

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
المدرسة الوطنية العليا للفلاحة - الحراش - الجزائر  
Ecole Nationale Supérieure Agronomique - El Harrach - Alger

## Thèse

Présenté par  
**Redha OULD KIAR**

En vue de l'obtention du Diplôme  
**Doctorat en Sciences**

Filière : Sciences Agronomiques  
Option : Production végétale

## Thème

« Etude de la diversité chez des populations du sorgho  
[*Sorghum bicolor* (L.) Moench] en Algérie »

Présenté et soutenu publiquement le :

**Président :**

Mr. LATATI Mourad ..... Pr à l'ENSA - El Harrach - Alger

**Directeur de thèse :**

Mr. ABDELGUERFI Aissa ..... Pr retraité de l'ENSA - El Harrach - Alger

**Co-Directeur de thèse :**

Mr. MEBARKIA Ammar ..... Pr à l'université de Sétif 1 - Sétif

**Examineurs :**

Mr. DJABALI Djafar ..... Pr à l'Ecole Normale Supérieure - Kouba - Alger

Mme. TALLAH Sihem ..... MCA à l'ENSA - El Harrach - Alger

Mr. FELLAHI Zine El Abidine ..... MCA à l'université Bordj Bou Arréridj

Année universitaire : 2021/2022

## Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
ملخص	IV
Abstract	VI
Liste des abréviations	VIII
Liste des figures	IX
Liste des tableaux	XI
Introduction	01
<b>Chapitre I. Revue bibliographique</b>	
I.1. Situation du sorgho dans le monde et en Algérie	03
I.2. Taxonomie	04
I.3. Critères de sélection	08
I.4. Qualité fourragère	11
I.5. Morphologie	14
I.5.1. Racine	15
I.5.2. Tige	15
I.5.3. Feuille	15
I.5.4. Panicule	16
I.5.5. Graine	16
I.6. Stades phénologiques	18
I.7. Exigences de la culture	19
I.8. Utilisations du sorgho	20
<b>Chapitre II. Matériel et méthodes</b>	
II.1. Matériel végétal	22
II.1.1. Premier échantillonnage	22
II.1.2. Deuxième échantillonnage	23
II.2. Sites expérimentaux	24
II.3. Conduite des essais	25
II.3.1. Au laboratoire (Test de germination)	25
II.3.2. Mise en place des essais sur terrain	25
II.3.3. Entretien des essais	29
II.4. Collecte des données, mesures et notations	32
II.4.1. Collecte des données de l'essai n°1	32
II.4.2. Collecte des données de l'essai n°2	35
II.5. Analyse des données	37
<b>Chapitre III. Résultats et discussions</b>	
III.1. Reconnaissance des races de sorgho dans les populations cultivées dans le Sahara de l'Algérie	40
III.2. Etude de la variabilité génétique entre les populations et variétés de l'essai n°1 (7 locales et 10 importées) de sorgho et l'estimation de l'héritabilité au sens large	46
III.2.1. Taux de germination	46
III.2.2. Caractérisation des 17 populations et variétés à l'aide des paramètres agromorphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante (analyse descriptive)	47
III.2.3. Analyse de la variance (ANOVA) des variables agromorphologiques de la plante	47
III.2.3.1. Variation des paramètres : longueur feuille ( <i>LongF</i> ), largeur feuille ( <i>LargF</i> )	49

et surface foliaire ( <i>SurfF</i> )	
III.2.3.2. Variation des paramètres : poids frais feuille (PFF), poids sec feuille (PSF), matière sèche feuille ( <i>MSF</i> ) et diamètre tige ( <i>DiamT</i> )	51
III.2.3.3. Variation des paramètres : hauteur finale ( <i>HautFin</i> ), vitesse de croissance ( <i>VitCr</i> ) et taux de chlorophylle ( <i>SPAD</i> )	53
III.2.3.4. Variation des paramètres : vigueur ( <i>Vig</i> ), nombre talle ( <i>NbT</i> ) et nombre feuille ( <i>NbF</i> )	56
III.2.3.5. Variation des paramètres : exsertion pédonculaire ( <i>Exs</i> ), longueur paniculaire ( <i>LongPan</i> ) et largeur paniculaire ( <i>LargPan</i> )	57
III.2.3.6. Variation des paramètres : apparition paniculaire ( <i>ApPan</i> ) et floraison ( <i>Flor</i> )	60
III.2.4. Analyse des corrélations entre les paramètres agro-morphologiques quantitatives de la partie végétative de la plante	61
III.2.5. Héritabilité des caractères agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante	64
III.2.6. Analyse des composantes principales des paramètres agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante	66
III.2.7. Structuration agro-morphologique des 17 populations et variétés en clusters à l'aide de la méthode de la Classification Hiérarchique Ascendante (Distance Génétique)	69
III.2.8. Structuration agro-morphologique des échantillons à l'aide de la méthode de l'Analyse Factorielle Discriminante	70
III.3. Etude de la variabilité génétique entre 19 populations locales de sorgho et un hybride de l'essai n°2	73
III.3.1. Caractérisation des 20 échantillons à l'aide des paramètres agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante (analyse descriptive)	73
III.3.2. Analyse de la variance (ANOVA) des variables agro-morphologiques de la plante	73
III.3.3. Analyse des corrélations entre les paramètres agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante	74
III.3.4. Analyse des composantes principales des paramètres agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante	76
III.3.5. Structuration agro-morphologique des 20 populations et la variété hybride en clusters à l'aide de la méthode de la Classification Hiérarchique Ascendante (Distance génétique)	78
III.3.6. Discussion de l'essai n°2	80
<b>Conclusion</b>	86
<b>Références bibliographiques</b>	92
<b>Annexes</b>	100

## **Remerciements**

Louanges à « ALLAH » le tout puissant et le miséricordieux qui a orienté mes sens vers les bons choix et les bons réflexes afin que ce modeste travail aboutit à sa bonne fin.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, Monsieur ABDELGUERFI Aïssa. Professeur de l'enseignement supérieur, retraité de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique, pour ses encouragements et son aide permanents à l'élaboration et le suivie de mon travail malgré les moments difficiles qu'il a passés ... Merci infiniment. Veuillez bien trouver ici l'expression profonde de mon estime. Mon co-directeur de thèse Professeur MEBARKIA Ammar pour les encouragements et l'accompagnement durant les moments difficiles, je tiens à lui transmettre ma profonde reconnaissance.

Mes vifs remerciements vont à Docteur LATATI Mourad enseignant chercheur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique qui m'a fait l'honneur de présider le jury, à Professeur DJABALI Djaafar, enseignant chercheur à l'Ecole Normale Supérieure Kouba, Docteur TELLAH Sihem enseignant chercheur à l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique et Docteur FELLAHI Zine El Abidine, enseignant chercheur à l'université de Bordj Bou Arréridj d'avoir pris le temps pour lire, examiner et juger ce modeste travail.

Je tiens également à remercier sincèrement et profondément Professeur NADJEMI Boubekour qui n'a pas cessé de m'aider à tout moment. Il n'y aura automatiquement pas de mots pour exprimer le respect envers sa personnalité.

Mes profonds remerciements vont aux Docteurs KIROUANI Abderrezzak, KADRI Adel, BELLIK Yuba, BADRI Mounawer, BELHADI Badreddine et SOUILAH Rachid qui m'ont aidé durant les moments critiques de ma vie scientifique.

J'exprimer mes vives reconnaissances à mes chers parents qui m'ont éclairé le chemin de la vie par leur grand soutien et leurs encouragements et qui ont toujours aimé me voir réussir. Je n'oublie pas de remercier mes chers frères, sœurs de leurs soutiens tout au long de ma carrière scientifique.

Spécial remerciement à ma plus proche personne dans ma vie, ma chère femme pour son aide à la réalisation de ce modeste travail, son encouragement et son soutien moral permanent.

Enfin mes remerciements vont aussi à de nombreuses personnes, de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

*Redha OULD-KIAR*



## Dédicaces

A ma mère

A mon père

A ma femme

A mes frères Bilal, Ghazi, Mohamed et Youcef

A mes sœurs Samia et Nassima

A mon garçon Mohamed Rayane et à mes filles Rihem et Ines

A Djaafar, l'ami, le frère et le père de ma femme

A mes amis sans exception

A tous ceux que j'aime ... et ceux qui m'aiment ... je dédie ce modeste travail.

"الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبتوفيقه تتحقق المقاصد والغايات"

**« Etude de la diversité chez des populations du sorgho  
(*Sorghum Bicolor* L. Moench) en Algérie »**

**Résumé de la thèse**

Les régions du sud de l'Algérie comptent un nombre appréciable d'accessions de sorgho local, mais les oasiens conservent leurs semences d'une manière traditionnelle et exposent leurs ressources à la disparition. L'objectif du présent travail est l'évaluation de certaines populations locales et variétés étrangères du sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivé en Algérie, via certains paramètres agro-morphologiques. Deux essais *ex-situ* ont été installés à la station expérimentale de l'ENSA, El Harrach. Le premier regroupe des populations locales et d'autres variétés introduites du Niger et de l'Europe et des Etats Unis (17), le deuxième regroupe 19 populations originaires d'In Salah et un témoin hybride. L'analyse de la variance (ANOVA), de l'essai n°1, a révélé des différences significatives entre les accessions étudiées pour l'ensemble des paramètres analysés. Les accessions algériennes ont révélé des valeurs importantes pour les paramètres foliaires. Des corrélations des paramètres étudiés ont été enregistrées surtout pour la floraison et la hauteur finale. En se basant sur l'analyse en composante principale (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (CHA), les accessions locales ont été classées dans un groupe unique, alors que les hybrides commerciaux ont été regroupés sous un deuxième groupe, tandis que le troisième cluster a été formé par les accessions du Niger. Les populations locales (Ai4 et Ad1), la variété Nig1 et l'hybride Fr1, ont montré des caractéristiques agro-morphologiques intéressantes. L'ANOVA de l'essai n°2 a révélé des effets significatifs pour les 12 marqueurs agro-morphologiques étudiés. Ainsi, les populations Ai19 et Ai13 ont montré une diversité importante du point de vue qualité fourragère et cycle végétatif. L'ACP et CHA ont révélé une grande variabilité tout en classant les accessions sous 4 clusters. Le premier groupe comporte Ai19, Ai9, Ai29, Ai13 et Ai40 alors que la variété hybride a été classée dans un autre groupe avec Ai33 et Ai34 connues par leurs faibles hauteurs et cycle végétatif court.

**Mots-clés** : paramètres agro-morphologiques, diversité génétique, populations locales et variétés importées, variabilité phénotypique.

## "دراسة التنوع في أصناف/عشائر الذرة الرفيعة في الجزائر"

### ملخص المذكرة

تتمتع مناطق جنوب الجزائر بعدد كبير من العشائر المحلية للذرة الرفيعة، لكن فلاحي الواحات يحفظون بذورها بطريقة تقليدية وبذلك تكون هذه الموارد المحلية معرضة للاندثار. إن الغاية من أعمال هذه الأطروحة هي تقييم بعض العشائر المحلية والأصناف الأجنبية من الذرة الرفيعة المزروعة في الجزائر، من خلال بعض المعايير المورفولوجية-الزراعية. تم إجراء اختبارين خارج الموقع في المحطة التجريبية للمعهد الوطني للعلوم الفلاحية بالحراش. شملت الأولى عشائر محلية وأصناف مُستقدمة من النيجر وأوروبا والولايات المتحدة وعددها 17، والثاني يشمل 19 عشيرة من عين صالح وصنف هجين للتحكيم. كشف تحليل التباين (ANOVA) من التجربة الأولى عن فروق ذات دلالة إحصائية بين الأصناف المدروسة لجميع العوامل التي تم تحليلها. تكشف العشائر الجزائرية عن قيم مهمة لعوامل الأوراق. تسجيل ارتباطات العوامل المدروسة خاصة الزهرة والطول النهائي. بناءً على تحليل المكون الرئيسي (PCA) والتصنيف الهرمي التصاعدي (CHA) تم تصنيف العشائر المحلية في مجموعة واحدة، بينما تم تجميع الأصناف الهجينة التجارية تحت المجموعة الثانية، تشكلت المجموعة الثالثة من أصناف النيجر. تظهر العشائر المحلية (Ai4 و Ad1)، الصنف Nig1 والهجين Fr1، خصائص مورفولوجية-زراعية مثيرة للاهتمام. كشف تحليل التباين (ANOVA) من التجربة الثانية عن تأثيرات مهمة للعوامل المورفولوجية-الزراعية الـ 12 المدروسة. أظهرت العشيرتين المحليتين Ai19 و Ai13 تنوعاً كبيراً بخصوص جودة العلف والدورة الخضرية. كشفت ACP و CHA عن تنوع كبير أثناء تصنيف العوامل تحت 4 مجموعات. تضم المجموعة الأولى العشائر المحلية Ai19، Ai9، Ai29، Ai13 و Ai40 بينما تم تموضع الصنف الهجين Fr1 في مجموعة أخرى مع العشيرتين المحليتين Ai33 و Ai34 المعروفتين بطولهما المنخفض ودورتهما النباتية القصيرة.

**الكلمات المفتاحية:** العوامل المورفولوجية-الزراعية، التنوع الوراثي، العشائر المحلية والأصناف المستوردة، التباين الظاهري.

---

**“Study of diversity on sorghum populations  
(*Sorghum Bicolor* L. Moench) in Algeria”**

**Abstract**

The regions of southern Algeria have a significant number of accesses of local sorghum, but the oasis people save their seeds in a traditional way and expose their resources to disappearance. The objective of this work is the evaluation of some local populations and introduced varieties of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivated in Algeria, via certain agro-morphological parameters. Two ex-situ tests were set up at the ENSA experimental station, El Harrach. The first includes local accessions and other varieties introduced from Niger and Europe and the United States (17 accessions), the second includes 19 populations from In Salah and a hybrid control. Analysis of variance (ANOVA) from Trial 1 revealed significant differences between the accessions studied for all of the parameters analyzed. Algerian accessions revealed important values for leaf parameters. Correlations of the studied parameters were recorded especially for flowering and final height. Based on principal component analysis (PCA) and hierarchical clustering analysis (HCA), local accessions were classified into a single group, while commercial hybrids were grouped under a second group, while the third cluster was formed by the accessions of Niger. The local populations (Ai4 and Ad1), the variety Nig1 and the hybrid Fr1, showed interesting agro-morphological characteristics. The ANOVA of trial 2 revealed significant effects for the 12 agro-morphological markers studied. Thus, populations Ai19 and Ai13 showed significant diversity from the point of view of forage quality and vegetative cycle. ACP and HCA revealed great variability while classifying accessions under 4 clusters. The first cluster consists of Ai19, Ai9, Ai29, Ai13 and Ai40 while the hybrid variety Fr1 has been classified in another group with Ai33 and Ai34 known by their low heights and short vegetative cycle.

**Keywords:** Agro-morphological parameters, genetic diversity, local populations and imported varieties, phenotypic variability.

---

## Liste des abréviations

ACP :	Analyse en composantes principales
ANOVA :	Analyse de la variance
ApPan :	Apparition paniculaire
CAUSSADE :	Boîte commerciale française de semences de sorgho
CHA :	Classification Hiérarchique Ascendante
Cm :	Centimètre
DiamT :	Diamètre tige
ENSA :	Ecole Nationale Supérieure Agronomique
Exs :	Exsertion pédonculaire
Flor :	Floraison.
HautFin :	Hauteur finale de la plante
INRAN :	Institut National de la Recherche Agronomique du Niger
LargF :	Largeur feuille
LargPan :	Largeur paniculaire
LongF :	Longueur feuille
LongPan :	Longueur paniculaire
Max :	Maxima
Min :	Minima
Moy :	Moyenne
MSF :	Matière sèche feuille
NbF :	Nombre de feuilles
NbT :	Nombre de talles
NPK :	Eléments fertilisants majeurs
PC :	Composant principal
PFF :	Poids frais feuille
Ppds :	La plus petite différence significative
ppm :	Poids par million
PSF :	Poids sec feuille
SPAD :	Taux de chlorophylle
SPSS :	Logiciel d'analyse statistique (Statistical Package for the Social Sciences)
STATISTICA :	Logiciel d'analyse statistique (nom générique de la gamme de logiciels édités par la société StatSoft)
SurfF :	Surface foliaire
USA :	Etats Unies d'Amérique
Vig :	Vigueur
VitCr :	Vitesse de croissance
XLSTAT :	Logiciel de statistique et d'analyse de données intégré dans Microsoft Excel.
ICRISAT :	Institut international de recherche sur les cultures des zones tropicales semi-arides
FAO :	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (Food Agriculture Organisation)
IBPGR :	Commission internationale des ressources génétiques végétales (International Board for Plant Genetic Resources)

## Liste des figures

	Page
<b>Figure 1.</b> <i>Sorghum bicolor</i> subsp. <i>Drummondii</i> (GBIF, 2021).	<b>6</b>
<b>Figure 2.</b> <i>Sorghum bicolor</i> subsp. <i>Verticilliflorum</i> ou <i>Arundinaceum</i> (GBIF, 2021).	<b>7</b>
<b>Figure 3</b> - Sorgho grain (a), Sorgho à balais (b), Sudangrass (c), sorgho sucré (d), sorgho spontané (Shattercane) et à balais dans un champs (e) (Dahlberg et al., 2011).	<b>8</b>
<b>Figure 4.</b> Schéma sur la classification des sorghos selon le type d'épillet et la forme des panicules (Clerget, 2004 ; Harlan et DeWet, 1972).	<b>9</b>
<b>Figure 5.</b> Photos de panicules des cinq races du sorgho a : bicolor - b : guinea - c : caudatum - d : durra - e : kafir (Chantereau et al., 2013).	<b>10</b>
<b>Figure 6.</b> Schéma représentant les formes de panicules (IBPGR/ICRISAT, 1993).	<b>10</b>
<b>Figure 7.</b> Photos des parties de la plante du sorgho : a. Feuille, b. Plante entière, c. Tige robuste, d. Panicule, e. racine robuste f. Graine avec légende (Chantereau et al., 2013).	<b>17</b>
<b>Figure 8.</b> Photos montrant les bottes fraîches et sèches du sorgho local à In Salah.	<b>21</b>
<b>Figure 9.</b> Localisation géographique des sites de collecte des populations et variétés du sorgho étudié.	<b>23</b>
<b>Figure 10.</b> Carte du type climatique Koppen-Geiger de l'Afrique (Peel et al., 2007).	<b>25</b>
<b>Figure 11.</b> Température moyenne (A) et précipitation (pluviosité) (B) pour la région d'El Harrach - Alger durant 6 mois d'expérience, 2013 (—○—), 2014 (—◇—), moyenne 30 ans (—□—) (Raspisaniye Pogodi Ltd, 2017).	<b>25</b>
<b>Figure 12.</b> Test de germination des graines des échantillons de l'essai n°1, 48 heures après incubation.	<b>27</b>
<b>Figure 13.</b> Dispositif expérimental pour l'essai n°1 avec les dimensions des parcelles élémentaires (2013 et 2014).	<b>28</b>
<b>Figure 14.</b> Dispositif expérimental pour l'essai n°2 avec les dimensions des parcelles élémentaires (2014).	<b>29</b>
<b>Figure 15.</b> Dispositif expérimental pour l'essai n°1 (2013 à gauche) et les deux essais n°1 et n°2 (2014 à droite).	<b>30</b>
<b>Figure 16.</b> Semis des graines sur alvéoles sous serre.	<b>31</b>
<b>Figure 17.</b> Transplantation essai n°1 (2013).	<b>31</b>
<b>Figure 18.</b> Evolution de la végétation au cours des deux années de l'essai n°1.	<b>32</b>
<b>Figure 19.</b> Evolution de la végétation des plantes de l'essai n°2.	<b>32</b>
<b>Figure 20.</b> Pesée du poids secs des feuilles (2013).	<b>34</b>
<b>Figure 21.</b> Mesure de la hauteur finale des plantes (IBPGR/ICRISAT, 1993).	<b>34</b>
<b>Figure 22.</b> Estimation de la chlorophylle par l'appareil manuel électronique SPAD.	<b>35</b>
<b>Figure 23.</b> Types d'exsertion d'inflorescence (1, 2, 3 et 4 in IBPGR/ICRISAT (1993) et House (1985)), Largeur paniculaire (6), Longueur paniculaire (7) et l'exsertion d'inflorescence (5) vue sur terrain.	<b>36</b>
<b>Figure 24.</b> Diagrammes de comparaison des paramètres agro morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : la longueur et la largeur de la feuille et la surface foliaire.	<b>50</b>
<b>Figure 25.</b> Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : poids frais, poids sec, matière sèche feuille et diamètre tige.	<b>52</b>
<b>Figure 26.</b> Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : hauteur finale, vitesse de croissance et taux de chlorophylle.	<b>54</b>
<b>Figure 27.</b> Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : vigueur, nombre de talles et nombre de feuilles par plante.	<b>56</b>
<b>Figure 28.</b> Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : exsertion pédonculaire, longueur et largeur de la panicule.	<b>58</b>
<b>Figure 29.</b> Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et	<b>60</b>

variétés de l'essai n°1 : apparition paniculaire et la floraison.	
<b>Figure 30.</b> L'inflorescence des cinq races du sorgho dans le monde (Reddy et Patil, 2015).	<b>64</b>
<b>Figure 31.</b> Distributions des populations et variétés du sorgho de l'essai n°1 et valeurs de leurs paramètres agro-morphologiques autour des axes principaux PC1 et PC2 de l'Analyse en Composantes Principales.	<b>68</b>
<b>Figure 32.</b> Dendrogramme des 17 populations et variétés (essai n°1) par la méthode de Classification Hiérarchique Ascendante sur la base des distances euclidiennes déduites des moyennes des variables mesurées.	<b>70</b>
<b>Figure 33.</b> Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et la variété hybride de l'essai n°2.	<b>75</b>
<b>Figure 34.</b> Distributions des populations et la variété hybride du sorgho de l'essai n°2 et valeurs de leurs paramètres agro-morphologiques autour des axes principaux PC1 et PC2 de l'Analyse en Composantes Principales.	<b>77</b>
<b>Figure 35.</b> Dendrogramme des 20 populations et la variété hybride (essai n°2) par la méthode de Classification Hiérarchique Principale sur la base des distances euclidiennes déduites des moyennes des variables mesurées.	<b>79</b>
<b>Figure 36.</b> Photo représentant l'accession locale Ai19 à droite et l'hybride Fr1 à gauche.	<b>81</b>
<b>Figure 37.</b> Photo montrant la large variabilité enregistrée et les potentialités fourragères chez les populations locales.	<b>83</b>

