan Pramlani for Oxford and IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi,

- India.
181. **Popovici C, Saykova I, Tylkowski B. (2009).** Evaluation de l'activité antioxydant des composés phénoliques par la réactivité avec le radical libre DPPH. *Revue de génie industriel*, Vol.4, p 25-39.
182. **Pradeep, P. M., & Sreerama, Y. N. (2017).** Soluble and bound phenolics of two different mil genera and their milled fractions: Comparative evaluation of antioxidant properties and inhibitory effects on starch hydrolysing enzyme activities. *Journal of Functional Foods*, 35, 682–693.
183. **Pradeep, S. R., & Guha, M. (2011).** Effect of processing methods on the nutraceutical and antioxidant properties of little mil (*Panicum sumatrense*) extracts. *Food Chemistry*, 126, 1643–1647. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.12.047>
184. **Prasada Rao, K. E.; de Wet, J. M. J.; Brink, D. E. ; Mengesha, M. H., 1987.** Intraspecific variation and systematics of cultivated *Setaria italica*, foxtail mil (Poaceae). *Econ. Bot.*, 41 (1) : 108-116.
185. **Price, M. L., Van Scoyoc, S. And Butler, L. G., 1978.** A Critical Evaluation of The Vanillin Reaction As An Assay For Tannin In Sorghum Grain, *J. Agric. Food Chem* 26: 1214- 1218.
186. **Puranik, S., Jha, S., Srivastava, P. S., Sreenivasulu, N., Prasad, M. (2011).** Comparative transcriptome analysis of contrasting foxtail mil cultivars in response to short-term salinity stress. *Journal of Plant Physiology*, 168(3), 280–287. DOI 10.1016/j.jplph.2010.07.005.

187. **Q** **Quy-Diem D, Artik E, Phuong L, LienH. (2014).**
Effect of extraction solvent on totalphenol content, total flavonoid content and antioxidant activity of *Limnophila aromatic*. *J. food and drug analysis*, Vol.22, n°3, p 296-302.

188. **Quesada, S., Azofeifa, G., Jatunov, S., Jiménez, G., Navarro, L., & Gómez, G. (2011).** Carotenoids composition, antioxidant activity and glyce- mic index of two varieties of *Bactris gasipaes*. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 23(6), 482–489.

189. **R** **Rachie, K; Majmudar, J. V., 1980.** Pearl mil. The Pennsylvania State Univ. Press, University Park
190. **Radhajeyalakshmi, R., Yamunarani, K., Seetharaman, K., & Velazhahan, R. (2003).** Existence of Thaumatin-like proteins (Tlps) in seeds of cereals. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica*, 38, 251–257.

191. **Rahal-Bouziiane .H, 2008.** Evaluation de la variabilité génétique chez quelques mils penicillaires (*pennisetum glaucum*.L.R. Br) cultivés dans les oasis de la région d'Adrar Algérie. *Journal Algérien des régions arides*.