## Liste des tableaux

	Page
<b>Tableau 1.</b> Production annuelle du sorgho des principaux pays producteurs (statistiques agricoles FAOSTAT, 2021).	<b>4</b>
<b>Tableau 2.</b> Les principaux caractères identitaires des races du sorgho et leurs lieux de répartitions (Chantereau et <i>al.</i> , 2013, Harlan et DeWet, 1972).	<b>11</b>
<b>Tableau 3.</b> Code, noms communs et sites d'échantillonnages de 17 accessions du sorgho (essai n°1).	<b>23</b>
<b>Tableau 4.</b> Code, noms communs et sites d'échantillonnages de 20 populations et variété du sorgho (Essai n°2).	<b>24</b>
<b>Tableau 5.</b> Détermination des races et sous races des populations et variétés du sorgho de nos essais (Harlan et De Wet, 1972 ; IPBGRI/ICRISAT, 1993 ; Chantereau, 2013).	<b>41</b>
<b>Tableau 6.</b> Taux de germination, après 24 h et 72 h, des 17 échantillons de l'essai n°1.	<b>46</b>
<b>Tableau 7.</b> Analyse descriptive des résultats des paramètres agro-morphologiques des 17 échantillons de l'essai n°1.	<b>48</b>
<b>Tableau 8.</b> Analyse de la variance (ANOVA) des paramètres agro-morphologiques des 17 échantillons de l'essai n°1.	<b>48</b>
<b>Tableau 9.</b> Coefficients de corrélation entre les différents paramètres étudiés deux à deux (Pearson) pour les 17 populations et variétés de l'essai n°1.	<b>62</b>
<b>Tableau 10.</b> Variance génétique ( $V_g$ ), Variance environnementale ( $V_e$ ), Variance phénotypique ( $V_{phen}$ ), l'héritabilité au sens large ( $H^2$ ) pour les 18 paramètres étudiés et les 17 populations et variétés de l'essai n°1.	<b>65</b>
<b>Tableau 11.</b> Projections des différents paramètres agro-morphologiques, des 17 populations et variétés de l'essai n°1, sur les deux premiers axes PC1 et PC2 de l'analyse des composantes principales.	<b>67</b>
<b>Tableau 12.</b> Test d'égalité unidimensionnel des classes pour les 18 paramètres étudiés.	<b>71</b>
<b>Tableau 13.</b> Analyse descriptive des résultats des paramètres étudiés agro-morphologiques des 20 populations et la variété hybride de l'essai n°2.	<b>73</b>
<b>Tableau 14.</b> Coefficients de corrélation entre les différents paramètres agro-morphologiques étudiés deux à deux (Pearson) pour les 20 populations et la variété hybride de l'essai n°2.	<b>76</b>
<b>Tableau 15.</b> Projections des différents paramètres agro-morphologiques des 20 populations et la variété hybride de l'essai n°2, sur les deux premiers axes PC1 et PC2 de l'analyse des composantes principales.	<b>78</b>

# **Introduction**

## **INTRODUCTION**

Le sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] est une céréale classée en cinquième position après le maïs, le riz, le blé et l'orge en terme de production. Il est cultivé à différentes fins (grains, fourrage, sirop de sucre, biocarburants et divers usages médicaux) (Bantilan et *al.*, 2004 ; Dahlberg et *al.*, 2011; Tonapi et *al.*, 2011 ; Teshome et *al.*, 2016 ; Upadhyaya et *al.*, 2016). Il s'agit d'une denrée alimentaire de base de millions de personnes. Il a aidé les paysans pauvres à survivre pendant les périodes difficiles, mais il fait toujours partie intégrante des moyens de subsistance des agriculteurs africains (Kudadjie et *al.*, 2004, Tonapi et *al.*, 2011).

Dans le Sahara de l'Algérie, le sorgho est appelé : Tafsout en arabe ou Abora en dialecte Targui. De nombreuses accessions de sorgho ont la capacité de pousser dans cette région où la température est très élevée, atteignant une moyenne mensuelle de 45,2°C et leur irrigation se fait avec des eaux souterraines salines. En réalité, la production de sorgho algérien dépend de la récolte et de la transformation traditionnelle. La plus grande partie de la récolte est utilisée pour l'alimentation des animaux en général et moins pour la consommation humaine. Dans le passé, un large éventail de produits alimentaires traditionnels a été fabriqué à partir du sorgho, y compris la kisra, les bouillies et le couscous (Bouderies, 2010).

Récemment, des travaux ont été consacrés à la valorisation des graines des accessions de sorgho local cultivé au Sahara. Ces travaux ont évalué la qualité des grains, étudié l'isolement des amidons et leurs caractéristiques (Boudries et *al.*, 2009, Souilah et *al.*, 2014), étudié l'isolement des fractions protéiques et leurs caractéristiques (Mokrane et *al.*, 2009, 2010). La finalité des travaux cités ci-dessus est la mise en évidence des caractéristiques spécifiques des différents composés des graines du sorgho local pour les usages alimentaires et non alimentaires (Mokrane et *al.*, 2009, 2010 ; Hadbaoui et *al.*, 2010 ; Souilah et *al.*, 2014). Mais à notre connaissance il y a peu, voir pas, de travaux sur l'étude de la diversité morphologique et génétique du sorgho local à l'issue de la mise en place d'essais de cultures *ex-situ* dans une station expérimentale.

Contrairement à certaines espèces céréalières, le sorgho joue un rôle majeur dans les régions semi-arides du monde où la sécheresse, la chaleur et les mauvaises conditions du sol s'installent (House, 1985 ; Ayana et Bekele, 2000 ; Muui et *al.*, 2013, Rakshit et *al.*, 2014) ceci est dû à sa large adaptation (Ayana et Bekele, 2000) et par conséquent, il

est devenu comme modèle parfait pour identifier les gènes liés à la tolérance au stress (Matthews *et al.*, 1990 ; Sanchez *et al.*, 2002 ; Rao *et al.*, 2013).

Les accessions locales offrent une plus grande variabilité génétique et peuvent fournir des caractères utiles pour élargir la base génétique. Ainsi, la productivité peut être améliorée par l'utilisation du matériel génétique disponible localement (Muui *et al.*, 2013).

La diversité génétique peut être mesurée par le biais des marqueurs phénotypiques (Ayana et Bekele, 2001 ; Grenier *et al.*, 2004), biochimiques (Bouderies, 2010 ; Mokrane, 2010 ; Belhadi *et al.*, 2014 ; Souilah *et al.*, 2014 ;), physiologiques (Clerget, 2004 ; Ali *et al.*, 2011 ; Sanjana Reddy *et al.*, 2012) et moléculaires (Vittal *et al.*, 2010 ; Billot *et al.*, 2012 ; Rakshit *et al.*, 2012). La diversité phénotypique semble être très efficace pour discriminer les accessions. Dans ce sens, les paramètres comme la précocité (la floraison), la hauteur finale, l'exsertion pédonculaire, longueur et largeur paniculaire, ..., etc. représentent une source de diversité (Ayana et Bekele, 2001 ; Grenier *et al.*, 2004).

Les objectifs de notre travail de recherche étaient : (i) l'évaluation de la variabilité phénotypique de 36 accessions/populations de sorgho local et étranger via certains paramètres agro-morphologiques, puis (ii) établir les relations entre les paramètres étudiés. La finalité des travaux de cette thèse était la mise en évidence des propriétés phénotypiques spécifiques par l'évaluation de la diversité des accessions locales, cultivées dans les régions hyper-arides du Sahara de l'Algérie, en vue de lancer de futurs programmes de sélection et d'amélioration du sorgho local.

Un premier échantillonnage a été effectué pour la collection de 17 échantillons ; des échantillons locaux en provenance des localités (willayas) suivantes : In Salah, Ouargla, Illizi et Adrar et des accessions importées du Niger, France et USA. Autres accessions au nombre de 19 ont été collectés lors d'un deuxième échantillonnage après prospection et inventaire dans une région du Sahara de l'Algérie (le Tidikelt).

Ce manuscrit est composé de trois parties, la première concerne une revue bibliographique abrégée, une deuxième partie sur le matériel utilisé et les méthodes de travail suivies, la troisième partie est consacré à la présentation des résultats des deux essais réalisés et leurs discussions. Nous terminerons par une conclusion montrant les importants résultats de notre recherche et des perspectives.

# **Chapitre I**

## **Revue bibliographique**

## Chapitre I. Revue bibliographique

Le sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] est cultivé comme principale culture vivrière dans plusieurs pays d'Asie du Sud, d'Afrique et d'Amérique Centrale. La culture est principalement cultivée dans les régions tropicales et les zones subtropicales marginales et sujettes au stress. Il fait partie du groupe des plantes les plus anciennement cultivées dans le monde. Le sorgho a été introduit en Égypte à partir de l'Éthiopie environ 3000 ans avant JC dont l'Éthiopie est le berceau de la domestication du genre *Sorghum* (Doggett, 1965).

Le sorgho est cultivé dans plus de cent pays à travers le monde (Bantilan et *al.*, 2004). C'est la culture vivrière de base de millions de pauvres dans les tropiques semi-arides (SAT). Il est principalement cultivé comme culture de subsistance sur terre sèche, avec des ressources limitées, par les agriculteurs dans des conditions de gestion traditionnelles dans les régions SAT, qui se caractérisent par des précipitations inadéquates et imprévisibles, sécheresse et milieux fragiles. Cette espèce est génétiquement adaptée à la chaleur et les agro-écologies sèches où il est difficile de cultiver d'autres céréales vivrières (Wang et *al.*, 2015).

Le sorgho est cultivé principalement pour l'alimentation animale aux États-Unis, en Australie et dans le Sud Amérique, alors qu'il est principalement cultivé comme aliment en Afrique et en Inde (Reddy et Patil, 2015).

### I.1. Situation du sorgho dans le monde et en Algérie

Les principales zones de culture du sorgho se situent dans les régions chaudes, comme l'Afrique, l'Asie, l'Amérique du Nord et du Sud et l'Australie. Selon Chantereau et *al.* (2013) et durant vingt ans, les États-Unis (1<sup>ier</sup> producteur mondiale) et le Mexique (2<sup>ième</sup>) ont vu leur production a diminué de façon importante et leur rang habituel menacé par des pays comme le Nigeria, l'Éthiopie et l'Inde (Tableau 1). Les États-Unis avec 8,67 millions de tonnes en 2019 occupent toujours la première place, mais suivi actuellement

par le Nigeria et l’Ethiopie (pays originaire du sorgho) avec plus de 5 millions de tonnes. Au Etats Unis, la production annuelle a baissé de 15,16 millions de tonnes en 2015 jusqu’à 8,67 millions de tonnes en 2019 suite à l’élimination du prix de soutien pour le sorgho aux USA et progression des variétés de maïs plus adaptées aux zones sèches.

**Tableau 1.** Production annuelle du sorgho des principaux pays producteurs (statistiques agricoles FAOSTAT, 2021).

Pays	Production annuelle (millions de tonnes)				
	2015	2016	2017	2018	2019
USA	15,16	12,2	9,19	9,27	8,67
Nigeria	7,01	7,56	6,94	6,80	6,67
Ethiopie	4,77	4,75	5,17	5,02	5,27
Mexique	5,20	5,01	4,85	4,53	4,35
Soudan	2,74	6,47	4,25	5,44	3,71
Chine	2,75	1,95	2,47	2,91	3,60
Inde	5,45	4,24	4,57	4,80	3,48
Brésil	2,14	1,15	2,22	2,28	2,67
Niger	1,92	1,81	1,95	2,10	1,90
Burkina Faso	1,44	1,66	1,37	1,93	1,87
Argentine	3,10	3,03	2,53	1,56	1,60
Mali	1,53	1,39	1,42	1,47	1,51
Australie	2,21	1,79	0,99	1,26	1,16
Chad	0,84	0,99	0,95	0,99	0,97
Egypte	0,72	0,72	0,81	0,80	0,79
France	0,28	0,26	0,33	0,32	0,42
Italie	0,29	0,31	0,24	0,30	0,32
Kenya	0,19	0,12	0,14	0,19	0,29
Sénégal	0,189	0,127	0,215	0,295	0,27
Benin	0,13	0,13	0,14	0,32	0,20
Pakistan	0,16	0,15	0,15	0,15	0,12
Serbie	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
Maroc	0,005	0,002	0,004	0,003	0,003
Algérie	0,003	0,009	0,005	0,004	0,001

Le Maroc et l’Algérie occupent les dernières places en termes de production, avec moins de 5000 tonnes en 2019.

## I.2. Taxonomie

Le sorgho a été décrit pour la première fois par Linné en 1753 sous le nom de *Holcus*. En 1794, Moench a distingué le genre *Sorghum* du genre *Holcus* et a regroupé tous les sorghos sous le nom de *Sorghum bicolor* (House, 1987). De Wet (1978) a reconnu *Sorghum bicolor*, représentant toutes les annuelles cultivées, sorghos sauvages et adventices avec deux taxons rhizomateux, *Sorghum halepense* et *Sorghum propinquum*.

*Sorghum bicolor* a été subdivisé en trois sous-espèces : *Sorghum bicolor* subsp. *bicolor*, *Sorghum bicolor* subsp. *Drummondii* (Figure 1), et *Sorghum bicolor* subsp. *Verticilliflorum* (Figure 2).

Les travaux de Snowden (1955) ont dévoilé d'autres classifications du sorgho tout en prenant en considération la large diversité du sorgho dans le monde (Annexe 3). Dahlberg (2000) donne un excellent aperçu de la classification pour décrire la variation observée au sein des sorghos cultivés (Reddy et Patel, 2015).

Toutefois, la systématique actuelle s'inspire des bases de Moench qui fut le premier à définir le genre *Sorghum* et l'espèce *Sorghum bicolor* (L.) Moench. Harlan et De Wet (1972) ont proposé une classification simplifiée des sorghos cultivés (Dogget, 1988).

Règne	:	<i>Plantae</i>
Sous-règne	:	<i>Tracheobionta</i>
Division	:	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	:	<i>Liliopsida</i>
Sous-classe	:	<i>Commelinidae</i>
L'ordre	:	<i>Cyperales</i>
Famille	:	<i>Poaceae</i>
Sous-famille	:	<i>Panicoideae</i>
Tribu	:	<i>Andropogoneae</i>
Genre	:	<i>Sorghum</i>
Espèce	:	<i>S. bicolor</i>

Les sorghos cultivés sont classés comme *Sorghum bicolor* subsp. *bicolor* et sont représentés par des types agronomiques tels que le sorgho grain, le sorgho sucré, « Sudan grass » et « Broom corn » (Berenji et Dahlberg, 2004). De plus, il existe au moins deux sorghos adventices répandus dans les zones tempérées, à savoir « Johnson grass » et le sorgho spontané (Shattercane) (Figure 1).

Le sorgho cultivé (genre *Sorghum*, espèce *Sorghum bicolor*) est une plante monocotylédone annuelle appartenant à la famille des Poacées (anciennement dénommées Graminées) et à la tribu des Andropogonées (comprenant le maïs, le mil et la canne à

sucré). C'est une espèce diploïde à nombre chromosomique de base  $n = 10$  (Chantereau et *al.*, 2013). Le genre *Sorghum* est composé d'environ 25 espèces allant de plantes adventices tel que le sorgho d'Alep (*Sorghum halepense* L. Pers. ( $2n = 40$ ), appelé aussi « Johnson grass », qui est le produit entre le sorgho commun (*Sorghum bicolor* L. Moench ( $2n = 20$ )) et le *Sorghum propinquum* ( $2n = 20$ ). Le sorgho d'Alep a de grande capacité à se croiser avec le sorgho commun malgré la barrière de ploïdie (Paterson et *al.*, 2020). Johnson grass (*Sorghum halepense*), qui est un parent proche du sorgho cultivé, est connu comme l'une des pires mauvaises herbes au monde. Elle se reproduit par la production de graines et de rhizomes et est considérée comme une mauvaise herbe vivace majeure dans de nombreuses cultures dans le monde. Le contrôle de ce sorgho adventice est à la fois long et difficile (Dahlberg et *al.*, 2011). La race bicolor est complexe, hétérogène et se compose de plusieurs sous-races distinctes. Soudangrass et le sorgho à balais appartiennent à cette race (Harlan et De Wet, 1972).



**Figure 1.** *Sorghum bicolor* subsp. *Drummondii* (GBIF, 2021).

Le sorgho sauvage (*Sorghum bicolor* subsp. *verticilliflorum* (L.) Moench) est un progéniteur du sorgho cultivé (*Sorghum bicolor* ssp. *bicolor* (L.) Moench) (Doggett, 1988). L'espèce *Sorgho bicolor* subsp. *verticilliflorum* est parfaitement inter-fertiles avec le sorgho cultivé (De Wet et al., 1970 ; Doggett, 1991). Le dérivé hybride est connu sous le nom de shattercane (*Sorghum bicolor* ssp. *drummondii*).



**Figure 2.** *Sorghum bicolor* subsp. *Verticilliflorum* ou *Arundinaceum* (GBIF, 2021).

Le sorgho spontané (Figure 3), est un type de sorgho adventice, caractérisé par des panicules lâches, fait référence à la nature de la dispersion de cette adventice par éclatement des graines ainsi qu'à son origine la plus probable par croisement entre le *Sorghum bicolor* cultivé et l'adventice *Sorghum halepense* (Ayana et al., 2000).



**Figure 3** - Sorgho grain (a), Sorgho à balais (b), Sudangrass (c), sorgho sucré (d), sorgho spontané (Shattercane) et à balais dans un champs (e) (Dahlberg et *al.*, 2011).

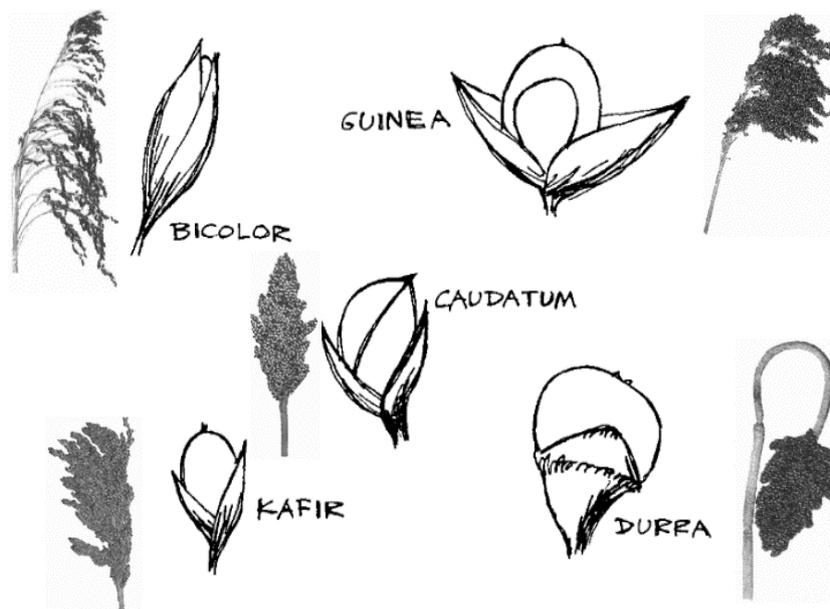
### I.3. Critères de sélection

Le matériel génétique des plantes cultivées peut contenir une grande variation génétique pour la résistance à la sécheresse. Les populations locales d'espèces cultivées sont plus susceptibles d'être résistantes à la sécheresse (Blum, 2011). Des informations sur les facteurs limitant (Stresses biotiques et abiotiques) et la productivité doivent être classées en fonction de leur importance dans la région cible et de la disponibilité des ressources. La sécheresse, la salinité et l'acidité, les ravageurs et les maladies fongiques, sont des facteurs limitant pour le rendement, selon la saison et l'emplacement (Reddy et *al.*, 2008). Le sorgho a un potentiel considérable pour s'adapter à des conditions environnementales variées et peut être sélectionné pour une large adaptabilité. Une fois que le matériel est sélectionné pour une large adaptabilité, une amélioration de rendement peut être obtenue grâce à la sélection pour l'adaptation régionale, puis pour l'adaptation spécifique dans la région (Reddy et *al.*, 2008).

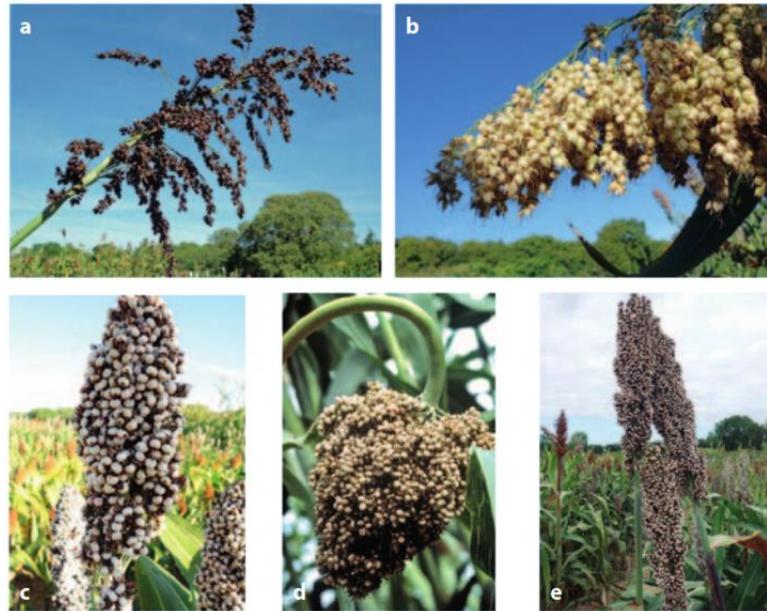
Un sélectionneur doit connaître le comportement du sorgho avant de lancer un programme de sélection, car les méthodes de sélection dépendent en grande partie des mécanismes de contrôle de la pollinisation. L'inflorescence du sorgho est appelée panicule avec des racèmes sur le rachis tertiaire avec un ou plusieurs épillets. Un épillet est toujours

sessile et l'autre pédicellé sauf l'épillet sessile terminal qui est accompagné de deux épillets pédicelles. Les épillets sessiles ont à la fois des parties mâles (androcée) et femelles (gynécées), et les pédicelles sont généralement de sexe masculin ou féminin. L'allogamie se produit dans une proportion de 5 à 20 % selon les conditions météorologiques et les génotypes. Cependant, il est généralement traité comme une espèce autogame dans la reproduction. Le croisement est provoqué par le vent. Les anthères mûrissent d'abord avant les stigmates et sortent de la glume, mais il existe des variations entre les races locales. L'anthèse (ouverture de la fleur) commence à partir des fleurs du sommet jusqu'à celles de la base de la panicule, généralement le matin après 08h (House, 1985).

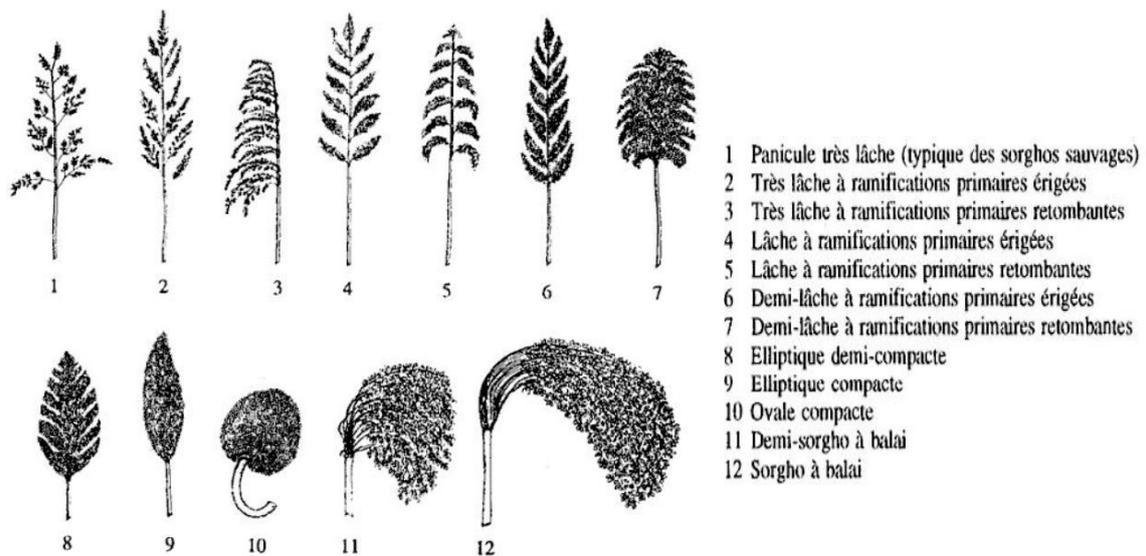
Selon Harlan et De Wet (1972), la classification du sorgho est basée sur la structure de l'épillet sans pédoncule (épillet sessile) et le type de l'inflorescence (Figures 4, 5 et 6). Ces auteurs distinguent cinq (05) races principales : Bicolor, Guinea, Caudatum, Durra et Kafir, ainsi que dix (10) races intermédiaires issues d'hybridations entre les principales races (Tableau 2).



**Figure 4.** Schéma sur la classification des sorghos selon le type d'épillet et la forme des panicules (Harlan et DeWet, 1972 ; Clerget, 2004).



**Figure 5.** Photos de panicules des cinq races du sorgho a : bicolor - b : guinea - c : caudatum - d : durra - e : kafir (Chantereau et *al.*, 2013).



**Figure 6.** Schéma représentant les formes de panicules (IBPGR/ICRISAT, 1993).

**Tableau 2.** Les principaux caractères identitaires des races du sorgho et leurs lieux de répartitions (Chantereau et *al.*, 2013, Harlan et De Wet, 1972).

Race	Glumes et Grains	Panicules	Lieu
<b>Bicolor</b>	Glumes longues et serrées recouvrant les $\frac{3}{4}$ ou la totalité du grain. Graines allongées. Poids de 1000 grains de 15 à 25g.	Panicules lâches (ouvertes).	Aux Etats Unis, les hybrides Sudangrass x Bicolor sont largement utilisés. Bicolor se trouve au Sudan, Ethiopie et Sud Afrique. Bicolor est considéré comme la plus étroitement liée aux sorghos sauvages de toutes les races cultivées.
<b>Guinea</b>	Glumes généralement longues (résistantes aux attaques d'insectes), ouvertes. Grains elliptiques, plus ou moins aplatis dorso-ventralement. De taille variable. Graines larges, moyennes ou petites. Généralement durs et cornés.	Panicules lâches, souvent longues à port retombant.	La race Guinée est bien répartie au Savannah du Sénégal au Tchad. Guinée-Caudatum ou Guinée-Kafir à l'est africain. Guinée-Kafir se trouve en Inde.
<b>Caudatum</b>	Glumes courtes adhérant au grain en le recouvrant partiellement. Grains dissymétriques, de taille moyenne à grosse.	Panicules compactes (zones sèches) à semi-compactes (zones à pluviosité élevée), ayant la forme d'un fuseau.	Kafir-Caudatum très utilisés aux Etats-Unis pour la production d'hybrides de bonnes qualités. Caudatum est la plus importante dans les programmes modernes de sélection.
<b>Durra</b>	Glumes courtes adhérant au grain en le recouvrant partiellement. Grains plus ou moins sphériques. De taille variable mais le plus souvent gros à très grosse.	Panicules compactes à semi-compactes souvent portées par un pédoncule crossé.	Durra est dominante en Ethiopie, Turquie, Nord-africain (le long du Sahara) et l'Inde. Durra-Caudatum en Nigeria, Tchad et Soudan. Aux Etats-Unis : Milo d'Afrique et Nandyl d'Inde. Durra et Caudatum ne se rejoignent pas, sauf dans des circonstances particulières.
<b>Kafir</b>	Glumes courtes adhérant au grain en le recouvrant partiellement. Grains elliptiques de taille moyenne, poids de 1000 grains de 20 à 35g.	Panicules compactes à semi-compactes, souvent de forme longue et cylindrique.	Kafir-Caudatum se trouve aux Etats-Unis Kafir est utilisé comme mâle stérile lors de la production d'hybrides. Kafir-Durra sont utilisés comme géniteurs.

#### I.4. Qualité fourragère

La disponibilité du fourrage dépend de la saisonnalité, ce qui peut poser des problèmes aux éleveurs qui maintiennent une productivité animale régulière tout au long de l'année. Par conséquent, la conservation du fourrage sous forme d'ensilage est devenue une nécessité car les pertes de la qualité nutritionnelle d'aliment après la récolte et pendant le stockage sont faibles (Fulgueira et *al.*, 2007). Six facteurs majeurs affectant la qualité du fourrage : maturité (date de récolte), espèces cultivées (différences entre graminées et légumineuses), techniques de récolte et de stockage, environnement (humidité, température et ensoleillement), fertilité du sol, variété ou cultivar. Les plantes adventices, les insectes nuisibles, les maladies des plantes et la présence de bactéries, de moisissures et/ou de

certaines de leurs métabolites (mycotoxines) peuvent affecter négativement la qualité du fourrage (Fulgueira et *al.*, 2007).

Le sorgho est une plante tropicale qui utilise efficacement l'eau et constitue une bonne alternative au maïs pour l'alimentation des ruminants, principalement dans les régions à faible précipitation (Getachew et *al.*, 2016). Par rapport aux plants de maïs, les plants de sorgho nécessitent moins de fertilisation et moins de lutte antiparasitaire et peuvent pousser dans des sols à faible pH avec une bonne aptitude à l'ensilage (Rodrigues et *al.*, 2020).

La biomasse produite à partir du sorgho peut être utilisée comme fourrage et ensilage pour nourrir les ruminants et comme matière première pour les biocarburants. L'efficacité de l'utilisation de la biomasse est fonction de la composition de la biomasse et de l'architecture de la plante (Paterson, 2013). La partie aérienne de la plante, appelée biomasse (composée essentiellement de la tige, des talles et des feuilles) représente la partie utilisée comme aliment pour les ruminants sous forme de fourrage vert (pâturage ou fauché et servi directement aux animaux), foin (plantes séchées) ou comme ensilage (plantes à l'état frais conservée en anaérobie).

Les agriculteurs utilisent les résidus de récolte pour alimenter leurs bétails, ceci affecte indirectement la productivité laitière et de la viande. La faiblesse de productivité incite les chercheurs à développer des cultivars à double usage tout en optimisant la qualité de l'alimentation, le sol et l'eau (Somegowda et *al.*, 2021). La qualité du fourrage fait référence à la qualité de la consommation du fourrage par les animaux et à l'efficacité avec laquelle les nutriments contenus dans le fourrage sont convertis en produits animaux (Fulgueira et *al.*, 2007).

Il existe des hybrides soudangrass et d'autres sorgho × soudangrass, qui possèdent des tiges minces, des feuilles plus étroites et plus de talles que le sorgho ordinaire. Ces hybrides sont très utiles pour le pâturage (Paterson, 2013).

L'ensilage de sorgho est en concurrence avec l'ensilage de maïs, qui a tendance à avoir une énergie nette de lactation par hectare plus élevée, tant que les approvisionnements en eau pendant la saison de croissance ne sont pas limités (Miron et *al.*, 2007 ; Paterson, 2013). L'ensilage est produit en hachant toute la partie aérienne de la plante (y compris le grain). Des micro-organismes naturels (parfois inoculés) anaérobique peuvent être utilisés pour la conversion des sucres solubles en acides organiques de faible poids moléculaire qui abaissent le pH tout en empêchant la pourriture. Pendant et après stockage, des portions de cet ensilage sont prélevées et distribuées aux animaux selon les besoins. L'ensilage a tendance à avoir une meilleure qualité nutritionnelle que le fourrage en raison de la présence d'amidon (Smith et Frederiksen, 2000).

Il est à souligner que la grande variation de la composition nutritive entre les différents cultivars commerciaux de sorgho peut conduire à la variation d'ensilage et la date de récolte peut altérer aussi la qualité (Miron et *al.*, 2006). Même si la biomasse est composée principalement de parois cellulaires végétales, la composition chimique exacte de la biomasse varie avec le génotype, l'âge auquel les plantes sont récoltées et l'environnement. Ces facteurs définissent la proportion relative de tissu de tige et de feuille et la proportion de tissu vasculaire par rapport au tissu non vasculaire. Malgré cette variation, la biomasse du sorgho est composée d'environ 40 % de cellulose, 20 à 25 % de polysaccharides hémicellulosiques, 20 % de lignine, 2,5 % d'acides hydroxycinnamiques, 3 à 5 % de pectine, 3-5 % de protéines, 5 à 8 % de minéraux et 5 % d'amidon (Rooney et *al.* 2007 ; Corredor et *al.*, 2008).

Les tests recommandés pour déterminer la qualité du fourrage sont : matière sèche, pH, protéine brute, protéine disponible, azote ammoniacal, ... etc. Les valeurs énergétiques peuvent être déduites. Cependant, des études récentes proposent d'intégrer l'analyse de paramètres microbiologiques tels que le nombre de propagules fongiques, la présence d'*Aspergillus fumigatus* et de mycotoxines (aflatoxines et déoxynivalénol) comme paramètres déterminants de l'acceptabilité fourragère. (Fulgueira et *al.*, 2007).

## **I.5. Morphologie**

La plante du sorgho a un port dressé et elle ressemble beaucoup au Maïs (Figure 7-b, c).

### **I.5.1. Racine**

Le système racinaire du sorgho est développé avec de nombreux poils radiculaires (presque deux fois plus que le maïs). Au moment de la germination apparaît la racine primaire ou embryonnaire, plusieurs racines de ce type se développent, elles sont peu ou pas du tout ramifiées. Les racines secondaires se forment à partir du premier nœud ; ce sont des racines qui en se développant constituent le système racinaire abondant de la plante (Figure 7-e). Par la suite, les racines primaires meurent et des racines adventives peuvent apparaître plus tard sur les nœuds inférieurs et peuvent être nombreuses si la plante n'est pas en bonnes conditions. Les sorghos cultivés sont rhizomateux ou très faiblement rhizomateux ; ils sont annuels ou (faiblement) pérennes et le système racinaire de ces derniers persiste bien pour permettre le développement des rejetons à partir des bourgeons adventifs situés à la base de la tige-mère. On ne trouve de rhizomes bien développés que dans la sous-espèce *Halepense* (Sorgho d'Alep) (House, 1987).

### **I.5.2. Tige**

Le chaume ou la tige est constitué de séries de nœuds alternant avec des entre-nœuds. La tige est glabre et robuste, mesurant de 0,5 cm à 5 cm de diamètre près de la base, s'amincissant vers l'extrémité terminale et ayant une longueur de 0,5 m à 4 m. Les faisceaux vasculaires sont repartis dans la tige, mais ils se sont plus concentrés dans la région périphérale où ils sont si rapprochés les uns des autres et forment presque un anneau continu ; les faisceaux du centre se ramifient dans les nervures médianes des feuilles, alors que ceux de la périphérie se ramifient pour former les plus petites veines dans le limbe foliaire (Figure 7-c, d). Le nœud se présente comme un anneau à la base de la gaine foliaire : c'est le point où la feuille s'attache à la tige (également le point où les racines adventives se développent), un bourgeon se forme à chaque nœud, excepté au nœud correspondant à la feuille paniculaire ; de ces bourgeons, aux nœuds successifs, se trouvent en alternance d'un côté ou l'autre de la tige, ces bourgeons se développent par fois en talles axillaires. Les talles de la base quand elles existent, se forment au premier nœud (House, 1987).

### **I.5.3. Feuille**

Les feuilles sont distribuées de façon variable le long de la tige, elles sont concentrées près de la base dans certains types. La longueur des feuilles peut atteindre 1 m et plus, pour 10 à 15 cm de largeur, leurs nombres varient grandement suivant les plantes. Chez les plants bien adaptés, il y a ordinairement 14 à 17 feuilles, ce nombre pouvant atteindre 30 chez les plants moins adaptés. Les feuilles naissent le long de la tige en alternance sur deux lignes et se composent d'une gaine et d'un limbe (Figure 7-a). La nervure médiane est saillante, verdâtre ou blanchâtre, aplatie ou légèrement concave sur la face supérieure et convexe sur la face inférieure. Il existe une courte ligule membraneuse (1 à 3 mm) à la jonction du limbe avec la gaine (Chantereau, 1994).

#### **I.5.4. Panicule**

L'inflorescence est une panicule qui peut être courte et compacte ou bien lâche et ouverte (Figures 5, 6) : de 4 à 25 cm ou plus de long sur 2 à 20 cm ou plus de large (Figure 7-b, c, d). L'axe central de la panicule ou rachis peut se trouver complètement masqué par la densité des branches secondaires et tertiaires de la panicule ou être complètement exposé. Le rachis est très variable morphologiquement : de long et mince à trapu et robuste. Un certain nombre de branches secondaires prend naissance à chaque nœud. Chacune peut varier en longueur, étant trapue ou grêle, rigide ou souple, velue ou quasi glabre, ramifiée près de sa base (branches tertiaires) ou non jusqu'au voisinage du sommet (House, 1987).

La panicule est portée sur un pédoncule qui est l'entre-nœud terminal. Il est généralement droit sauf chez de nombreuses variétés de la race Durra où il est croisé. Suivant la longueur du pédoncule et sa capacité à dégager la panicule de la dernière feuille, le caractère discrimine les variétés à bonne exsertion paniculaire de celle à médiocre voire mauvaise exsertion.

#### **I.5.5. Graine**

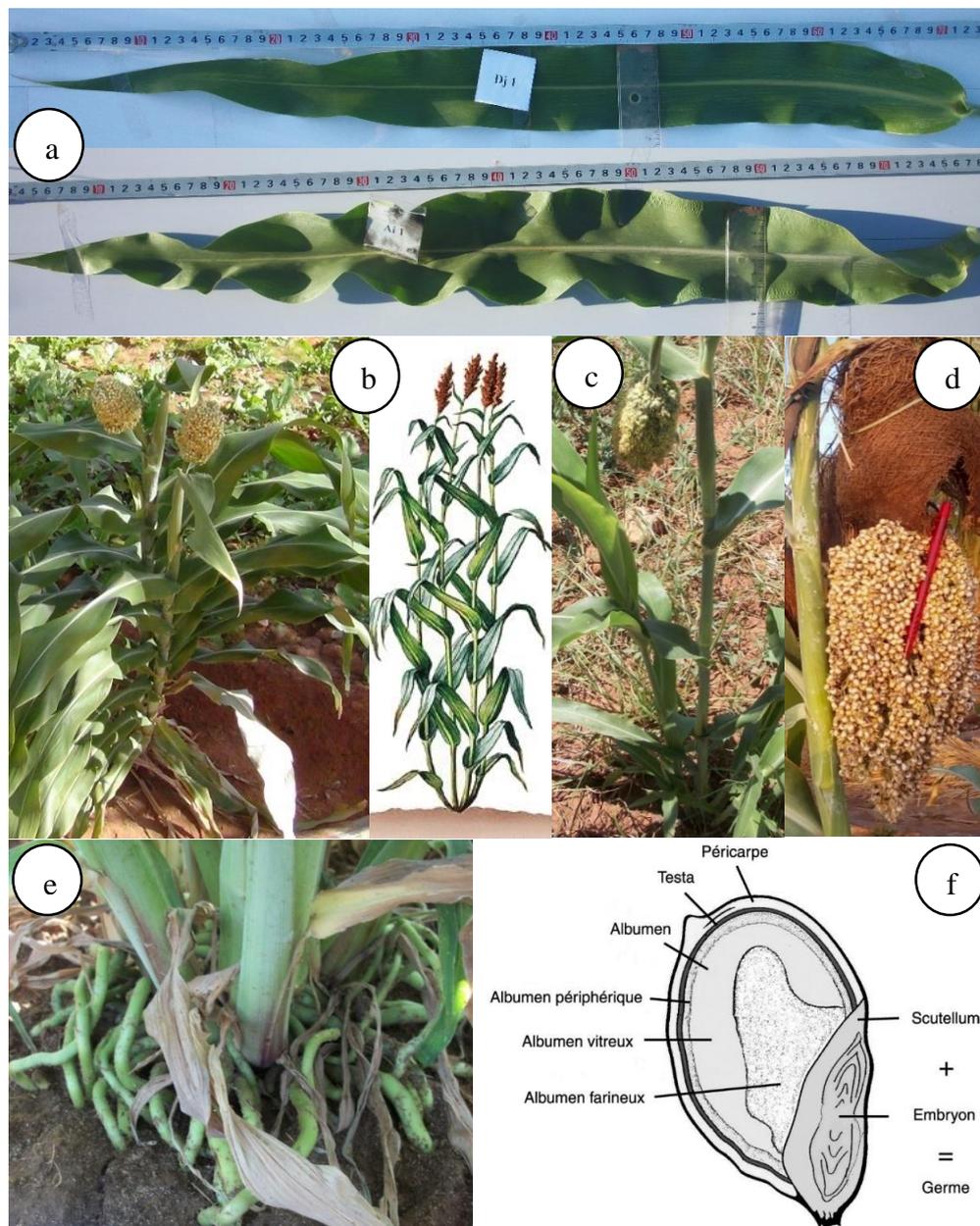
Selon House (1987), les caractéristiques morphologiques du grain à maturité complète sont les suivantes : - longueur = 3,5 à 5 mm

- largeur = 2,5 à 4,5 mm

- poids de 1000 grains = 60 à 85 grammes

La graine du sorgho est un caryopse ou fruit sec à un seul germe ; elle est composée de trois parties principales : l'enveloppe, l'albumen et le germe. Le péricarpe constitue l'enveloppe externe de la graine (Figure 7-f). Entre le péricarpe et l'endosperme peut se trouver une couche hautement pigmentée, de couleur rouge foncée ou brune foncée appelée testa, sa présence ou son absence constitue une caractéristique variétale ; il est riche en

composés tanniques. L'albumen du sorgho présente à l'extérieur une couche périphérique de cellules riches en vitamines, protéines et huile : C'est la couche d'aleurone. Sous cette première assise cellulaire se trouve l'albumen corné, vitreux, caractérisé par l'existence de granules d'amidon. Vient ensuite l'albumen interne, farineux où les granules d'amidon sont insérés dans une matrice protéique peu importante avec de nombreuses lacunes (Chantereau, 1994).



**Figure 7.** Photos des parties de la plante du sorgho : a. Feuille, b. Plante entière, c. Tige robuste, d. Panicule, e. racine robuste f. Graine avec légende (Chantereau et *al.*, 2013).

### I.6. Stades phénologiques

Nous pouvons subdiviser le cycle végétatif du sorgho en 10 stades selon Reddy et Patil (2015) :

- La levée : dont le coléoptile est visible à la surface du sol (la première feuille est vue avec une pointe arrondie).

- Stade trois feuilles : l'apparition de la troisième feuille (environ 6 jours).
- Stade cinq feuilles : l'apparition de la cinquième feuille (~ 10 jours).
- Initiation de la panicule : environ neuf feuilles selon les cultivars (~ 16 jours).
- Feuille étendard : pointe de la feuille étendard visible dans le verticille (~ 18 jours).
- Apparition paniculaire : le gonflement de la gaine de la feuille étendard (~ 10 jours).
- 50 % de floraison : 50 % de pollinisation (~ 8 jours).
- Stade laiteux : presser la graine entre les doigts donne peu ou pas de lait (~ 12 jours).
- Stade pâteux : les graines ne peuvent pas être compressées entre les doigts (~ 16 jours).
- Maturité physiologique : une tache noire à la base de la graine (environ 10 jours).

Les stades phénologiques peuvent varier en fonction des cultivars, de la date de plantation, du génotype et de l'emplacement (Reddy et Patil, 2015).