- Revue scientifique annuelle n=7 crstra. 11p.
192. **Rahal-Bouziane, 2016.** Quelques cultures stratégiques pour l'Algérie face aux changements climatiques : l'orge (*Hordeum vulgare* L) et le mil (*Pennisetum glaucum* L.R. Br). Algerian journal of aride environnement. N° 1. 15-30p.
193. **Rai K.N., S. Appa Rao & K.N. Reddy 1997.** Pearl mil. Pages 243-258 in D. fuccillo, L. Stapleton (éds), Biodiversity in trust. Cambridge University Press
194. **Rajasekaran, N. S., Nithya, M., Rose, C., & Chandra, T. S. (2004).** The effect of finger mil feeding on the early responses during the process of wound healing in diabetic rats. *Biochemica et Biophysica Acta*, 1689, 90–201. <https://doi.org/10.1016/j.bbadis.2004.03.004>
195. **Ramegowda, V., Senthil-Kumar, M., Nataraja, K. N., Reddy, M. K., Mysore, K. S. et al. (2012).** Expression of a finger mil transcription factor, EcNAC1, in tobacco confers abiotic stress-tolerance. *PLoS One*, 7(7), e40397. DOI 10.1371/journal.pone.0040397.
196. **RAMULU P., RAO P.U., 2003,** Total insoluble and soluble dietary fiber contents of Indian fruits, *Journal of Food Composition and Analysis* 16: 677-685
197. **Rao VP, Thakur RP, Rai KN, Sharma YK. 2005.** Downy Mildew Incidence on Pearl Mil Cultivars and Pathogenic Variability among Isolates of *Sclerospora graminicola* in Rajasthan. *Journal of SAT Agricultural Research*, 1(1) : 1-4. <http://ejournal.icrisat.org>
198. **Rateesh, K., Usha, D., Manohar, R. S., & Malleshi, N. G. (2011).** Quality characteristics of biscuits prepared from finger mil seed coat based composite flour. *Food Chemistry*, 129, 499–506.
199. **Rathinapriya, P., Pandian, S., Rakkammal, K., Balasangeetha, M., Alexpandi, R. et al. (2020).** The protective effects of polyamines on salinity stress tolerance in foxtail mil (*Setaria italica* L.), an important C4 model crop. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(9), 1815–1829. DOI 10.1007/s12298-020-00869-0.
200. **Reichert, R. D. (1979).** The pH-sensitive pigments in pearl mil. *Cereal Chemistry*, 56, 291–294.
201. **Ribéreau-G. (1968).** Les composés phénoliques des végétaux. Edition Dunod. Paris. P57,10-13,55-86.
202. **Rihane K et Benlaharhe R. (2013)** activité antibactérienne des polyphénols et Rondon Villate Céline, Thèse: Étude des mécanismes de libération d'actifs.
203. **Riley S.C. Gupta A. Seetharam J.N. Mushonga (Eds) (1993)** *Advances in Small Mills* Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd New Delhi 557.
204. **ROCAFREMI. 2002.** Sélection et Mise à Disposition des Paysans de Variétés et de Semences Appropriées. Des Résultats du Projet P1 : 1991-1996.
205. **ROONEY L., McDONOUGH C., 1987,** Food quality and consumer acceptance of pearl mil, In "International Pearl Mil Workshop, Patancheru", AP (India), 7-11.

206. **S**abir, P., Ashraf, M., Hussain, M., Jamil, A. (2009). Relationship of photosynthetic pigments and water relations with salt tolerance of proso mil (*Panicum miliaceum* L.) accessions. *Pakistan Journal of Botany*, 41(6), 2957–2964.
207. **Saffidine, K. (2015)**. Etude analytique et biologique des flavonoïdes extraits de *Carthamus Caeruleus* L. et de *Plantago major* L. Thèse de doctorat. Université Ferhat Abbas, Sétif, p 8- 64.
208. **Sagar, A., Sayyed, R. Z., Ramteke, P. W., Sharma, S., Marraiki, N. et al. (2020)**. ACC deaminase and antioxidant enzymes producing halophilic *Enterobacter* sp. PR14 promotes the growth of rice and mils under salinity stress. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 26(9), 1847–1854. DOI 10.1007/s12298-020-00852-9.
209. **Saïdou A. 2011**. Etude moléculaire, évolution et caractérisation de gènes impliqués dans l’adaptation du mil [*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.] aux changements climatiques. Thèse de doctorat, Montpellier SupAgro, Montpellier, p.
210. **Sakagami, H, Hashimoto, K, Suzuki, S, Ogiwara, T, Satoh, K, Ito, H, Hatano, T, Yoshida, T. & Fujisawa, S., (2005)**. Molecular requirement of lignin for expression of unique biological activity. *Phytochemistry*, Vol.66 (17), pp. 2107-2119.
211. **Sakamoto S. 1987**. Origin and dispersal of common mil and foxtail mil. *JARQ*, 21 : 84–89.
212. **Saleem R, Ashraf M, Khalil IA, Anees MA, Javed HI, Saleem A. 2016**. GGE Biplot - A Windows Based Graphical Analysis of Yield Stability and Adaptability of Mil Cultivars Across Pakistan. *Academia Journal of Biotechnology*, 4(5) : 186-193.
213. **Samba T, Minamba B, Birama SC, Adama C. 2015**. Amélioration de la gestion de la fertilité des sols et celle des cultures dans les zones sahéliennes de l’Afrique de l’Ouest : une condition sine qua none pour l’augmentation de la productivité et de la durabilité des systèmes de culture à base de mil. *Research Gate*. p.26. <https://www.researchgate.net/publication/237827087>
214. **Sanaa Ragaee et al., (2006)**: Antioxidant activity and nutrient composition of selected cereals for food use.
215. **Santos-Buelga, C. et Scalbert, A. (2000)**. Proanthocyanidinsan tanninlike compounds-nature, occurrence, dietary intake and effects on nutrition and health. *Jornal of Sei. Food Agric*, 80 ; 1094-1117.
216. **Sarita, and Singh, E. (2016)**. Potential of mils: nutrients composition and health benefits. *J. Sci. Innov. Res.* 5, 46–50.
217. **Saritha A, Durgaraju C, Srivastava RK, Kanakadurga K, Reddy N, Sharma R, Katiyar P, Dangi KS. 2017**. Genetic Variability for Downy Mildew Disease Incidence in Mapping Population Parents of Pearl Mil. *Int. J. Pure App. Biosci*, 5(4): 689-697.
218. **Sarni-Manchado, P. et Cheynier, V. (2006)**. Les polyphénols en agroalimentaire, Lavoisier, Editions Tec et Doc, 398p.
219. **Satish, L., Rathinapriya, P., Rency, A. S., Ceasar, S. A., Prathibha, M. et al. (2016)**.

- Effect of salinity stress on finger mil (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn): histochemical and morphological analysis of coleoptile and coleorrhizae. *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 222, 111–120. DOI 10.1016/j.flora.2016.04.006.
220. **Seerat Saleem, Naveed Ul Mushtaq, Wasifa Hafiz Shah, Aadil Rasool, Khalid Rehman Hakeem, and Reiaz Ul Rehman.2020** Morpho-Physiological, Biochemical and Molecular Adaptation of Millets to Abiotic Stresses
221. **Serba, D. D., Yadav, R. S. (2016).** Genomic tools in pearl mil breeding for drought tolerance: Status and prospects. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1724. DOI 10.3389/fpls.2016.01724.
222. **Sharma YK, Yadav SK, Khairwal IS. 2007.** Evaluation of pearl mil germplasm lines against downy mildew incited by *Sclerospora graminicola* in western Rajasthan. *SAT eJournal*, 3(1): 1-2. <http://ejournal.icrisat.org>
223. **Sharma, P. C., Singh, D., Sehgal, D., Singh, G., Hash, C. T. et al. (2014).** Further evidence that a terminal drought tolerance QTL of pearl mil is associated with reduced salt uptake. *Environmental and Experimental Botany*, 102, 48–57. DOI 10.1016/j.envexpbot.2014.01.013.
224. **Shelke.GV. Chavan.AM, 2010.** Improvement of agronomically desirable genotypes for downy mildew (*pennisetum glaucum* (L). R. Br.) by recombination breeding. *Journal of ecobiotechnologie*. N° 2(1). 16-20.
225. **Shi, W. P., Cheng, J. Y., Wen, J. X., Wang, J. X., Shi, G. Y. et al. (2018).** Transcriptomic studies reveal a key metabolic pathway contributing to a well-maintained photosynthetic system under drought stress in foxtail mil (*Setaria italica* L.). *PeerJ*, 6, e4752. DOI 10.7717/peerj.4752.
226. **Shibairo, S. I., Nyongesa, O., Onwonga, R., and Ambuko, J. (2014).** Variation of nutritional and anti-nutritional contents in finger mil (*Eleusine coracana* (L.) Gaertn) genotypes. *IOSR J. Agric. Vet. Sci.* 7, 6–12
227. **Shinde, H., Dudhate, A., Anand, L., Tsugama, D., Gupta, S. K. et al. (2020).** Small RNA sequencing reveals the role of pearl mil miRNAs and their targets in salinity stress responses. *South African Journal of Botany*, 132, 395–402. DOI 10.1016/j.sajb.2020.06.011.
228. **Shinde, H., Tanaka, K., Dudhate, A., Tsugama, D., Mine, Y. et al. (2018).** Comparative de novo transcriptomic profiling of the salinity stress responsiveness in contrasting pearl mil lines. *Environmental and Experimental Botany*, 155, 619–627. DOI 10.1016/j.envexpbot.2018.07.008.
229. **Shivhare, R., Asif, M. H., Lata, C. (2020).** Comparative transcriptome analysis reveals the genes and pathways involved in terminal drought tolerance in pearl mil. *Plant Molecular Biology*, 103(6), 639–652. DOI 10.1007/s11103-020-01015-w.
230. **Shivhare, R., Lata, C. (2019).** Assessment of pearl mil genotypes for drought stress tolerance at early and late seedling stages. *Acta Physiologiae Plantarum*, 41(3), 39. DOI 10.1007/s11738-019-2831-z.
231. **Shobana Shanmugam, 2009.** Investigations on the Carbohydrate Digestibility of Finger Mil (*Eleusine Coracana*) with Special Reference to the Influence of its Seed Coat Constituents