House (1987) et Chanterreau et *al.* (2013) subdivisent le cycle végétatif du sorgho en quatre phases :

- Phase végétative : allant de la germination, passant par le tallage pour atteindre l'initiation de la panicule. Dans cette période, les plantes restent en phase végétative environ 30 à 40 jours, durant lesquels toutes les feuilles sont formées, puis la croissance se fait par élongation cellulaire (Doggett, 1988). Quant au

tallage, la plante du sorgho n'a généralement qu'une seule tige, mais certains sorghos tallent abondamment en particulier le Sudangrass et les sorghos fourragers. L'aptitude au tallage dépend aussi de la variété que des conditions du milieu en occurrence de la densité de la population, de l'apport d'azote, de la température et de la photopériode (Doggett, 1988). Chantereau (1994) signale un faible tallage chez les sorghos tropicaux de type *Guinea*.

- la phase reproductive : allant de l'initiation paniculaire à la floraison. La formation de la fleur peut demander 19 à 70 jours ou plus, étant donné que toutes les panicules d'un champ ne fleurissent pas simultanément, le pollen est en général disponible durant une période de 10 à 15 jours (House, 1987).
- la phase de remplissage et de maturation des graines : allant de la floraison à la maturité. L'ovule au début de son développement à l'aspect d'une sphère vert-clair à presque crème : après dix jours, il prend un volume et passe au vert foncé physiologique. Il faut environ 30 jours aux graines pour atteindre leur poids sec maximum (maturité physiologique). Les graines commencent à passer du vert à la couleur qu'elles auront à maturité. Les graines contiennent environ 30% d'humidité à leur maturité physiologique ; elles sèchent jusqu'à 10-15% d'humidité durant les 20 à 25 jours qui suivent. Durant cette période, elles perdent jusqu'à 10% de leur poids sec. Les feuilles plus basses commencent à mourir et à sécher durant cette période. Au moment où le grain commence à sécher, quatre ou cinq feuilles les plus basses peuvent sécher et tomber du plant (House, 1987).

### **I.7. Exigences de la culture**

Le sorgho s'adapte à de nombreux milieux. Toutefois, sa culture réussit le mieux sur les sols limoneux et limono-sableux. Le pH du sol supporté est de 5 à 8,5 et il tolère davantage la salinité que le maïs (House, 1987).

Le sorgho exige moins d'eau pour sa croissance que les autres céréales. Des études ont montré que le sorgho a besoin de 332 kg d'eau pour produire 1 kg de matière sèche (MS) (Louise et *al.*, 2007).

Le développement floral et la formation des graines se déroulent normalement à des températures de 30 à 43°C, avec une humidité relative de 15 à 30%, si la plante dispose d'eau dans le sol (Louise et *al.*, 2007).

Le sorgho peut être cultivé du niveau de la mer jusqu'à 1100 à 1300 m (Chantereau, 1994).

### **I.8. Utilisations du sorgho**

Le sorgho a trois usages distincts (FAO, 1991) :

- L'alimentation humaine : les principales régions productrices sont localisées en Afrique et en Asie où la consommation de cette céréale peut atteindre 70%. Les grains du sorgho contiennent 8 - 15% de protéine, 5 - 15% de sucre et 32 - 57% d'amidon. Il est relativement riche en micronutriments tel que le fer, le zinc, le phosphore, le calcium, le potassium, le manganèse, le sodium et le magnésium (Shegro et *al.*, 2012).
- L'alimentation animale : en Amérique du Nord, en Amérique Centrale, en Amérique du Sud et en Océanie, la plus grande partie de la production sert à l'alimentation animale. Le sorgho a un grand potentiel comme ressource fourragère en raison de sa croissance rapide, de son rendement élevé en fourrage vert et de sa bonne qualité, il sert comme une source principale de fourrage, surtout pendant les saisons sèches (Reddy et Patil, 2015). Au sud algérien, les oasisiens utilisent beaucoup le sorgho pour alimenter leurs cheptels ovins surtout (Figure 8).



**Figure 8.** Photos montrant les bottes fraîches et sèches du sorgho local à In Salah.

Chez les oasiens, le sorgho local est utilisé à la fois comme grain pour l'alimentation humaine et les résidus de récolte comme foin pour nourrir leurs animaux.

- L'industrie : la culture a également une vocation industrielle orientée vers la production de la pâte à papier, la production du fuel, ... etc. Les plantes vertes et les résidus de récolte du sorgho fournissent des matériaux de construction et du combustible pour la cuisine, en particulier dans les zones arides (Chandel et Paroda, 2000). Des adhésifs et liants peuvent être extraites du grain de sorgho, le raffinage du minerai, ... etc (Reddy et *al.*, 2006).

# **Chapitre II**

## **Matériel et méthodes**

## Chapitre II. Matériel et méthodes

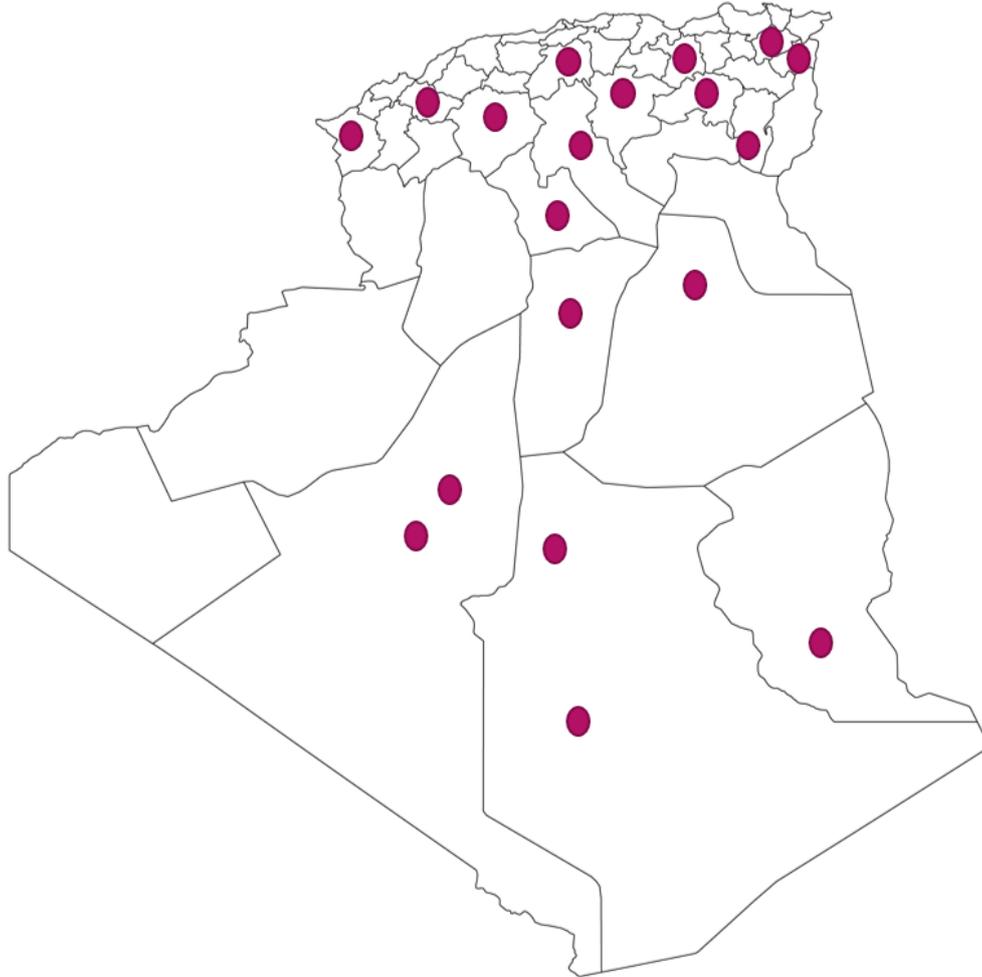
L'ensemble des populations et des variétés du sorgho ont été installés dans deux essais séparés à la station expérimentale de l'ENSA dont :

- Un premier essai (Essai n°1) de 17 variétés et populations, a été réalisé en 2013 puis répété en 2014, après un premier échantillonnage.
- Un deuxième essai (Essai n°2) de 20 populations et variété a été installé en 2014, après un deuxième échantillonnage.

### II.1. Matériel végétal

#### II.1.1. Premier échantillonnage

Le matériel végétal local utilisé a été collecté d'une partie, suite à des prospections sur terrain dans les wilayas suivantes : Adrar, Illizi, Ouargla et Ghardaïa (Figure 9) et l'autre partie a été fournie par le Laboratoire d'Etudes et de Développement des Techniques d'Épuration et de Traitement des Eaux et Gestion Environnementale (LEDTEGE). Les variétés étrangères ont été demandées auprès de plusieurs organismes internationaux (Institut National de la recherche agronomique du Niger - INRAN et sociétés de production de semences française - CAUSSADE) ; d'autres variétés introduites ont été procurées des grenetiers comme semence commerciale (Tableau 3).



**Figure 9.** Localisation géographique des sites de collecte des populations et variétés du sorgho étudié.

**Tableau 3.** Code, noms communs et sites d'échantillonnages de 17 populations et variétés du sorgho (essai n°1).

N°	Code	Nom commun	Site d'échantillonnage
<b>Populations locales</b>			
01	Ai1	<i>Tafsout mkhelta</i>	W. In Salah, Tidikelt, El Maleh/Pop
02	Ou1	<i>Tafsout beida</i>	W. Ouargla/Pop
03	Ou2	<i>Tafsout Kahla</i>	W. Illizi/Pop
04	Ad1	<i>Tafsout beida</i>	W. Adrar/Pop
05	Ai4	<i>Tafsout hamra</i>	W. In Salah, Tidikelt, In salah/Pop
06	Ai5	<i>Tafsout beida</i>	W. In Salah, Tidikelt, Tarankoukou/Pop
07	Ai6	<i>Tafsout beida</i>	W. In Salah, Tidikelt, Foggaret Ezzoua/Pop
<b>Variétés étrangères</b>			
08	Dj1	<i>EV Texas</i>	USA - <i>Texas</i> / Hybride commercial
09	Dj2	<i>Sweet Texas</i>	USA - <i>Texas</i> / Hybride commercial
10	Me1	<i>Drip-o-honey</i>	USA - <i>Texas</i> / Hybride commercial
11	Fr1	<i>Lussi</i>	French - CAUSSADE / Hybride témoin
12	Fr2	<i>Super sille 20</i>	French - CAUSSADE / Hybride commercial
13	Nig1	<i>Mota Maradi</i>	Niger - INRAN / Variété fixe
14	Nig2	<i>IRAT 204</i>	Niger - IRAT / Variété fixe
15	Nig3	<i>90 SN 7</i>	Niger - INRAN / Variété fixe
16	Nig4	<i>SSD 35</i>	Niger - INRAN / Variété fixe
17	Nig5	<i>Sepon 82</i>	Niger - ICRISAT / Variété fixe

### II.1.2. Deuxième échantillonnage

Lors d'un deuxième échantillonnage effectué en 2014 dans le Tidikelt (Région du Sahara de l'Algérie), 19 populations ont été collectées. Un hybride (Fr1) a été utilisé comme témoin (Tableau 4).

**Tableau 4.** Code, noms communs et sites d'échantillonnages de 20 populations et variété du sorgho (Essai n°2).

N°	Code génotype	Nom commun	Site d'échantillonnage
01	Ai8	<i>Tafsout beid</i>	115 ha - SalahTouil/Pop
02	Ai9	<i>Tafsout beid</i>	ElMaleh - Elham.Plur/Pop
03	Ai10	<i>Tafsout beid</i>	ElMaleh - Elham.Khort/Pop
04	Ai12	<i>Tafsout beid</i>	115 ha - Salah20/Pop
05	Ai13	<i>Tafsout hamr</i>	115 ha - Salah21/Pop
06	Ai14	<i>Tafsout hamr</i>	ElMaleh - DaiesTouil/Pop
07	Ai16	<i>Tafsout hamr</i>	ElMaleh - DaiesHab/Pop
08	Ai18	<i>Tafsout hamr</i>	ElMaleh - 17BTouil/Pop
09	Ai19	<i>Tafsout beid</i>	ElMaleh - Elham.Touil/Pop
10	Ai24	<i>Tafsout beid</i>	FogEzz-Bakad2II/Pop
11	Ai29	<i>Tafsout beid</i>	FogEzz- BakadIII6/Pop
12	Ai30	<i>Tafsout beid</i>	FogEzz-BakadIV2/Pop
13	Ai33	<i>Tafsout mouch</i>	ElMaleh-DaiesHab/Pop
14	Ai34	<i>Tafsout beid</i>	ElBarka-DahriHab/Pop
15	Ai35	<i>Tafsout beid</i>	ElBarka-DahriTouil/Pop
16	Ai36	<i>Tafsout hamr</i>	ElBarka-HamraniTouil/Pop
17	Ai39	<i>Tafsout hamr</i>	ElBarka-HamraniHab/Pop
18	Ai40	<i>Tafsout beid</i>	ElBarka-HamraniHab/Pop
19	Ai42	<i>Tafsout beid</i>	FogEzz-BakadTouil/Pop
20	Fr1	<i>Lussi</i>	French - CAUSSADE / hybride commercial

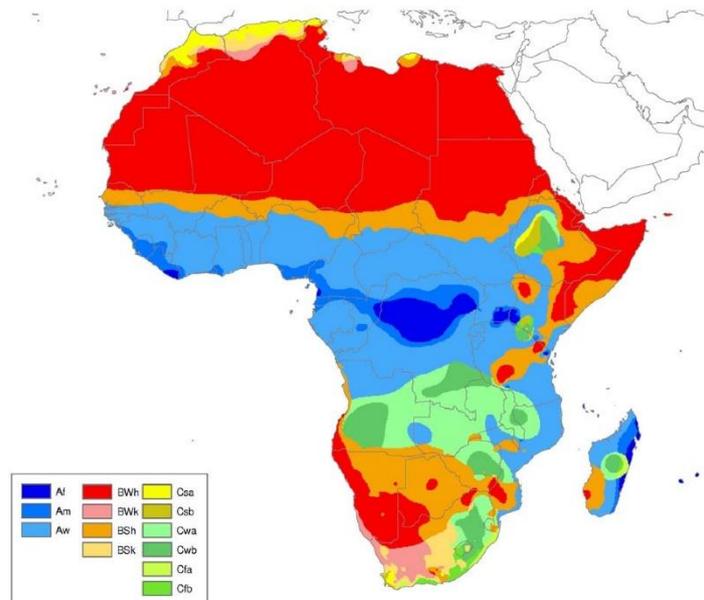
### II.2. Sites expérimentaux

Deux principaux essais ont été installés au niveau de la station expérimentale de l'ENSA dont l'étude porte sur l'analyse du comportement en plein champs du sorgho introduit et local. Ces essais ont été conduits en irrigué (apport d'eau selon le besoin) sur le site expérimental (**Essai 1** : 36° 43' 10.59" N et 3° 09' 1.58" E, altitude : 39m ; **Essai 2** : 36° 43' 9.89" N et 3° 9' 1.52" E, altitude : 41m) de la station expérimentale de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA El Harrach, Alger, Algérie).

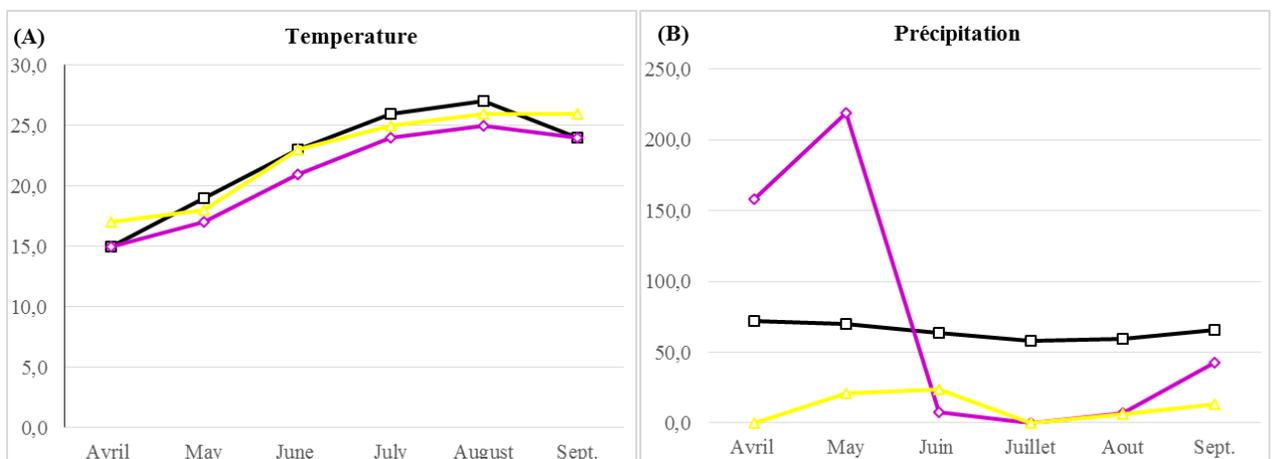
Pour l'essai n°1, l'expérimentation a été installée le 14 avril 2013 puis répétée le 17 avril 2014. Pour l'essai n°2, l'expérimentation a été mise en place le 17 avril 2014.

Le climat de la région est de type sub-humide méditerranéen avec un été chaud (Csa) selon la classification de Köppen-Geiger (Figure 10 et 11). Le sol est caractérisé par

une texture limono-argileuse a une fertilité moyenne avec un taux moyen de matière organique (3,15 %), un faible taux en potassium (206,7 ppm), un faible taux d'azote (0,019 %), un faible taux de phosphore (59,19 ppm) avec un pH de 7,59 (Les analyses du sol ont été effectuées au département de pédologie de l'ENSA El Harrach).



**Figure 10.** Carte du type climatique Koppen-Geiger de l'Afrique (Peel et al., 2007).



**Figure 11.** Température moyenne (A) et précipitation (pluviosité) (B) pour la région d'El Harrach - Alger durant 6 mois d'expérience, 2013 (—△—), 2014 (—◇—), moyenne 30 ans (—□—) (Raspisaniye Pogodi Ltd, 2017).

### **II.3. Conduite des essais**

#### **II.3.1. Au laboratoire (Test de germination)**

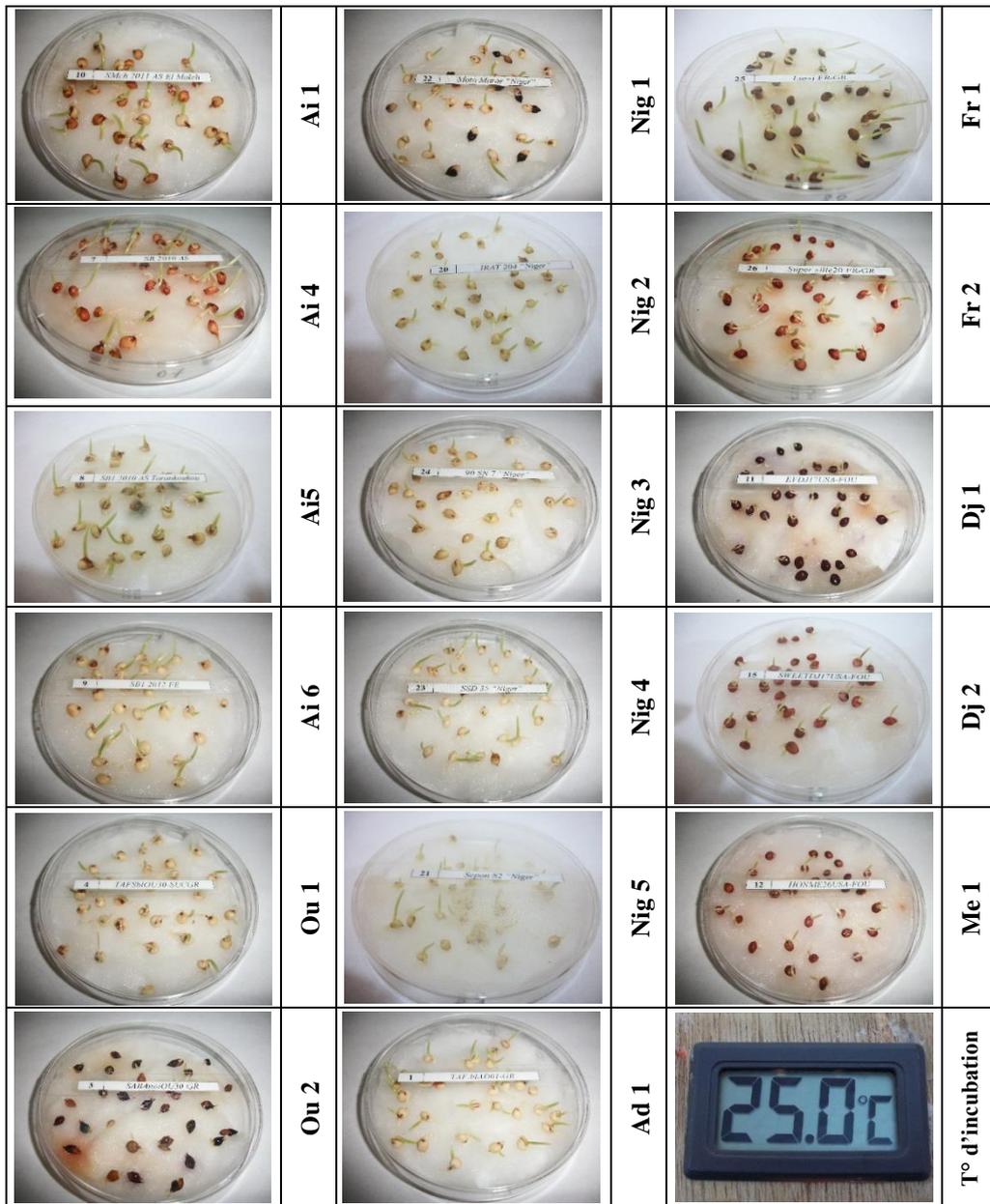
Le test de germination a été effectué avant le semis pour éviter les problèmes liés à la germination sur terrain et par conséquent éliminer les échantillons montrant une faiblesse du pouvoir germinatif (Figure 12). Nous avons mis dans des boîtes pétris 30 graines puis incubées dans une étuve à 25°C jusqu'à atteindre la germination complète. Une énergie germinative est estimée à 1/3 du nombre de jours consacré à la germination.