232. **Siddhuraju, P., & Becker, K. (2007).** The antioxidant and free radical scavenging activities of processed cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) seed extracts. *Food Chemistry*, 101, 10–19.
233. **Singh P., A.G.B. Raj, M.N.V.R. Rao & J.R. Witcombe 1994.** Registration of 'ICMV 155' pearl mil. Published in *crop science* 5 (34) : 1409.
234. **Singh, P., & Raghuvanshi, R. S. (2012).** Finger mil for food and nutrition security. *African Journal of Food Science*, 6(4), 77–84.
235. **Singleton VL and Rossi JAJ. (1974).** Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *Amer. J. Enol. Viticult*, Vol .16, p 144- 158.
236. **Sireesha, Y., Kasetti, R. B., Nabi, S. A., Swapna, S., & Apparao, C. (2011).** Antihyperglycemic and hypolipidemic activities of *Setaria italica* seeds in STZ diabetic rats. *Pathophysiology*, 18, 159–164. <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2010.08.003>
237. **Siwela, M., Taylor, J. R., de Milliano, W. A., & Dudu, K. G. (2010).** Influence of phenolics in finger mil on grain and malt fungal load, and malt quality. *Food Chemistry*, 121, 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.Foodchem.2009.12.062>
238. **Sokol-Letowska, A., Osmianski, J., & Wojdylo, A. (2006).** Antioxidant activity of phenolic compound of hawthorn, pine and skullcap. *Food Chemistry*, 103(3), 853–859.
239. **Srinivasan, R., Mageswari, A., Subramanian, P., Maurya, V. K., Sugnathi, C. et al. (2017).** Exogenous expression of ACC deaminase gene in psychrotolerant bacteria alleviates chilling stress and promotes plant growth in mils under chilling conditions. *Indian Journal of Experimental Botany*, 55, 463–468.
240. **Subba Rao, M. V. S. S. T., & Muralikrishna, G. (2002).** Evaluation of the antioxidant properties of free and bound phenolic acids from native and malted finger mil (*Ragi*, *Eleusine coracana* Indaf-15). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50(4), 889–892. <https://doi.org/10.1021/jf011210d>
241. **Sudhakar R, Reddy PN, Bharathi V. 2012.** Downy Mildew Disease of Pearl Mil (Bajra): Infection, Damage and Management Strategies. *International Journal of Bio-resource and Stress Management*,3(1):103-108.http://www.pphouse.org/20_IJBSM
242. **Sumathi P, Madineni S, Veerabhadhiran P.2010.** Genetic Variability for Different Biometrical Traits in Pearl Mil Genotypes [*Pennisetum glaucum* (L) R.Br.]. *Electronic Journal of Plant Breeding*,1(4):347-440.<https://sites.google.com/site/ejplantbreeding/vol-1-4>
243. **Tanzubil PB, Mensah GWK. 2000.** Incidence and

distribution of the stem borer, *Coniesta ignefusalis* (Hampson) (Lepidoptera: Pyralidae), in cereal crops in northern Ghana. *Ghana Jnl agric. Sci.*, 33 : 63-70. DOI : 10.4314/gjs.v33i1.1885

244. **TCHUENBOU Fidéline L., 2006**, Maltage du mil et du sorgho : Mise au point d'outils et méthodes et aptitudes au maltage de quelques variétés du Burkina Faso et du Bénin, Montpellier, pp.6-10, 118p.
245. **Thakur RP, King SB. 1988a**. Smut disease of pearl mil. Information Bulletin N° 25. Patancheru, Andhra Pradesh 502 324, India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, p. 20.
246. **Thakur RP, King SB. 1988b**. Ergot disease of pearl mil. Information Bulletin N° 24. Patancheru, A.P. 502 324. India: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, p. 27.
247. **Thakur RP, Rai KN, Khairwal IS, Mahala RS. 2008**. Strategy for downy mildew resistance breeding in pearl mil in India. Journal of SAT Agricultural Research, 6 : 1-11. <http://ejournal.icrisat.org>
248. **Thakur RP, Rao VP, Amruthesh KN, Shetty HS, Datar VV. 2003**. Field surveys of pearl mil downy mildew-Effects of hybrids, fungicide and cropping sequence. Journal of Mycology and Plant Pathology, 33(3): 387–394. <http://www.oar.icrisat.org/JMycolPlPathol>
249. **Thakur RP, Sharma R, Rao VP. 2011**. Screening Techniques for Pearl Mil Diseases. Information Bulletin N°89. Patancheru 502 324, Andhra Pradesh, India : International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, p. 56
250. **Tian, B., Qiao, Z., Zhang, L., Li, H., Pei, Y. (2016)**. Hydrogen sulfide and proline cooperate to alleviate cadmium stress in foxtail mil seedlings. Plant Physiology and Biochemistry, 109, 293–299. DOI 10.1016/j.plaphy.2016.10.006
251. **Tiwari, S., Lata, C., Singh Chauhan, P., Prasad, V., Prasad, M. (2017)**. A functional genomic perspective on drought signalling and its crosstalk with phytohormone-mediated signalling pathways in plants. Current Genomics, 18(6), 469–482. DOI 10.2174/1389202918666170605083319.
252. **Tostain Serge. (1992)**. Enzyme diversity in pearl mil (*Pennisetum glaucum* L.): 3. Wild mil. Theoretical and Applied Genetics, (83), p. 733-742.
253. **Tsao, R. et Deng, Z. (2004)**. Separation procedures for naturally occurring antioxidant phytochemicals. Journal of Chromatography B, 812 ; 85-99.