#### **II.3.2. Mise en place des essais sur terrain**

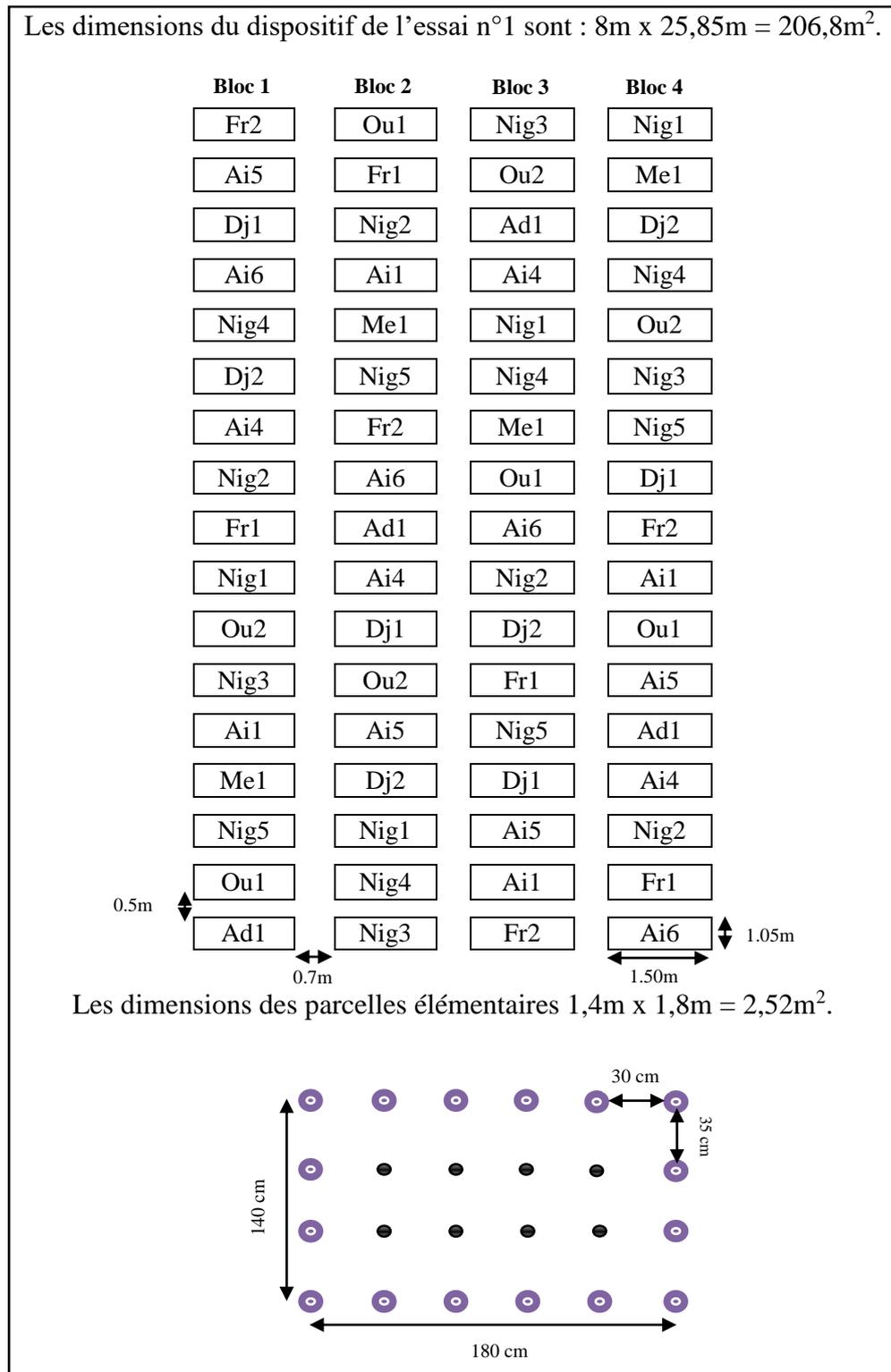
Les essais ont été mis en place durant l'été depuis le mois d'Avril jusqu'au mois de Septembre dont le précédent cultural était le blé pour la première année (2013) et la jachère travaillée en 2014 (Essai n°1 et essai n°2).

Le dispositif expérimental adopté est celui du bloc aléatoire complet avec 4 répétitions (Figure 13, 14 et 15). L'essai n°1 mesure 25,85m de longueur et 8m de largeur, soit une surface totale de 206,8m<sup>2</sup> avec un espacement de 0,5m entre les micro-parcelles et 0,7m entre les blocs. L'essai n°2 mesure 30,5m de longueur et 9m de largeur, soit une surface totale de 274,5m<sup>2</sup> avec un espacement de 0,5m entre les micro-parcelles et 1m entre les blocs.

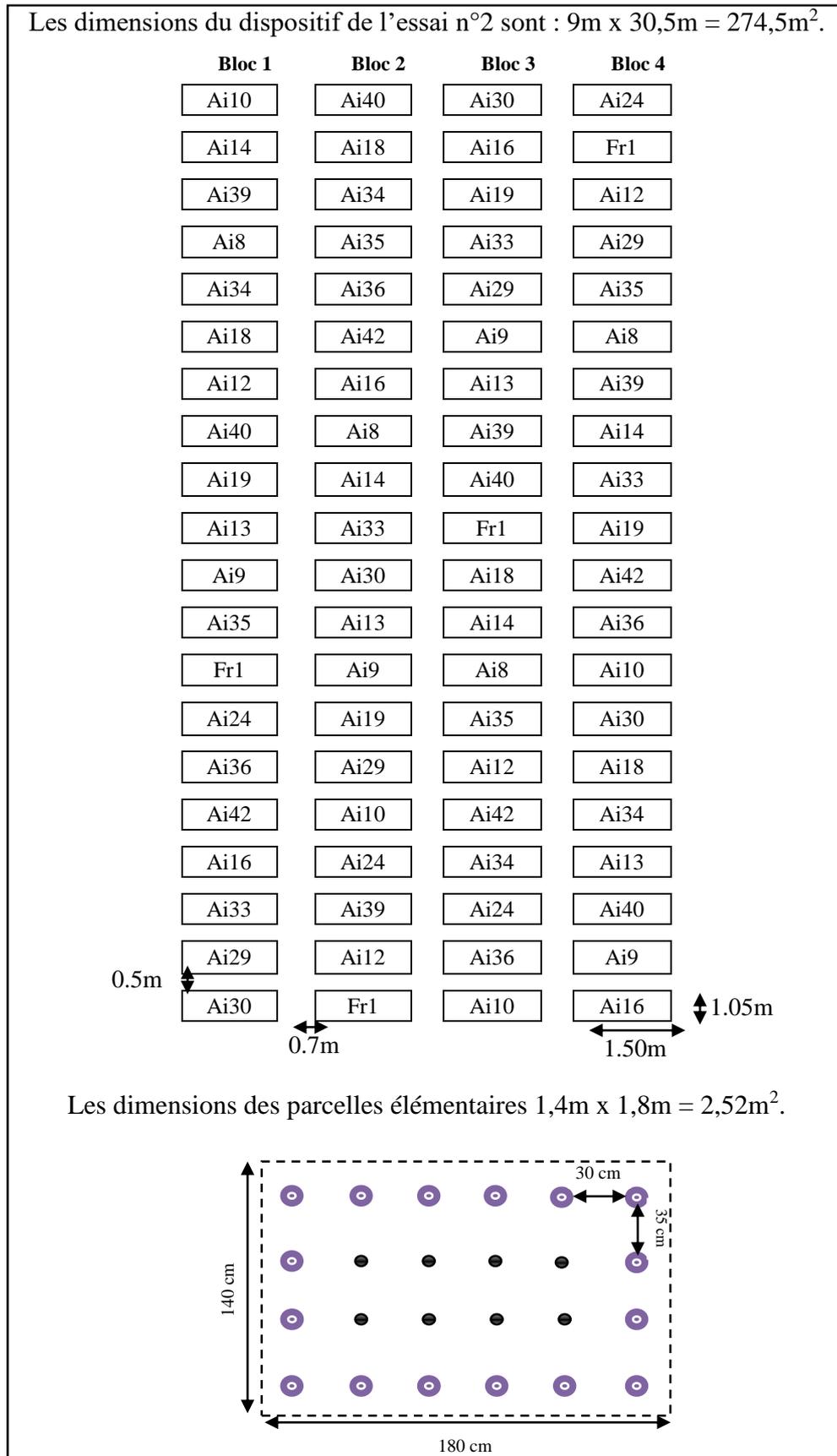
La superficie de la parcelle élémentaire pour les deux essais mesurait 2,52 m<sup>2</sup> (1,8m x 1,4m), l'espacement des rangs et des plants est de 35 et 30 cm respectivement. L'espacement entre les plantes a été adopté pour utiliser 8 plantes par micro-parcelles entourées de 16 plantes pour éliminer l'effet de bordure. Le sol est labouré à une profondeur de 30 cm à l'aide d'une charrue à socs. La transplantation est effectuée après une préparation superficielle du sol à la main et à l'aide des râtaux.



**Figure 12.** Photos du test de germination des graines des échantillons de l'essai n°1, 48 heures après incubation.



**Figure 13.** Dispositif expérimental pour l'essai n°1 avec les dimensions des parcelles élémentaires (2013 et 2014).



**Figure 14.** Dispositif expérimental pour l'essai n°2 avec les dimensions des parcelles élémentaires (2014).



**Figure 15.** Dispositif expérimental pour l'essai n°1 (2013 à gauche) et les deux essais n°1 et n°2 (2014 à droite).

### II.3.3. Entretien des essais

Les essais ont été délimités par la ficelle à l'aide des roseaux. Ils ont été fertilisés par 400 kg/ha d'NPK (15-15-15) comme fumure de fond, et 150 kg/ha d'urée (46-0-0) supplémentaire divisée et apportée en deux prises. Un fongicide et un insecticide ont été appliqués selon le besoin. Un système d'irrigation goutte à goutte est installé à raison de 4 gaines de goutteurs par bloc.

Le semis, pour les deux essais, est effectué au mois d'avril sur des alvéoles sous serre (Figure 16) puis la transplantation à la main après une dizaine de jours (Figure 17). La densité de plantation est de 9,52 plants/m<sup>2</sup>.

Deux sarclages ont été effectués pour combattre un réservoir important de plantes adventices dans le sol. La figure 18 nous montre l'évolution de la végétation des deux années de l'essai n°1. La figure 19 nous montre de la végétation de l'essai n°2.

Malgré les mesures de protection prises contre les ravageurs, quelques animaux comme les rats et les oiseaux ont pu détériorer une partie importante du rendement en grains malheureusement. Toutefois, le rendement en grain n'a pas été atteint pour la majorité des populations.



**Figure 16.** Semis des graines sur alvéoles sous serre.



**Figure 17.** Transplantation essai n°1 (2013).



**Figure 18.** Evolution de la végétation au cours des deux années de l'essai n°1.



**Figure 19.** Evolution de la végétation des plantes de l'essai n°2.

## II.4. Collecte des données, mesures et notations

Dans chaque microparcelle et pour chaque échantillon, 8 individus ont été suivis et utilisés pour les mesures des paramètres agro-morphologiques selon le descripteur du sorgho (IBPGR/ ICRISAT, 1993). Exception faite pour l'apparition paniculaire et la floraison, ces deux derniers paramètres ont été enregistrés sur la base de la parcelle élémentaire.

### II.4.1. Collecte des données de l'essai n°1

Les mesures ont porté sur 18 paramètres agro-morphologiques dont 13 sont liés à la croissance végétative et 05 paramètres sont liés à la floraison.

Les treize paramètres liés à la croissance sont :

- Longueur feuille (*LongF*, cm) : est mesurée à l'aide d'une règle depuis la ligule, qui est le point d'insertion de la feuille avec la tige, jusqu'à l'extrémité pointue de cette feuille.

Remarque : La feuille utilisée est la deuxième feuille en dessous de la feuille étendard.

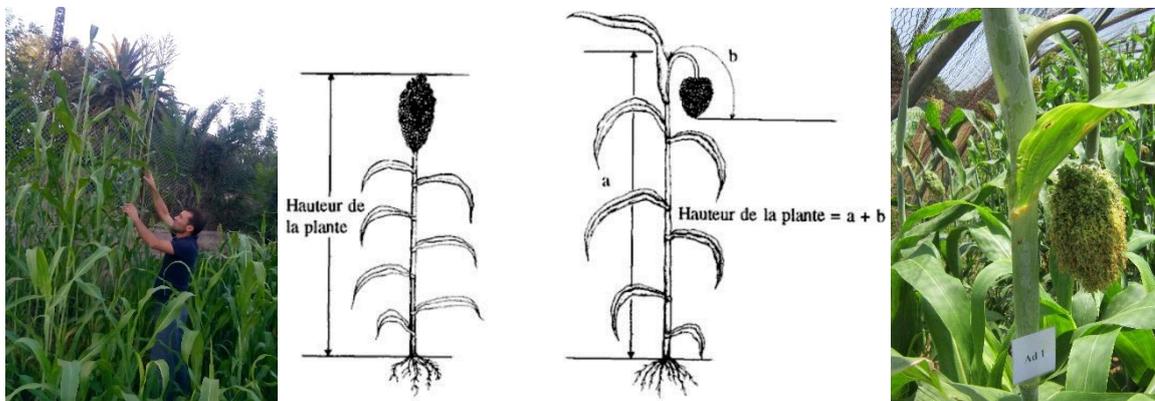
- Largeur feuille (*LargF*, cm) : est mesurée à l'aide d'une règle à la zone la plus large de la feuille.
- Surface foliaire (*SurfF*, cm<sup>2</sup>) : est estimée selon Stickler et *al.* (1961) suivant la formule :  $SF (cm^2) = 0,747(L \times I)$ , dont **L**= longueur feuille et **I**= largeur feuille.
- Poids frais feuille (*PFF*, g) : chaque feuille, avant d'être pesée par une balance de précision, elle a été mise dans un sac en plastique hermétiquement fermé pour le but de garder leur poids exact. La pesée du poids frais a été effectuée avant d'ouvrir les sacs en plastique tout en prenant en considération le petit poids du sac.
- Poids sec feuille (*PSF*, g) : les feuilles ont été mises à l'étuve réglée préalablement à 70°C pendant environ 72 heures jusqu'à la stabilité du poids et enfin les pesées (Figure 20).

- Matière sèche feuille (*MSF*, %) : est estimée par la formule  $MS\% = (PSF \times 100) / PFF$ , dont **PSF** = poids sec feuille et **PFF** = poids frais feuille.



**Figure 20.** Pesée du poids secs des feuilles (2013).

- Hauteur finale de la plante (*HautFin*, cm) : est mesurée en fin de cycle à l'aide d'une règle graduée depuis le collet de chaque plante jusqu'à l'extrémité supérieure de la plante (Figure 21), tout en prenant l'inflorescence principale en considération (IBPGR/ICRISAT, 1993 ; Rooney *et al.*, 2013).



**Figure 21.** Mesure de la hauteur finale des plantes (IBPGR/ICRISAT, 1993).

- Vitesse de croissance (*VitCr*, %) : est estimée par la comparaison entre deux mesures de la hauteur de la plante au stade montaison (comparaison de la hauteur entre 50 et 57 jours après semis, puis divisé sur le nombre de jours pour avoir la croissance en longueur dans une journée).

- Nombre de feuille ( $NbF$ ) : c'est le comptage du nombre de feuilles de la tige principale y compris les feuilles sénescentes.
- Nombre de talles ( $NbT$ ) : c'est le comptage du nombre de talles y compris la talle principale.
- Diamètre de la tige ( $DiamT$ , mm) : est mesurée à l'aide du pied à coulisse électronique, entre les deux premiers nœuds de la tige principale.
- $SPAD$  (Taux de chlorophylle) : L'appareil Soil-Plant-Analysis-Development meter ( $SPAD$ ) est utilisé pour estimer le taux de la chlorophylle chez les feuilles sans détruire les plantes, 60 jours après le semis durant le stade montaison (Figure 22).



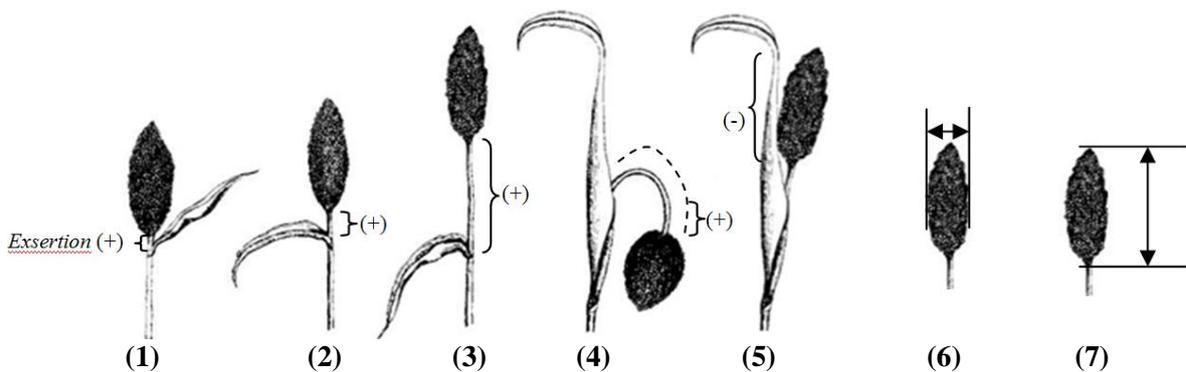
**Figure 22.** Estimation de la chlorophylle par l'appareil manuel électronique  $SPAD$ .

- Vigueur ( $Vig$ ) : c'est une évaluation de la robustesse des plantes de la parcelle élémentaire à l'aide d'une échelle de 1 à 10 (45 jours après le semis).

Les cinq autres paramètres liés à la floraison et l'inflorescence sont :

- Apparition paniculaire ( $ApPan$ ) : est exprimée en nombre de jours calendaires du semis à la date d'apparition des panicules. Elle est notée dès que 50% des plantes de la parcelle élémentaire commencent leurs apparitions paniculaires partielles.
- Floraison ( $Flor$ ) : est exprimée en nombre de jours calendaires du semis à la date de floraison. C'est la date à laquelle 50% des panicules de la même micro-parcelle commencent leurs floraisons.

- Exsertion d'inflorescence (*Exs*, cm) : est mesurée au stade floraison à partir de la ligule de la feuille étendard jusqu'à la base de la panicule (House, 1985 ; IBPGR / ICRISAT, 1993 ; Upadhyaya et *al.*, 2009) (Figure 22).
- Longueur panicule (*LongPan*, cm) : est prise de la base de la panicule jusqu'à l'extrémité supérieure (Figure 22).
- Largeur panicule (*LargPan*, cm) : est mesurée à la zone la plus large de la panicule qui se situe généralement vers la base (Figure 23).



**Figure 23.** Types d'exsertion d'inflorescence (1, 2, 3 et 4 in IBPGR/ICRISAT (1993) et House (1985), Largeur paniculaire (6), Longueur paniculaire (7) et l'exsertion d'inflorescence (5) vue sur terrain.

#### II.4.2. Collecte des données de l'essai n°2

Pour l'essai n°2, les mesures ont porté sur 12 paramètres agro-morphologiques dont 09 concernent la croissance végétative et la floraison et 03 concernent la qualité fourragère des échantillons.

Paramètres liés à la croissance et à la floraison :

- Largeur feuille (*LargF*, cm) : est mesurée à l'aide d'une règle à la zone la plus large de la feuille.
- Surface foliaire (*SurfF*, cm<sup>2</sup>) : elle est estimée d'après Stickler et *al.* (1961) selon la formule :  $SF \text{ (cm}^2\text{)} = 0.747(L \times l)$ , dont **L**= longueur feuille et **l**= largeur feuille.

- Matière sèche feuille (*MSF*, %) : est estimée par la formule  $MS\% = (\mathbf{PSF} \times 100) / \mathbf{PFF}$ , dont **PSF** = poids sec feuille et **PFF** = poids frais feuille.
- Nombre de talles (*NbT*) : c'est de compter le nombre de talles y compris la talle principale.
- Diamètre de la tige (*DiaT*, mm) : est mesurée à l'aide du pied à coulisse électronique entre les deux premiers nœuds de la tige principale.
- Emergence (Emerg, %) : estimation du pourcentage de la germination des graines dans chaque microparcelle.
- Hauteur finale de la plante (*HautFin*, cm) : est mesurée en fin de cycle à l'aide d'une règle graduée depuis le collet jusqu'à l'extrémité supérieure de la plante (Figure 20), tout en prenant l'inflorescence principale en considération (IBPGR / ICRISAT, 1993 ; Rooney et al., 2013).
- Vitesse de croissance (*VitCr*, %) : est estimée par la comparaison entre deux mesures de la hauteur de la plante au stade montaison (comparaison de la hauteur entre 50 et 57 jour après le semis puis divisé sur le nombre de jours pour avoir la croissance en longueur dans une journée).
- Floraison (*Flor*) : est exprimée en nombre de jours calendaires du semis à la date de floraison. C'est la date à laquelle 50% des panicules de la même micro-parcelle commencent leurs floraisons.

Paramètres liés à la qualité fourragère des populations et variétés :

- Rendement en biomasse fraîche (*BioFr*, Tonne) : est estimé en pesant la biomasse fraîche de la partie aérienne pour trois plantes. La valeur obtenue est convertie en tonnes (à raison d'une densité de 95000 plants par hectare).

- Rendement en biomasse sèche (*BioSèch, Tonne*) : est estimé en pesant la biomasse sèche de la partie aérienne pour trois plantes. La valeur obtenue est convertie en tonnes (à raison d'une densité de 95000 plants par hectare).
- Ratio fourrager (*IndFour*) : est mesuré, afin d'estimer l'exploitation d'eau par les plantes pour accumuler la matière sèche, en divisant le taux de la matière sèche de la biomasse aérienne sur le volume d'eau utilisé (précipitations plus irrigation = 140,94 mm au stade floraison).

## II.5. Analyse des données

Pour les deux essais n°1 et n°2, les données ont été soumises à une analyse descriptive : minima (min), maxima (max), moyenne (moy), écart type (ET) et coefficient de variation (CV%) pour tous les paramètres quantitatifs étudiés. Le coefficient de variation en pourcentage a été calculé par la formule :

**CV%** = (ET/Moy) x 100 ... dont **ET** est l'écart type et **Moy** est la moyenne.

Pour l'essai n°1, une analyse de la variance (ANOVA) à deux facteurs a été réalisée en utilisant la procédure GLM (type III), incluse dans le logiciel SPSS version 16 (2007 Rel 1600 SPSS nc, Chicago, IL, USA). Les facteurs analysés sont : le génotype avec ses 17 niveaux et l'année avec ses 2 variantes. Pour l'essai n°2, une analyse de la variance à un seul facteur (génotype) a été faite pour les 20 populations et variété. La comparaison des moyennes est faite en référence au test de Duncan au seuil de 5%.

L'estimation de la variance génétique ( $V_g$ ) et la variance environnementale ( $V_e$ ) entre les populations et variétés a été effectuée en utilisant la procédure VARCOMP sur SPSS dont le génome a été traité comme facteur aléatoire. L'héritabilité au sens large ( $H^2$ ) des paramètres étudiés a été estimée en utilisant la formule suivante :  $H^2 = V_g / (V_g + V_e)$ ,  $V_{phen} = V_g + V_e$  (Nyquist et Baker, 1991 ; House, 1985 ; Badri et al., 2016).

L'héritabilité au sens large est classée comme faible pour des valeurs incluses entre 0 et 40%, moyenne (41 et 59%), modérément élevée (60 à 79%) et très élevée au-delà de 80% (Hannachi, 2017).

Le logiciel STATISTICA 8 a été utilisé pour analyser les données de l'essai n°2. La comparaison des moyennes des valeurs est faite en référence au test de Duncan au seuil de 5%.

Les corrélations de Pearson, avec correction de Bonferroni, entre les caractères mesurés, ont été estimées en utilisant la procédure de corrélation dans le logiciel SPSS.

L'analyse statistique multidimensionnelle, pour l'ensemble des 18 paramètres quantitatifs pour l'essai n°1 et les 12 paramètres quantitatifs pour l'essai n°2, a été utilisée pour effectuer une analyse en composantes principales (ACP) afin de projeter les populations et variétés dans les trois premiers axes à l'aide du logiciel XLSTAT v 7.5 (Addinsoft, USA).

Pour estimer les dissimilarités entre individus et leurs classifications, une analyse de Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a été réalisée pour décrire l'origine des populations et variétés, basée sur une matrice de dissimilarité par l'utilisation des distances euclidiennes, avec la méthode de Ward dans le logiciel XLSTAT.

Pour l'essai n°1, les groupes obtenus dans la classification hiérarchique ascendante ont été utilisés comme variable catégorielle dans l'analyse discriminante. L'identification des descripteurs les plus discriminants a été obtenue à partir de l'indice Wilks lambda.

# **Chapitre III**

## **Résultats et discussion**

## Chapitre III. Résultats et discussion

### III.1. Reconnaissance des races de sorgho dans les populations cultivées dans le Sahara de l'Algérie

Lors de la prospection au Sahara algérien, une variabilité phénotypique considérable du sorgho a été constatée. Nous distinguons, dans nos travaux, trois sources de semences de sorgho cultivé en Algérie : des semences originaires des pays développés (Europe et États-Unis d'Amérique), des semences originaires des pays du Sahel (Niger ou Mali) et les semences locales. Ces dernières semences (populations) sont multipliées chez les oasisiens.

Selon les indications données dans les recherches de Stemler *et al.* (1977), Paterson (2013), Reddy et Patil (2015) et Wang *et al.* (2015), nous déduisons que les populations locales sont similaires aux races Durra et Caudatum ou bien à des races intermédiaires. La race Durra est habituellement colorée en jaune et Caudatum en couleur blanche. La panicule compacte et les graines à prédominance blanche de la race Durra étaient des indications d'adaptation à des environnements à faibles précipitations avec un faible risque de moisissure (Paterson, 2013).

En se référant aux travaux de Harlan et De Wet (1972), les types des races locales cités ci-dessus sont confirmés par nos tentatives de classification des races de sorgho local (Tableau 5). Ces deux chercheurs ont confirmé l'importance de l'épillet lors de la classification raciale à cause de la stabilité environnementale de ce caractère (Figure 4, 5 ; Tableau 2 ; Annexe 2). Le type d'inflorescence et les caractères morphologiques de la plante aident aussi cette détermination (Harlan et De Wet, 1972).

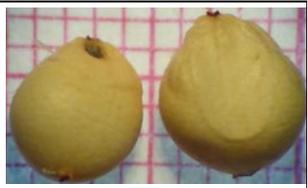
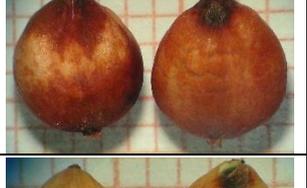
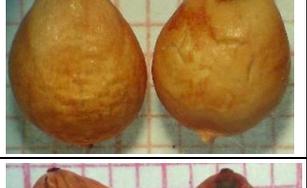
Cette tentative de détermination des populations et variétés des deux essais du sorgho, a été effectuée en se basant sur quelques critères de déterminations qui sont la forme de l'épillet, la forme de la graine, l'origine et la forme de la panicule.

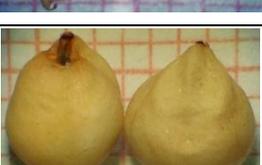
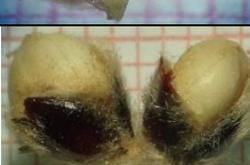
Une large diversité a été enregistrée du point de vue critères de détermination entre les populations et variétés de l'essai n°1.

**Tableau 5.** Détermination des races et sous races des populations et variétés du sorgho de nos essais (Harlan et De Wet, 1972 ; IPBGRI/ICRISAT, 1993 ; Chantereau, 2013).

Code et détermination	Graines	Panicule	Epillet
<b>Ai1</b> « 5* » ; « 6** » Sphérique*** <b>Durra à Durra-guinée</b>			
<b>Ou1</b> « 5 » ; « 9 à 10 » Sphérique <b>Durra à Durra-caudatum</b>			
<b>Ou2</b> « 7 » ; « 2 à 4 » Allongée <b>Bicolor-guinée (Soudangrass)</b>			
<b>Ad1</b> « 5 » ; « 10 » Dissymétrique <b>Durra-caudatum</b>			
<b>Ai4</b> « 5 » ; « 10 » Faible dissymétrie <b>Durra-caudatum à Durra-kafir</b>			
<b>Ai5</b> « 9 » ; « 9 » Sphérique <b>Guinée-durra</b>			
<b>Ai6</b> « 5 » ; « 9 » Faible dissymétrie <b>Caudatum-kafir</b>			
<b>Nig1</b> « 5 » ; « 9 » Faible dissymétrie <b>Caudatum à Caudatum-Kafir</b>			
<b>Nig2</b> « 3 » ; « 8 à 9 » Dissymétrie <b>Caudatum-kafir</b>			

<p><b>Nig3</b> « 3 » ; « 9 » Dissymétrie <b>Caudatum-kafir</b></p>			
<p><b>Nig4</b> « 5 » ; « 8 à 9 » Dissymétrie <b>Caudatum-kafir</b></p>			
<p><b>Nig5</b> « 3 » ; « 9 » Dissymétrie <b>Caudatum</b></p>			
<p><b>Dj1</b> « 7 » ; « 2 à 4 » Elliptique <b>Guinée-bicolor</b> (Sudangrass)</p>			
<p><b>Dj2</b> « 9 » ; « 3 à 4 » Elliptique <b>Guinée-bicolor</b> (Sudangrass)</p>			
<p><b>Me1</b> « 5 » ; « 3 ou 4 » Allongé <b>Guinée-bicolor</b> (Sudangrass)</p>			
<p><b>Fr1</b> « 7 » ; « 3 ou 12 » Allongé <b>Guinée-bicolor</b> (Sudangrass)</p>			
<p><b>Fr2</b> « 1 » ; « 6 » Sphérique <b>Guinée-Durra à</b> <b>Guinée -kafir</b></p>			
<p><b>Ai8</b> « 5 » ; « 9-10 » Dissymétrique <b>Caudatum-durra</b></p>			

<p><b>Ai9</b> « 3 » ; « 9 » Dissymétrie <b>Caudatum à Caudatum-durra</b></p>			
<p><b>Ai10</b> « 5 » ; « 8 » Faible dissymétrie <b>Guinée-caudatum</b></p>			
<p><b>Ai12</b> « 5 » ; « 9 à 10 » Dissymétrie <b>Caudatum à Caudatum-durra</b></p>			
<p><b>Ai13</b> « 5 » ; « 9-10 » Dissymétrique <b>Durra à Durra-caudatum</b></p>			
<p><b>Ai14</b> « 5 » ; « 10 » Faible dissymétrie <b>Durra à Durra-caudatum</b></p>			
<p><b>Ai16</b> « 3 » ; « 10 » Faible dissymétrie <b>Durra à Durra-caudatum</b></p>			
<p><b>Ai18</b> « 5 » ; « 10 » Faible dissymétrie <b>Durra à Durra-caudatum</b></p>			
<p><b>Ai19</b> « 5 » ; « 9 » Dissymétrique <b>Caudatum à Caudatum-kafir</b></p>			
<p><b>Ai24</b> « 3 » ; « 9 à 10 » Faible dissymétrie <b>Durra à Durra-caudatum</b></p>			

<p><b>Ai29</b> « 3 » ; « 9 » Sphérique <b>Durra à Caudatum-durra</b></p>			
<p><b>Ai30</b> « 5 » ; « 9 à 6 » Faible dissymétrie <b>Caudatum à Caudatum-kafir</b></p>			
<p><b>Ai33</b> « 3 » ; « 10 » Faible dissymétrie <b>Durra à Durra-caudatum</b></p>			
<p><b>Ai34</b> « 3 » ; « 9 à 10 » Dissymétrique <b>Caudatum à Caudatum-durra</b></p>			
<p><b>Ai35</b> « 5 » ; « 9 à 10 » Faible dissymétrie <b>Durra à Durra-caudatum</b></p>			
<p><b>Ai36</b> « 5 » ; « 10 » Dissymétrie <b>Durra à Durra-caudatum</b></p>			
<p><b>Ai39</b> « 3 » ; « 10 » Faible dissymétrie <b>Durra à Durra-caudatum</b></p>			
<p><b>Ai40</b> « 5 » ; « 10 » Dissymétrique <b>Caudatum-durra</b></p>			
<p><b>Ai42</b> « 3 » ; « 9 » Faible dissymétrie <b>Caudatum à Caudatum-durra</b></p>			

\* : couverture de la graine (1 : 25% grain couvert, 3 : 50%, 5 : 75%, 7 : 100%, 9 : glumes plus longues que le grain) ; \*\* : forme de la panicule (2 : Panicule très lâche à ram. érig., 4 : lâche à ram. érig., 6 : ½ lâche à ram. érig., 8 : Elliptique demi-compacte, 9 : Elliptique compacte, 10 : Ovale compacte) ;  
\*\*\* : symétrie et forme de la graine ; \*\*\*\* : détermination proposée.

Les deux races Caudatum et Durra ont été fortement représentée chez les populations locales de l'essai n°1 et l'essai n°2. Les cinq variétés du Niger ont été classées sous la sous race Caudatum-kafir. Les variétés introduites de l'Europe ou des Etats Unis sont classées généralement sous les races intermédiaires à base de Guinée et Bicolor. Harlan et De Wet (1972) ont déclaré que la race Durra est bien répartie en Afrique du Nord le long du Sahara.

Les variétés IRAT (tel que Nig 2 - IRAT 4) et Mota Maradi (Nig1) appartiennent à la race Caudatum ou ses races intermédiaires (Chantereau et *al.*, 2013). Caudatum est la plus importante dans les programmes modernes de sélection (Harlan et De Wet, 1972).

Les variétés hybrides commercialisées sur le marché algérien, appartiennent sans doute au sudangrass ou des hybrides sudangrass x sorgho grain. Les variétés hybrides en Algérie sont commercialisées à des fins fourragères. D'après les recherches de Harlan et De Wet (1972), le sudangrass appartient à la race bicolor et ses sous-races telles que Bicolor-Guinée. Dahlberg (2000) déclare que le sudangrass est considéré comme sous espèce de [*Sorghum bicolor* (L.) Moench ssp. *drummondii* (Nees ex Steud.) De Wet et Harlan - Sudangrass], mais les travaux de « Working Group Sudanense » (Annexe 3 ; Snowden, 1955 ; USDA, 2021) ont classé sudangrass sous « *Sorghum bicolor* subsp. *Bicolor* ».

Selon notre initiative de détermination, la race Kafir est représentée chez les variétés du Niger où nous avons remarqué quelques ressemblances entre ces variétés et la race caudatum, connu par des panicules ni trop lâches ni trop compactes avec des glumes courtes adhérentes au grain elliptique (Tableau 2 et 5).

La race Bicolor a été rencontrée chez les variétés introduites des Etats Unis et Fr1 de la France. La race Bicolor a été largement utilisée aux Etats Unis, surtout pour produire des hybrides Sudangrass x sorgho grain (Tableau 2 ; Harlan et De Wet, 1972). Cette race est aussi présente au Soudan où nous trouvons notre population Ou2 originaire d'Illizi.

## III.2. Etude de la variabilité génétique entre les populations et variétés de l'essai n°1 (7 locales et 10 importées) de sorgho et l'estimation de l'héritabilité au sens large

### III.2.1. Taux de germination

Avant d'installer l'essai n°1, une germination a été effectuée pour tester la faculté germinative et l'énergie germinative des 17 populations et variétés collectées (Tableau 6). Ces échantillons ont montré une faculté germinative supérieure à 80% et une énergie germinative supérieure à 60%. Quelques populations locales ont montré de bonne faculté germinative et une bonne énergie germinative. De même pour les variétés du Niger et l'hybride témoin.

Une bonne germination est expliquée par la bonne qualité de la semence produite localement. Beaucoup de variétés hybrides commercialisées sur le marché algérien ont été éliminées de cette étude et nous n'avons gardé que 3 variétés hybrides qui n'ont montré que de moyens taux de germination ce qui remet en cause l'existence de ce genre de semences sur notre marché algérien.

**Tableau 6.** Taux de germination, après 24 h et 72 h, des 17 échantillons de l'essai n°1.

Code	Population/variété	Energie germinative après 24 h	Faculté germinative après 72 h
<b>Ai 1</b>	SMch 2011 AS El Maleh	30/30 = 100 %	30/30 = 100 %
<b>Ai 4</b>	SR 2010 AS	27/30 = 90 %	29/30 = 97 %
<b>Ai 5</b>	SB1 2010 AS Tarankoukou	26/30 = 86 %	27/30 = 90 %
<b>Ai 6</b>	SB1 2012 FE	24/30 = 80 %	27/30 = 90 %
<b>Ou 1</b>	TAFSblOU30-SUCGR	30/30 = 100 %	30/30 = 100 %
<b>Ad 1</b>	TAF.blAD01-GR	29/30 = 97 %	29/30 = 97 %
<b>Nig 1</b>	Mota Marar "Niger"	21/30 = 70 %	29/30 = 97 %
<b>Nig 2</b>	IRAT 204 "Niger"	20/30 = 67 %	29/30 = 97 %
<b>Nig 3</b>	90 SN 7 "Niger"	26/30 = 86 %	28/30 = 93 %
<b>Nig 4</b>	SSD 35 "Niger"	27/30 = 90 %	28/30 = 93 %
<b>Nig 5</b>	Sepon 82 "Niger"	27/30 = 90 %	30/30 = 100 %
<b>Fr 1</b>	Lussi FR-GR	26/30 = 86 %	29/30 = 97 %
<b>Fr 2</b>	Super sille20 FR-GR	27/30 = 90 %	30/30 = 100 %
<b>Dj 1</b>	EVDJ17USA-FOU	18/30 = 60 %	27/30 = 90 %
<b>Dj 2</b>	SWEETDJ17USA-FOU	22/30 = 73 %	27/30 = 90 %
<b>Me 1</b>	HONME26USA-FOU	21/30 = 70 %	24/30 = 80 %

Un problème a été constaté chez les semences des oasisiens par rapport à l'existence de plusieurs variétés hybrides commercialisées chez les grenetiers d'Adrar et In Salah. Ces

hybrides provoquent malheureusement une dégénérescence génétique pour les populations de sorgho local de la région, d'où l'apparition d'un génotype indésirable appelé Khortal, caractérisé par un égrenage facile avec une qualité beaucoup moindre que l'hybride lui-même et beaucoup loin de la semence locale.

### **III.2.2. Caractérisation des 17 populations et variétés à l'aide des paramètres agromorphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante (analyse descriptive)**

Le tableau 7 regroupe les résultats de l'analyse statistique descriptive. Les valeurs minimales (Min), les valeurs maximales (Max), la moyenne (Moy), l'écart-type (ET) et le coefficient de variation (CV%), pour tous les paramètres étudiés, qui donnent une image sur la diversité phénotypique pour chaque paramètre étudié et même sur les performances des caractéristiques individuelles. Ces résultats seront discutés en détails dans le sous-chapitre « III.2.3 ».

Une variation plus élevée des populations et variétés avec une valeur du coefficient de variation supérieure à 50% pour l'exsertion d'inflorescence (*Exs*), la largeur paniculaire et le poids frais des feuilles. Des valeurs faibles, inférieures à 20%, ont été enregistrés pour la floraison, l'apparition paniculaire, matière sèche feuille, *SPAD* et Vigueur. Des niveaux modérés ( $20% < CV < 50%$ ) ont été notés pour le reste des caractères.

### **III.2.3. Analyse de la variance (ANOVA) des variables agromorphologiques de la plante**

L'analyse de la variance met en évidence des effets significatifs sur les deux facteurs de l'analyse (le génotype et l'année) pour l'ensemble des paramètres étudiés (Tableau 8). Les résultats révèlent donc la présence d'une importante variabilité phénotypique au sein du matériel végétal étudié. La variabilité observée est expliquée par la diversité des échantillons utilisés. Les effets significatifs du facteur génotype montrent des différences d'ordre

génétique pour l'ensemble des paramètres quantitatifs, ce qui explique l'importance du matériel végétal étudié.

**Tableau 7.** Analyse descriptive des résultats des paramètres agro-morphologiques des 17 échantillons de l'essai n°1.

	Trait	Min	Max	Moy	Ecart type	CV(%)
01	<b>LongF</b> / cm	31,00	120,00	65,93	16,14	24,5
02	<b>LargF</b> / cm	2,60	9,80	5,66	1,41	24,9
03	<b>SurfF</b> / cm <sup>2</sup>	69,50	717,50	288,58	123,52	42,8
04	<b>PFF</b> / g	0,81	15,12	5,30	2,70	50,8
05	<b>PSF</b> / g	0,30	5,20	1,89	0,92	48,4
06	<b>MSF</b> %	15,30	68,76	36,87	6,01	16,3
07	<b>DiamT</b> / mm	4,04	24,05	11,27	2,95	26,2
08	<b>HautFin</b> / cm	83,00	326,00	187,26	47,82	25,5
09	<b>VitCr</b> / cm par jour	0,57	5,91	1,89	0,86	45,5
10	<b>SPAD</b> / sans unité	23,90	66,90	40,96	6,88	16,8
11	<b>Vig</b> / de 1 à 10	3,00	8,50	5,94	1,13	19,1
12	<b>NbT</b>	1,00	9,00	3,06	1,39	45,5
13	<b>NbF</b>	4,00	16,00	8,37	1,95	23,26
14	<b>Exs</b> / cm	-12,00	42,00	14,01	8,69	62,0
15	<b>LongPan</b> / cm	10,00	46,50	22,44	8,37	37,3
16	<b>LargPan</b> / cm	2,00	29,00	6,63	3,81	57,5
17	<b>ApPan</b> / nb de jours	49,00	86,00	70,24	8,09	11,5
18	<b>Flor</b> / nb de jours	63,00	105,00	86,18	8,66	10,1

**LongF** : Longueur feuille, **LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **PFF** : Poids frais feuille, **PSF** : Poids sec feuille, **MSF** : Matière sèche feuille, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **NbF** : Nombre de feuilles, **NbT** : Nombre de talles, **DiamT** : Diamètre tige, **SPAD** : Taux de chlorophylle, **LongPan** : Longueur paniculaire, **LargPan** : Largeur paniculaire, **Vig** : Vigueur, **Exs** : Exsertion pédonculaire, **ApPan** : Apparition paniculaire, **Flor** : Floraison.