254. **United States Department of Agriculture, 2016–17.**

Foreign Agricultural Service

255. **Upadhyaya HD, Reddy KN, Sastry DVSSR. 2008**. Directives pour la régénération : mil à chandelles. In: Crop specific regeneration guidelines [CD-ROM]: CGIAR System-wide Genetic Resource Programme (SGRP), Dulloo ME, Thormann I, Jorge MA, Hanson J (ed). Italy, Rome, 1-10.
256. **Upadhyaya, H. D., Ravishankar, C. R., Narasimhudu, Y., Sharma, N.D. R. K., Singh, S. K., & Varshney, S. K., ... Gowda, C. L. L. (2011)**. Identification of trait specific germplasm and developing a mini core

collection for efficient use of foxtail mil genetic resources in crop improvement. *Field Crops Research*, 124, 459–467.

- V**
257. **Vadez, V., Hash, T., Kholova, J. (2012).** Phenotyping pearl mil for adaptation to drought. *Frontiers in Physiology*, 3, 386. DOI 10.3389/fphys.2012.00386.
258. **van Oosterom, E. J., Whitaker, M. L., Weltzien, E. (1996).** Integrating genotype by environment interaction analysis, characterization of drought patterns, and farmer preferences to identify adaptive plant traits for pearl mil. In: Cooper, M., Hammer, G. L. (eds.), *Plant adaptation and crop improvement*, pp. 282–402. Wallingford : CAB International
259. **Vijayalakshmi, D., Ashok, S. K., Raveendran, M. (2014).** Screening for salinity stress tolerance in rice and finger mil genotypes using shoot Na⁺/K⁺ ratio and leaf carbohydrate contents as key physiological traits. *Indian Journal of Plant Physiology*, 19(2), 156–160. DOI 10.1007/s40502-014-0090-y.
260. **Viswanath, V., Urooj, A., & Malleshi, N. G. (2009).** Evaluation of antioxidant and antimicrobial properties of finger mil polyphenols (*Eleusine coracana*). *Food Chemistry*, 11, 340–346.
261. **Volack J et Stodola J., (1983).** *Les plantes médicinales*. Ed GRUND, paris.

- W**
262. **Wang, M., Li, P., Li, C., Pan, Y., Jiang, X. et al. (2014).** SiLEA14, a novel atypical LEA protein, confers abiotic stress resistance in foxtail mil. *BMC Plant Biology*, 14(1), 290. DOI 10.1186/s12870-014-0290-7.
263. **Wei, S., Cheng, D., Yu, H., Wang, X., Song, S., & Wang, C. (2018).** Mil-enriched diets attenuate high salt-induced hypertension and myocardial damage in male rats. *Journal of Functional Foods*, 44, 304–312. <https://doi.org/10.1016/j.jff.2018.03.028>
264. **Wilson JP, Hess DE, Hanna WW. 2000.** Resistance to *Striga hermonthica* in wild accessions of the primary gene pool of *Pennisetum glaucum*. *Phytopathology*, 90(10) :1169-1172.
265. **Wilson JP, Sanogo MD, Nutsugah SK, Angarawai I, Fofana A, Traore H, Ahmadou I, Muuka FP. 2008.** Evaluation of pearl mil for yield and downy mildew resistance across seven countries in sub-Saharan Africa. *African Journal of Agricultural Research*, 3(5): 371-378. <http://digitalcommons.unl.edu/intormilpublications/33>.