**Tableau 8.** Analyse de la variance (ANOVA) des paramètres agro-morphologiques des 17 échantillons de l'essai n°1.

	génotype		Année		génotype x Année	
	F	Prob	F	Prob	F	Prob
<b>LongF</b> / cm	85,95 ***	0,000	242,72 ***	0,000	9,77 ***	0,000
<b>LargF</b> / cm	155,07 ***	0,000	8,42 **	0,004	8,85 ***	0,000
<b>SurfF</b> / cm <sup>2</sup>	118,93 ***	0,000	112,50 ***	0,000	9,99 ***	0,000
<b>PFF</b> / g	205,66 ***	0,000	50,74 ***	0,000	18,61 ***	0,000
<b>PSF</b> / g	122,48 ***	0,000	0,29 ns	0,589	13,58 ***	0,000
<b>MSF</b> %	33,62 ***	0,000	190,56 ***	0,000	16,40 ***	0,000
<b>DiamT</b> / mm	99,93 ***	0,000	169,92 ***	0,000	6,94 ***	0,000
<b>HautFin</b> / cm	186,03 ***	0,000	23,98 ***	0,000	10,97 ***	0,000
<b>VitCr</b> / cm par jour	161,96 ***	0,000	804,05 ***	0,000	84,17 ***	0,000
<b>SPAD</b> / sans unité	29,37 ***	0,000	475,51 ***	0,000	2,55 ***	0,001
<b>Vig</b> / de 1 à 10	82,34 ***	0,000	8,30 **	0,004	3,29 ***	0,000
<b>NbT</b>	83,84 ***	0,000	453,25 ***	0,000	22,45 ***	0,000
<b>NbF</b>	80,81 ***	0,000	182,74 ***	0,000	7,26 ***	0,000
<b>Exs</b> / cm	238,40 ***	0,000	87,60 ***	0,000	30,00 ***	0,000
<b>LongPan</b> / cm	536,89 ***	0,000	54,99 ***	0,000	20,84 ***	0,000
<b>LargPan</b> / cm	397,26 ***	0,000	51,65 ***	0,000	61,42 ***	0,000
<b>ApPan</b> / nb de jours	130,90 ***	0,000	1,81 ns	0,179	5,27 ***	0,000
<b>Flor</b> / nb de jours	159,49 ***	0,000	4,83 *	0,028	11,62 ***	0,000

**LongF** : Longueur feuille, **LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **PFF** : Poids frais feuille, **PSF** : Poids sec feuille, **MSF** : Matière sèche feuille, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **NbF** : Nombre de feuilles, **NbT** : Nombre de talles, **DiamT** : Diamètre tige, **SPAD** : Taux de chlorophylle, **LongPan** : Longueur paniculaire, **LargPan** : Largeur paniculaire, **Vig** : Vigueur, **Exs** : Exsertion pédonculaire, **ApPan** : Apparition paniculaire, **Flor** : Floraison, **ns** : non significatif

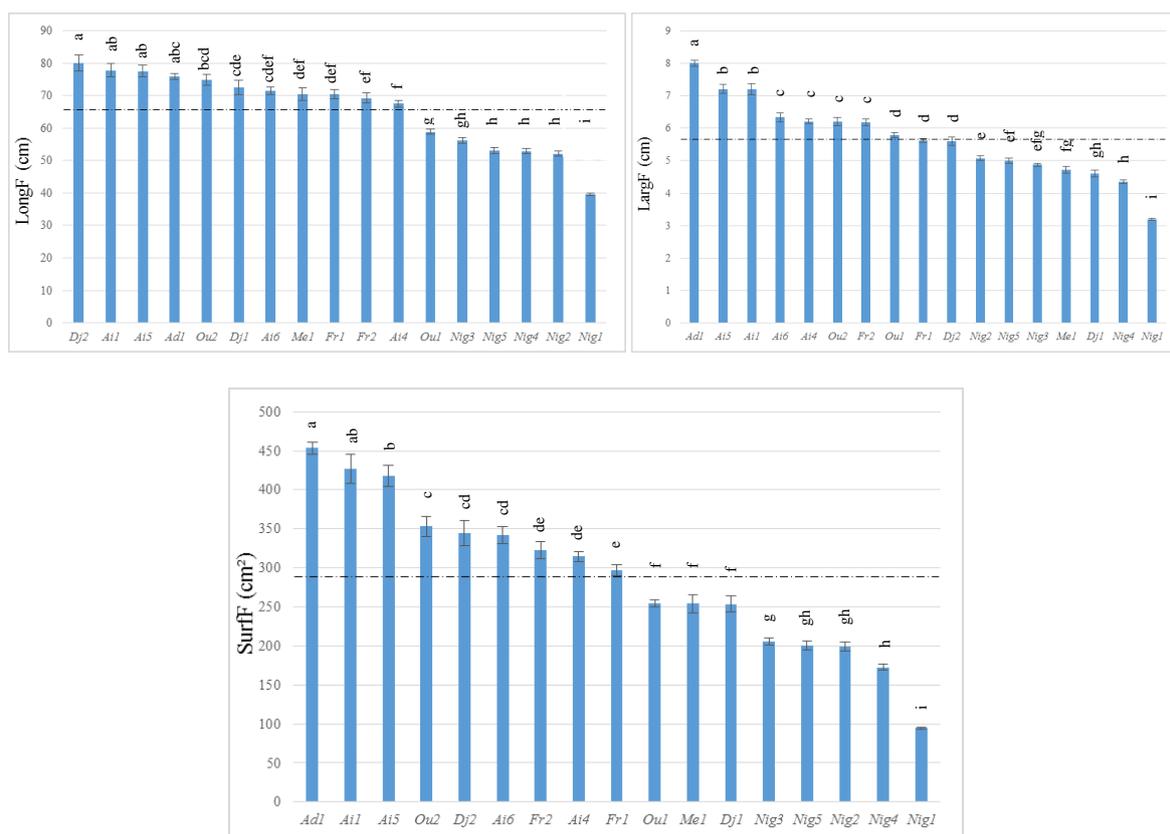
Le facteur année a montré aussi des effets significatifs pour la majorité des traits de l'étude, exception faite pour le poids sec des feuilles (*PSF*) et l'apparition paniculaire (*ApPan*). L'interaction « génotype x année » a montré aussi des effets significatifs pour l'ensemble des paramètres étudiés.

### **III.2.3.1. Variation des paramètres : longueur feuille (*LongF*), largeur feuille (*LargF*) et surface foliaire (*SurfF*)**

L'analyse de la variance des valeurs de la longueur feuille indique des effets statistiques significatifs pour le facteur génotype avec une supériorité des variétés importées et des populations locales Dj2, Ai1, Ai5 et Ad1 avec plus de 74,87cm. Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées chez les variétés du Niger citant principalement Nig1 avec une très faible longueur de 39,58cm seulement (Figure 24).

La largeur de la feuille a montré encore plus de variation entre les populations et variétés avec des effets significatifs sur les deux facteurs étudiés. Une supériorité a été enregistrée chez les populations algériennes citant principalement Ad1, Ai5 et Ai1 avec 8.0, 7,2 et 7,2cm de largeur respectivement, contre une très faible valeur chez la variété Nig1 avec 3,19cm seulement. La variété hybride témoin n'a pas dépassé 5,62cm de largeur.

Cependant, la variété Dj2 qui a montré une longueur élevée n'a donné que de faible largeur ce qui a influencé sur la surface foliaire qui n'a pas dépassé 344cm<sup>2</sup>. Alors que les populations algériennes montrent des surfaces foliaires dépassant 418cm<sup>2</sup> et même plus de 453cm<sup>2</sup>. Le reste des populations et variétés ont données des surfaces foliaires intermédiaires citant le témoin Fr1 avec 296cm<sup>2</sup>. Cela a été confirmé par la différence statistique significative.



**Figure 24.** Diagrammes de comparaison des paramètres agro morphologiques des populations et variétés de l’essai n°1 : la longueur et la largeur de la feuille et la surface foliaire.

Le test post-hoc de Duncan sur la surface foliaire a révélé l’existence de 9 groupes homogènes dont les variétés du Niger appartiennent aux groupes des valeurs basses, contrairement aux populations algériennes Ad1, Ai1 et Ai5 appartenant aux groupes de valeurs élevées. Les variétés hybrides commercialisées sur le marché algérien se sont regroupés dans des groupes à valeurs intermédiaires (Annexe 4).

La longueur feuille de notre travail a donné des valeurs moyennes de 65.93cm avec une valeur minimale de 31cm contre une valeur maximale de 120cm (Tableau 7). Ces résultats sont similaires à ceux enregistrés par Dossou-Aminon et *al.* (2015) pour des échantillons cultivés au Bénin avec 76,4cm et une fourchette de 48,2 à 110,7cm. Bello et *al.* (2007), qui ont travaillé au Soudan, ont constaté de faibles moyennes de l’ordre de 41,4cm et des valeurs minima-maxima de 34,98-48,12cm.

La largeur feuille a donné une moyenne de 5,66cm avec une valeur minimale de 2,6cm contre une valeur maximale de 9,8cm. Bello et *al.* (2007) au Soudan ont trouvé une fourchette de largeur feuille minima-maxima restreinte entre 5,2-8,72cm. Adugna (2014) en Ethiopie et Dossou-Aminon et *al.* (2015), au Benin, ont trouvé des résultats similaires avec 7,52 et 8,2cm respectivement. Il est à noter que les feuilles les plus larges fournissent beaucoup de fourrage (Snowden, 1936).

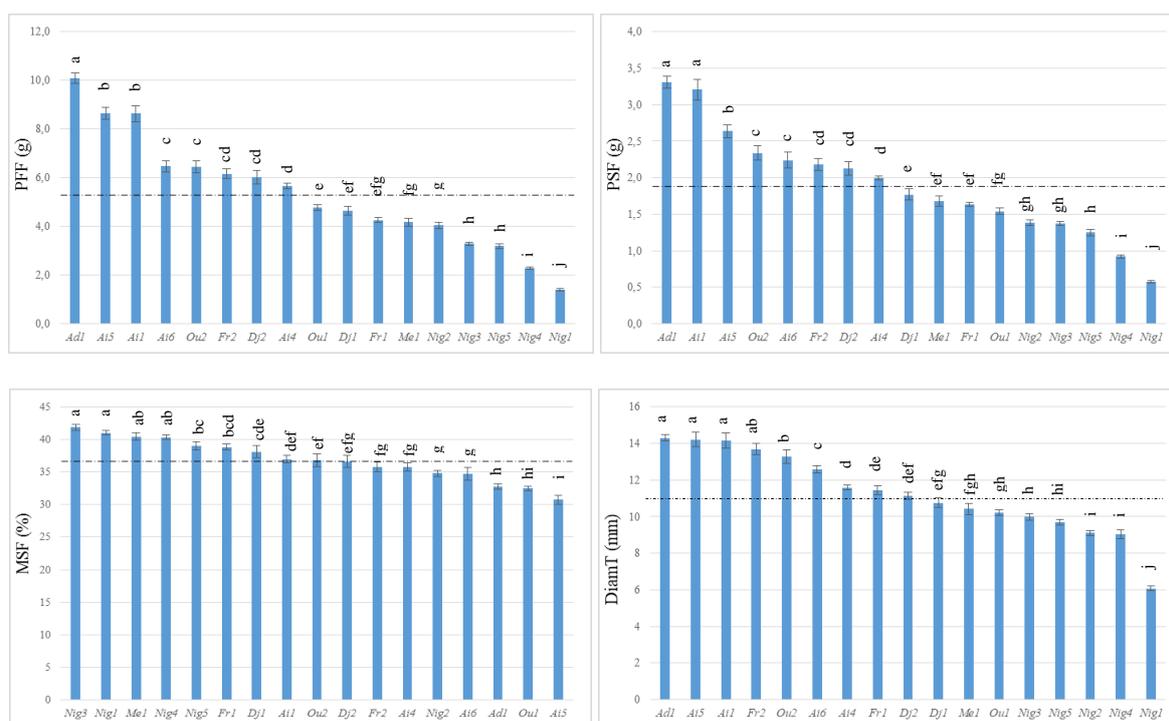
La surface foliaire a donné une moyenne de 288,58cm<sup>2</sup> avec une valeur minimale de 69,5cm<sup>2</sup> contre une valeur maximale de 717,5cm<sup>2</sup>. Abraha et *al.* (2015) en Erythrée ont trouvé une fourchette de 127,7 vs 433,3cm<sup>2</sup>. Ayub et *al.* (2012) ont constaté que les variétés locales au Pakistan présentent une qualité fourragère (fourrage vert) élevée suite à une bonne surface foliaire. De même dans notre étude, les populations locales ont montré des surfaces foliaires dépassant 418cm<sup>2</sup> par rapport à la moyenne.

### **III.2.3.2. Variation des paramètres : poids frais feuille (PFF), poids sec feuille (PSF), matière sèche feuille (MSF) et diamètre tige (DiamT)**

L'analyse de la variance du poids frais feuille révèle des différences statistiquement significatives pour les deux facteurs étudiés. Ad1 suivie par Ai5 puis Ai1 ont donné les meilleures valeurs avec 10,09, 8,65 et 8,63g respectivement. Nig1 a toujours donnée la plus faible valeur avec 1,41g de poids frais feuille. Les variétés hybrides ont montré des scores intermédiaires entre 4 et 6g (Figure 25).

Le poids sec feuille n'a pas montré un grand changement, car l'ANOVA a révélé une différence significative pour le facteur génotype, mais la différence n'a pas été significative pour le facteur année. L'effet significatif du facteur génotype nous a montré la supériorité des populations Ad1, Ai1 et Ai5 avec une valeur dépassant 2,64g. La variété Nig1 n'a enregistré que 0,58g suivie par Nig4 avec 0,92g. Les variétés hybrides commercialisées sur le marché ont enregistré des scores intermédiaires d'environ 2g du poids sec feuille.

Le taux de la matière sèche de la feuille est lié avec le poids frais et le poids sec. Cependant, une supériorité du poids frais et du poids sec a été enregistrée pour les populations algériennes mais avec un faible taux de matière sèche. Un faible taux de matière sèche ne reflète pas le rendement en biomasse sèche car un tonnage élevé en poids sec donne un tonnage important de matière sèche même si le taux est moyen ou un peu faible. Le taux de la matière sèche a enregistré un des effets statistiques significatifs sur le facteur génotype mais avec des taux élevés chez les variétés du Niger dont le taux le plus élevé a été enregistré chez la variété Nig3 avec 41,83% suivie directement par la variété Nig1 par 41%. Cependant, les populations algériennes ont enregistrées les taux les plus faibles citant principalement Ai5, Ou1 puis Ad1 dont les taux n'ont pas dépassé 32,76%.



**Figure 25.** Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : poids frais, poids sec, matière sèche feuille et diamètre tige.

Quant au diamètre de la tige, l'analyse de la variance a révélé des effets statistiques significatifs pour les deux facteurs étudiés. Les populations algériennes ont montré les meilleurs diamètres citant principalement Ad1, Ai5 et Ai1 avec 14,3, 14,21 et 14,14mm de diamètre respectivement. Les variétés du Niger et surtout Nig1 donnent les plus faibles scores

avec 6,07mm de diamètre. Les variétés hybrides commerciales donnent des valeurs intermédiaires, exception faite pour l'hybride Fr2 qui donne un diamètre assez élevé avec plus de 13mm.

Le test de comparaisons multiples de Duncan sur le paramètre diamètre tige a révélé l'existence de 10 groupes homogènes se chevauchent où les populations algériennes Ad1, Ai1 et Ai5 se sont groupées ensemble avec les scores les plus élevés. Les variétés du Niger appartiennent aux groupes de basses valeurs. Les variétés hybrides commercialisées sur le marché algérien se sont groupées dans des groupes à valeurs intermédiaires (Figure 25).

Les échantillons de notre étude ont montré des diamètres tiges entre 4 et 24mm avec une moyenne de 11,7mm (Tableau 7). Des résultats similaires ont été trouvés, au Bénin, par Dossou et Aminon (2015). Ayana et bekele (2000) ont trouvé, en Ethiopie et à l'Erythrée, des diamètres tiges beaucoup plus élevés entre 11 et 40mm et une moyenne de 23,2mm. Chaudhry et *al.* (2006), au Pakistan, ont trouvé une faible variabilité entre 13 et 18mm et une moyenne proche de notre étude avec 14,7mm. Le sorgho a tendance à « s'accrocher » pendant les périodes sèches et il reprend sa croissance au retour de la pluie (House, 1987).

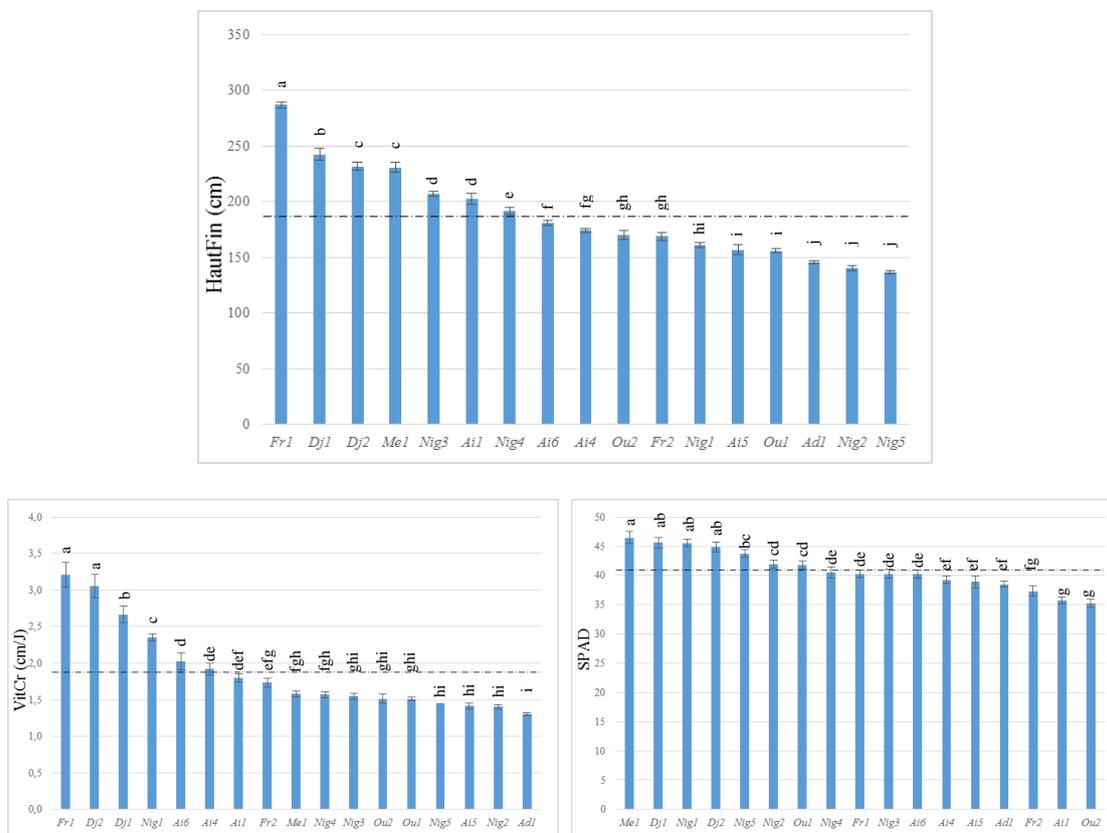
### **III.2.3.3. Variation des paramètres : hauteur finale (*HautFin*), vitesse de croissance (*VitCr*) et taux de chlorophylle (*SPAD*)**

L'analyse statistique de variance du paramètre hauteur finale a révélé des différences significatives pour les deux facteurs étudiés. Une supériorité a été enregistrée pour la variété hybride Fr1 suivie par Dj1, Dj2 puis Me1 avec une moyenne d'hauteur de 286, 242, 231 et 230cm respectivement. Les deux variétés Nig5 et Nig2 ont présenté les plus faibles scores avec 136 et 140cm respectivement (Figure 26).

Des effets significatifs pour la vitesse de la croissance ont été enregistrés pour le paramètre vitesse de la croissance. Les variétés hybrides Fr1 et Dj2 ont dépassés les 3cm par jours. Nig1 a montré une vitesse moyennement élevé avec 2,36cm. Les plus faibles vitesses

ont été enregistrées chez les populations algériennes citant principalement Ad1 avec 1,3cm, suivie par la variété Nig2 avec 1,4cm. Le reste de populations et variétés ont données des valeurs intermédiaires.

Le taux de chlorophylle a donné des différences significatives pour les deux facteurs étudiés. La variété hybride Me1 a donné le taux le plus élevé avec 46,47 suivie par Dj1 puis Nig1 avec 45,58 et 45,57 respectivement. Les populations algériennes Ou2 et Ai1 n'ont montré que de faible taux avec 35,25 et 35,75%.



**Figure 26.** Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : hauteur finale, vitesse de croissance et taux de chlorophylle.

Le test post-hoc de Duncan pour le paramètre hauteur finale a révélé l'existence de 10 groupes homogènes se chevauchent (Figure 26).

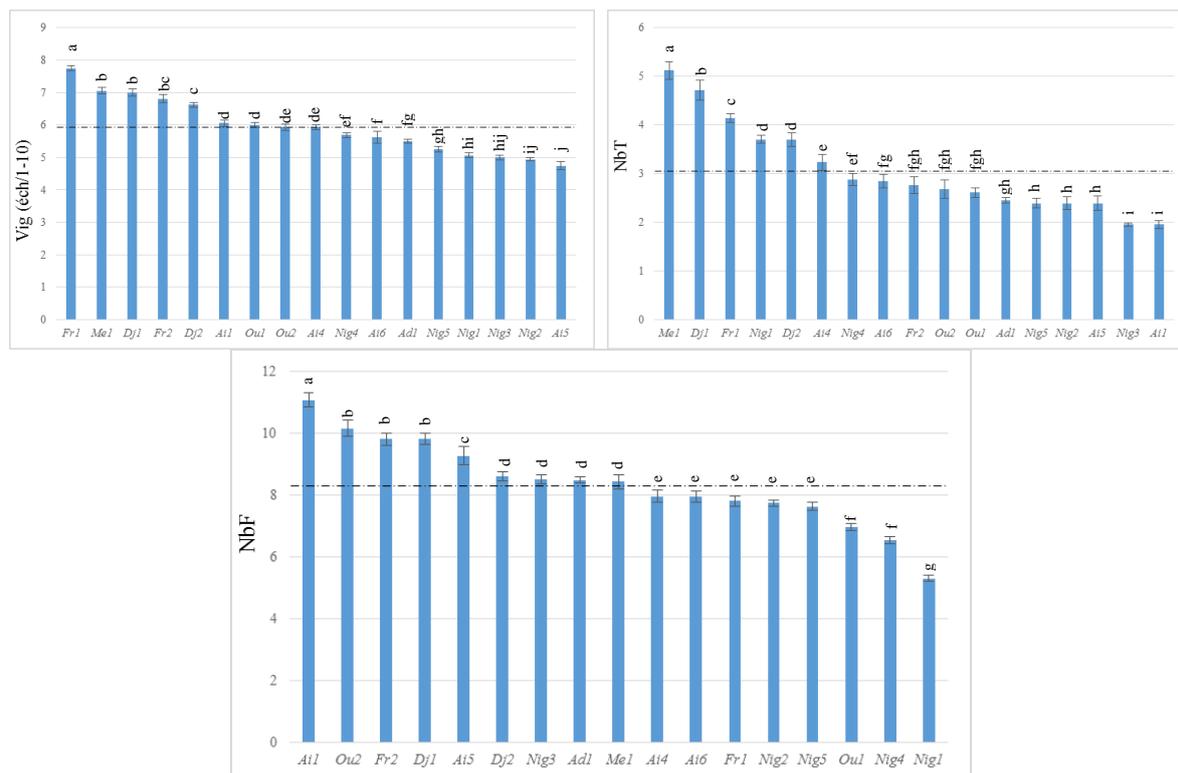
Une grande variabilité a été enregistrée pour le paramètre hauteur finale avec une moyenne de 187,26cm de l'ensemble des échantillons de notre étude, avec une valeur minimale de 83cm et maximale de 326cm (Tableau 7). Des résultats similaires en Inde ont été

enregistrés par Upadhyaya et *al.* (2009) avec une fourchette minima-maxima de 84-393cm et Bello et *al.* (2007) au Soudan avec 131-397cm. Entre le Soudan et l’Ethiopie/ Erythrée, Ayana et Bekele (2000) et Grenier et *al.* (2004) ont trouvé une variabilité beaucoup plus élevée avec des intervalles de 70-615cm et 80-611cm respectivement. Chaudhry et *al.* (2006), Abu Assar et *al.* (2009), Ayub et *al.* (2012), El Naim et *al.* (2012), Tariq et *al.* (2012) et Abraha et *al.* (2015), ont constaté une variabilité beaucoup plus faible avec des valeurs maximales ne dépassant pas les 266cm. Selon les travaux en Inde d’Appa Rao et *al.* (1996), une température élevée avec une longue exposition des plantes à la lumière du jour encourage la croissance.