- X**
266. **Xu, W., Wei, L. U., Qu, W., Liang, Z., Wang, J., Peng, X., ... Huang, K. (2011).** A novel antifungal peptide from foxtail mil seeds. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91, 1630–1637. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4359>

267. **Y**adav OP, Rai KN. 2013. Genetic Improvement of Pearl Mil in India. *Agric Res*, 2(4) : 275 – 292
268. **Yang X, Wan Z, Perry L, Lu H, Wang Q, Zhao C, Li J, Xie F, Yu J, Cui T, Wang T, Li M, Ge Q. 2012.** Early mil uses in northern China. *Proc. Nat.Acad.Sci.USA*, 109(10) :3726-3730. DOI: <http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1115430109>
269. **Yarrow, G.K., and D.T. Yarrow. 1999.** Managing wildlife. Sweet Water Press. Birmingham.
270. **Yeshvekar, R. K., Nitnavare, R. B., Chakradhar, T., Bhatnagar-Mathur, P., Reddy, M. K. et al. (2017).** Molecular characterization and expression analysis of pearl mil plasma membrane proteolipid 3 (Pmp3) genes in response to abiotic stress conditions. *Plant Gene*, 10, 37–44. DOI 10.1016/j.plgene.2017.05.002.
271. **Yezza S., et Bouchama S., 2014 :** index des métabolites secondaires végétaux, université kasdi merbah, Ouargla faculté des sciences de la nature et de la vie département des sciences biologiques.47 pages.
272. **Youm O, Maliki Y, Hall DR, Farman DI. 1998.** Trials of mating disruption against the mil stem borer, *Coniesta ignefusalis* Hampson (Lepidoptera: Pyralidae) in Niger, 1996-1998. Appendix 1, p. 21
273. **Youm O, Owusu EO. 1998.** Assessment of yield loss due to the mil head miner *Heliocheilus albipunctella* (Lepidoptera: Noctuidae) using a damage rating scale and regression analysis in Niger. *Int. J. Pest Manage*, 44(2) : 119-121. DOI : 10.1080/096708798228428

274. **Z**akari AH, Mahamadou B, Adam T. 2016. Les systèmes de productions agricoles du Niger face au changement climatique : défis et perspectives. *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 10(3) : 1262-1272.
275. **Zhishen, J., Mengcheng, T. And Jianming, W., 1999.** The Determination of Flavonoid Contents In Mulberry And Their Scanenging Effects On Superoxide Radicals. *Food Chemistry* 64 (4): 555- 559.
276. **Zohary, D. and Hopf, M. 1988.** Domestication of plants in the old world. The origin and spread of cultivated plants in West Asia, Europe, and the Nile Valley. 3rd ed. Oxford University Press Inc., New York, NY. xi + 316 pp.

Année universitaire : 2021-2022

Présenté par : Seghiri Adem abdenmour
Tachour Amir

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Biodiversité et physiologie végétale

Intitulé : Etude phytochimique d'une céréale secondaire : le mil (*Pennisetum glaucum L*)

Résumé :

Notre travail a porté sur une céréale secondaire, le mil (*Pennisetum glaucum L*). Une étude phytochimique est réalisée sur les feuilles de la plante au stade floraison de la campagne agricole 2020-2021. L'extraction est faite par deux méthodes d'extraction liquide –solide et liquide – liquide. L'extrait brut a subi des affrontements successifs par des solvants de polarité croissante (chloroforme, l'acétate d'éthyle et n-butanol). Les tests phytochimiques de dosage des trois métabolites secondaires (polyphénols, flavonoïdes et tanins) sont effectués sur les quatre fractions. Les résultats de la détermination des rendements des quatre extraits présentent un rendement très important équivalent à 8,33% chez l'extrait brut, et rarement chez l'extrait chloroformique à 0,65%. Alors qu'il devient plus faible en passant aux autres extraits, extrait n-butanol (0,30%) et acétate d'éthyle (0,25%). Les résultats de l'analyse quantitative des métabolites secondaires indiquent la richesse de l'extrait brut en polyphénols, de l'extrait n-butanol en flavonoïdes, et de l'extrait chloroformique en tanins.

Mots-clefs : *Pennisetum glaucum*, extraction, polyphénols, flavonoïdes, tanins

Laboratoires de recherche :

Laboratoire de Biochimie RDC (Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Encadreur : Chaib ghania (Prof - Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Examineur 1 : Chibani Salih (MCA - Université Frères Mentouri, Constantine 1).

Examineur 2 : Bouzid Salha (MCB - Université Frères Mentouri, Constantine 1).