Certaines populations locales (Ad1, Ou1) sont plus courtes que les variétés commercialisées. L’agriculteur cherche des plantes courtes possédant des tiges robustes, pour minimiser le phénomène de la verse suite au vent ou autres dangers avec une récolte mécanique facile (Lin et *al.*, 1995, Mutava et *al.*, 2011).

#### **III.2.3.4. Variation des paramètres : vigueur (*Vig*), nombre talle (*NbT*) et nombre feuille (*NbF*)**

L’analyse de la variance du paramètre vigueur a révélé des effets significatifs sur les deux facteurs étudiés. La variété témoin hybride Fr1 a montré les meilleurs scores par 7,5 sur l’échelle d’évaluation, suivie directement par toutes les variétés hybrides commercialisées sur le marché algérien avec des scores dépassant 6,62. La population Ai5 a donné la plus faible valeur par 4,75 sur l’échelle d’évaluation de la vigueur (Figure 27).



**Figure 27.** Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : vigueur, nombre de talles et nombre de feuilles par plante.

L'ANOVA a montré des différences statistiquement significatives pour le paramètre nombre de talles par plante sur les deux facteurs de notre expérience. Les variétés Me1, Dj1 et Fr1 ont montré les nombres les plus élevés dépassant 4,14 talles par plante. Les deux échantillons Ai1 et Nig3 n'ont pas dépassés 2 talles par plante. Le reste d'échantillons ont présenté des valeurs intermédiaires.

L'analyse de la variance a révélé des effets significatifs pour le facteur nombre de feuilles sur les deux facteurs étudiés. La population Ai1 a montré le nombre le plus élevé avec plus de 11 feuilles par plante suivie par Ou2, Fr2 et Dj1 avec 10,17 et 9,81 feuilles par plante. La variété Nig1 n'a donné que 5,31 feuilles par plante. Le reste d'échantillons ont présenté un nombre de feuilles intermédiaires.

Le test de comparaisons multiples de Duncan a révélé l'existence de 7 groupes homogènes distincts (Figure 27).

Chaudhry et *al.* (2006) au Pakistan ont trouvés une moyenne de 11,68 feuilles par plante en comparaison avec notre travail où la moyenne n'a pas dépassé 8,37 feuilles par plante avec des minima-maxima de 4-16 feuilles (Tableau 7). Le nombre élevé de feuilles par plante influe positivement sur le rendement fourrager (Chaudhry et *al.*, 1991 et 2006).

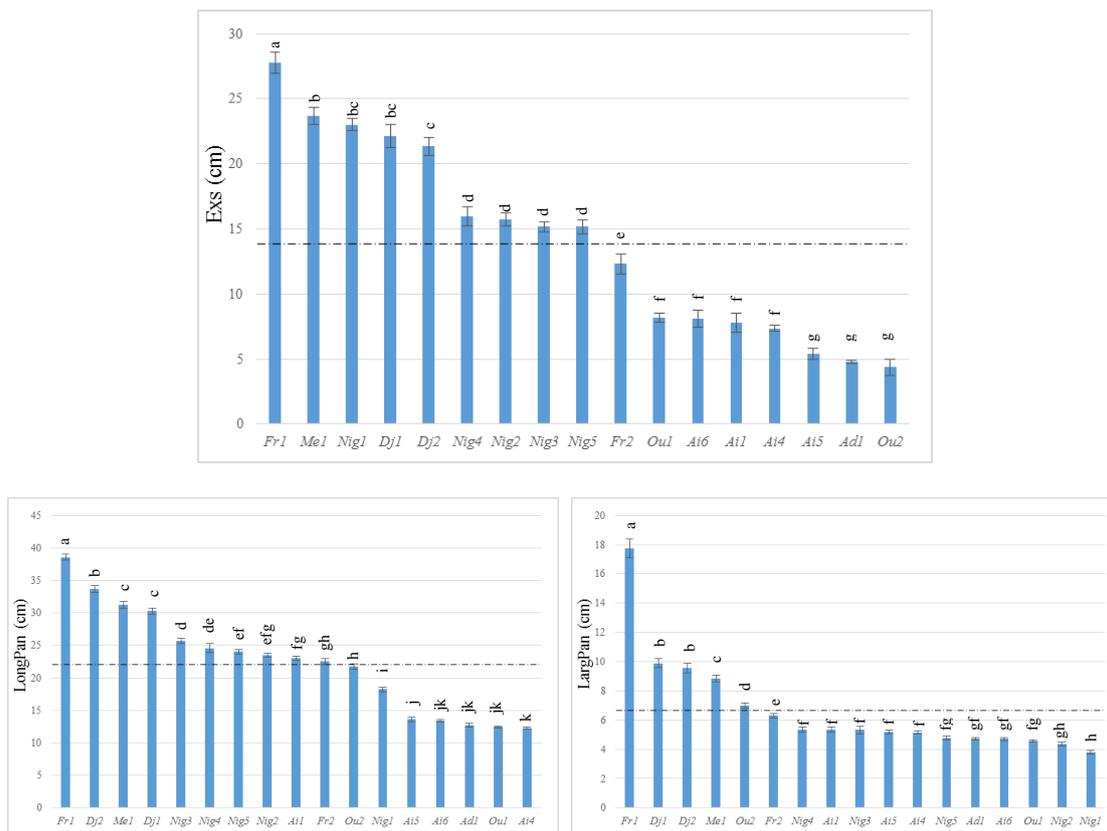
Ayub et *al.* (2012) ont constaté que les landraces sont préférables comme fourrage vert suite à des valeurs acceptables pour la surface foliaire, poids frais feuille, poids sec feuille, nombre de feuille, diamètre tige et la hauteur finale de la plante.

### **III.2.3.5. Variation des paramètres : exsertion pédonculaire (*Exs*), longueur paniculaire (*LongPan*) et largeur paniculaire (*LargPan*)**

L'analyse de la variance des valeurs de l'exsertion pédonculaire indique des effets statistiques significatifs pour les deux facteurs étudiés dans notre étude. Une supériorité des variétés Fr1, Me1, Nig1, Dj1 et Dj2 avec plus de 21,33cm. Les pédoncules les plus courts sont ceux des populations algériennes Ou2 et Ad1 avec une moyenne de 4,38 et 4,78cm respectivement. Le reste d'échantillons ont présenté des valeurs intermédiaires (Figure 28).

Lorsque les panicules sont abritées sous la feuille étendard, des insectes et des maladies cryptogamiques apparaissent suite aux conditions humides à l'intérieur. Les travaux d'Appa Rao et *al.* (1996) en Inde indiquent que les landraces en générale, ont une faible exsertion par rapport aux cultivars améliorés qui produisent des panicules plus longs.

Les valeurs du paramètre longueur paniculaire ont révélé des différences statistiques significatives suite à l'analyse de la variance pour les deux facteurs étudiés. La variété hybride témoin Fr1 a montré la longueur la plus élevée avec plus de 38cm suivie par la variété hybride commerciale Dj2 avec 33,63cm. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées chez les populations algériennes Ai4, Ou1 et Ad1 avec 12,27, 12,44 et 12,72cm. Les variétés originaires du Niger ont montrés des valeurs intermédiaires entre 18 et 25cm.



**Figure 28.** Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : exsertion pédonculaire, longueur et largeur de la panicule.

La largeur paniculaire a montré encore plus de variation entre les populations et variétés avec des effets significatifs sur les deux facteurs étudiés. Une supériorité a été enregistrée chez les variétés hybrides citant principalement Fr1 avec plus de 17cm, suivie par Dj1, Dj2 et Me1 avec 9,88, 9,57 et 8,85cm de largeur respectivement. Une très faible largeur a été enregistrée chez la population Nig1 avec 3,78cm seulement. Les populations locales ont données des largeurs intermédiaires entre 4,5 et 7cm.

Le test post-hoc de Duncan pour le paramètre largeur paniculaire a groupé l'ensemble des échantillons sous 7 groupes homogènes chevauchant (Figure 28).

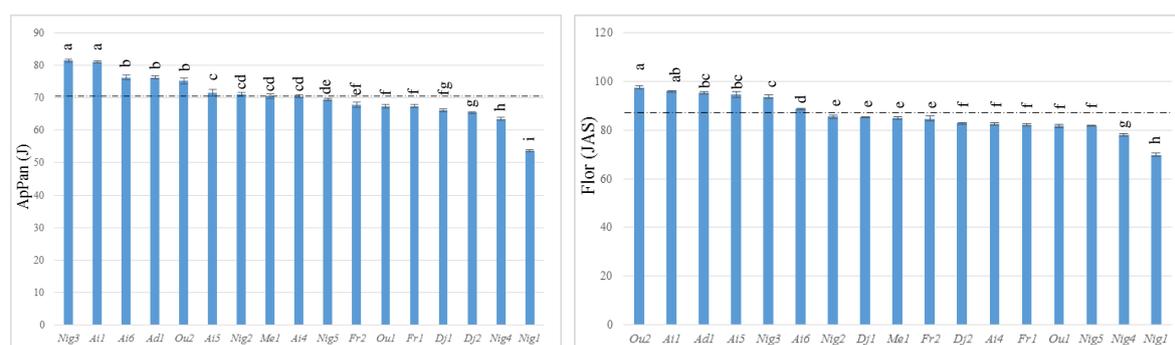
L'analyse descriptive des données nous a révélé une moyenne de largeur paniculaire de 6,63cm avec des valeurs minima-maxima de 2-29cm (Tableau 7), ce qui explique une grande variabilité entre les échantillons de notre étude. Les travaux de Grenier et *al.* (2004) sont proches de nos résultats, avec une moyenne de 8,38cm et des valeurs minima-maxima de

1cm-30cm. Les travaux d'Ayana et Bekele (2000) en Ethiopie/Erythrée ont montré une plus large variabilité avec des valeurs minima-maxima de 1cm-42,23cm. Une variabilité moins importante au Bénin et Erythrée a été enregistrée chez les travaux de Dossou-Aminon et *al.* (2015) et Abraha et *al.* (2015) avec des valeurs minimales de 3,38 et 6,7cm respectivement et des valeurs maximales de 18 et 14cm de largeur respectivement.

Appa Rao et *al.* (1996) ont démontré qu'en Inde, la race Guinea est connue par des longs pédoncules contrairement au Durra connue par une faible exsertion avec des panicules ovales, compactes et courtes. Notre tentative de classification raciale nous montre des résultats semblables (voir annexe 3). La longueur paniculaire représente un caractère stable pour certaines races (Mann et *al.*, 1983 ; Doggett, 1988 ; Harlan, 1992). Grenier et *al.* (2004) ont constaté, au Soudan, que le sorgho équatorial présente plus d'exsertion que d'autres génotypes. Les races Durra et Caudatum sont connues par une exsertion courte en comparaison avec la race Guinea ou la race Kafir.

#### **III.2.3.6. Variation des paramètres : apparition paniculaire (*ApPan*) et floraison (*Flor*)**

L'analyse de la variance du paramètre apparition paniculaire a révélé des effets statistiques significatifs pour le facteur génotype, mais non significatif pour le facteur année. Une supériorité a été enregistré pour les échantillons Nig3 et Ai1 avec 81 jours après le semis. La variété originaire du Niger Nig1 n'a montré que 53,73 jours (Figure 29). Les variétés hybrides y compris le témoin Fr1 n'ont présenté que de faibles valeurs inférieures à 70 jours après le semis.



**Figure 29.** Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et variétés de l'essai n°1 : apparition paniculaire et la floraison.

L'analyse de la variance a montré des différences significatives pour les deux facteurs étudiés concernant le paramètre floraison. Les populations algériennes citant Ou2, Ai1, Ad1 et Ai5 ont fleuri après 94,75 jours après le semis. La variété Nig1 fleurit précocement à 69,87 jours après le semis. Les variétés hybrides commercialisées ont donné des valeurs intermédiaires entre 82 et 85 jours après le semis.

Le test de comparaisons multiples de Duncan a révélé l'existence de 8 groupes homogènes se chevauchent.

Une importante variabilité entre les populations et variétés étudiées pour le paramètre floraison avec une moyenne de 86,18 jours après le semis, mais avec des valeurs minima et maxima de 63 et 105 jours. Des résultats similaires ont été enregistrés en Inde dans les travaux des chercheurs Upadhyaya et *al.* (2009) avec une moyenne de 82,2 jours et des valeurs minima-maxima de 47,79-117,62 jours. Les travaux de Bello et *al.* (2007) ont montré des résultats un peu plus décalés au Soudan dont la moyenne de 113,5 jours avec des minima de 88,33 jours et maxima de 130,33 jours. Dossou-Aminon et *al.* (2015) au Bénin trouvent des moyennes plus élevées à raison 138 jours. Les recherches d'Abu Assar et *al.* (2009), d'El Naim et *al.* (2012) et d'Abraha et *al.* (2015), en Erythrée et au Soudan, ont trouvé respectivement des moyennes de 60,8, 69,31 et 75 jours. Une variabilité très élevée a été enregistrée chez les travaux d'Ayana et Bekele (2000) dont la moyenne est de 115,77 avec des minima de 49,08 et maxima de 214 jours et les recherches de Grenier et *al.* (2004) qui ont

travaillé sur plus de 2000 accessions au Soudan où la moyenne est égale à 66,78 avec des minima de 41 et maxima de 190 jours.

Les populations locales ont montré un cycle végétatif (jusqu'au stade floraison) long, en comparaison avec les variétés du Niger ou même avec les variétés hybrides commerciales. Dans le sorgho, la floraison est considérée comme un événement crucial en raison de son rôle clé dans l'adaptation et la répartition géographique de cette culture (El Mannai et *al.*, 2011).

La variété Nig1 a pu atteindre le stade floraison après 69 jours seulement, ce qui favorise l'achèvement du cycle rapidement. Un cycle court aide la plante à s'échapper de certains problèmes tels que les maladies et l'exposition à la sécheresse. Le sorgho en général fleurit au bout de 55 à 70 jours dans les climats chauds. Mais la floraison peut s'échelonner entre 30 et plus de 100 jours (House, 1987). Cependant, il est nécessaire d'investir dans les cycles végétatifs courts des variétés introduites pour des futurs programmes d'amélioration génétique.

#### **III.2.4. Analyse des corrélations entre les paramètres agro-morphologiques quantitatives de la partie végétative de la plante**

Parmi les 153 corrélations entre les paramètres quantitatifs étudiés, 115 corrélations entre elles ont montré une signification à  $P < 0,000154$  (Correction Bonferroni). 75 corrélations positives et 40 corrélations négatives (Tableau 9).

Le poids frais feuille (*PFF*), le poids sec feuille (*PSF*), la longueur feuille (*LongF*), la largeur feuille (*LargF*) et la surface foliaire (*SurfF*) représentent les paramètres les plus corrélés avec un coefficient de corrélation  $r > 0,73$  et  $p < 0,0001$ . Des résultats similaires ont été enregistrés chez les recherches de Dossou-Aminon et *al.* (2015). Ayana et Bekele (2000) ont trouvés que la corrélation positive entre la longueur, la largeur et la surface foliaire est due à la relation fonctionnelle de la surface foliaire.

**Tableau 9.** Coefficients de corrélation entre les différents paramètres étudiés deux à deux (Pearson) pour les 17 populations et variétés de l'essai n°1.

	<i>LongF</i>	<i>LargF</i>	<i>SurfF</i>	<i>PFF</i>	<i>PSF</i>	<i>MSF</i>	<i>HautFin</i>	<i>VitCr</i>	<i>NbF</i>	<i>NbT</i>	<i>DiamT</i>	<i>SPAD</i>	<i>LongPan</i>	<i>LargPan</i>	<i>Vig</i>	<i>Exs</i>	<i>AppPan</i>	<i>Flor</i>
<i>LongF</i> / cm	-	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,359	0,002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>LargF</i> / cm	0,591**	-	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,395	0,072	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>SurfF</i> / cm <sup>2</sup>	0,873**	0,893**	-	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,534	0,002	<0,0001	0,383	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,003	0,079	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>PFF</i> / g	0,736**	0,860**	0,903**	-	<0,0001	<0,0001	0,009	0,585	<0,0001	0,0005	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,245	0,155	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>PSF</i> / g	0,714**	0,812**	0,862**	0,930**	-	0,080	0,753	0,111	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,699	0,814	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>MSF</i> / %	-0,229*	-0,316*	-0,303*	-0,388*	-0,053	-	<0,0001	0,002	0,671	0,071	<0,0001	0,363	<0,0001	<0,0001	0,007	<0,0001	0,0004	<0,0001
<i>HautFin</i> / cm	0,211*	-0,132*	0,019	-0,079	0,01	0,229*	-	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,955	0,002	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,025	0,001
<i>VitCr</i> / cm par jour	0,286*	-0,116*	0,092	-0,02	-0,048	-0,094	0,480*	-	<0,0001	<0,0001	0,583	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>NbF</i>	0,306*	0,350*	0,341*	0,376*	0,430*	0,013	0,208*	-0,136*	-	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,001	0,0003	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>NbT</i>	0,194*	-0,223*	-0,03	-0,106	-0,136*	-0,055	0,387*	0,391*	-0,188*	-	0,204	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>DiamT</i> / mm	0,536**	0,590**	0,605**	0,606**	0,549**	-0,310*	-0,002	0,017	0,412*	-0,04	-	<0,0001	0,0002	0,055	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>SPAD</i> / sans unité	0,028	-0,235*	-0,116*	-0,158*	-0,186*	-0,028	0,095*	0,279*	-0,314*	0,442*	-0,135*	-	<0,0001	<0,0001	0,041	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>LongPan</i> / cm	0,093	-0,274*	-0,125*	-0,260*	-0,157*	0,310*	0,628**	0,365*	0,103	0,355*	-0,112	0,232*	-	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>LargPan</i> / cm	0,249*	-0,03	0,089	-0,04	0,012	0,122*	0,629**	0,375*	0,110	0,370*	0,058	0,137*	0,686**	-	<0,0001	<0,0001	0,001	0,073
<i>Vig</i> / de 1 à 10	0,216*	-0,05	0,053	-0,04	0,007	0,082	0,488*	0,296*	0,144*	0,412*	0,140*	0,062	0,443*	0,532**	-	<0,0001	<0,0001	<0,0001
<i>Exs</i> / cm	-0,233*	-0,535**	-0,428*	-0,506**	-0,436*	0,319*	0,496*	0,305*	-0,207*	0,353*	-0,432*	0,217*	0,635**	0,470*	0,315*	-	<0,0001	<0,0001
<i>AppPan</i> / nb de jours	0,274*	0,448*	0,378*	0,413*	0,417*	-0,106	-0,068	-0,218*	0,355*	-0,270*	0,391*	-0,287*	-0,126*	-0,099	-0,182*	-0,388*	-	<0,0001
<i>Flor</i> / nb de jours	0,358*	0,522**	0,476*	0,533**	0,488*	-0,233*	-0,102	-0,242*	0,433*	-0,240*	0,494*	-0,279*	-0,129*	-0,054	-0,148*	-0,459*	0,777**	-

\*\* : Signification élevée/modérée ; \* : Significative après la correction de Bonferroni ( $\alpha = 0.05/324 = 0.000154$ ). **LongF** : Longueur feuille, **LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **PFF** : Poids frais feuille, **PSF** : Poids sec feuille, **MSF** : Matière sèche feuille, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **NbF** : Nombre de feuilles, **NbT** : Nombre de tiges, **DiamT** : Diamètre tige, **SPAD** : Taux de chlorophylle, **LongPan** : Longueur paniculaire, **LargPan** : Largeur paniculaire, **Vig** : Vigueur, **Exs** : Exsertion pédonculaire, **AppPan** : Apparition paniculaire, **Flor** : Floraison.

La floraison (*Flor*) a été fortement et positivement corrélée avec l'apparition paniculaire (*ApPan*) dont le coefficient de corrélation  $r > 0,77$  et  $p < 0,0001$ . La floraison est aussi significativement corrélée avec le nombre feuille par plante ( $r > 0,43$  et  $p < 0,0001$ ), et aussi négativement corrélée avec l'exsertion pédonculaire ( $r > -0,46$  et  $p < 0,0001$ ). Abraha et al. (2015) ont trouvé des résultats similaires sur la floraison et l'exsertion pédonculaires.

La hauteur finale de la plante (*HautFin*) a présenté une corrélation modérée avec la longueur paniculaire (*LongPan*) et la largeur paniculaire (*LargPan*) avec un coefficient de corrélation  $r > 0,62$  et  $p < 0,0001$ . La hauteur finale est aussi corrélée avec la vitesse de la croissance (*VitCr*) ( $r > 0,48$ ), la vigueur (*Vig*) ( $r > 0,48$ ), le nombre de talles (*NbT*) ( $r > 0,38$ ), le nombre de feuilles (*NbF*) ( $r > 0,21$ ) et l'exsertion (*Exs*) ( $r > 0,49$ ) mais surtout avec la longueur paniculaire (*LongPan*) et la largeur paniculaire (*LargPan*) avec un coefficient de corrélation  $r > 0,62$  à  $p < 0,0001$ . Hesketh et al. (1969) et Ayana et Bekele (2000) ont trouvé des corrélations entre ces paramètres. Ils ont rapporté aussi que ces caractères déterminent la capacité d'un génotype d'être compétitif lorsqu'il est cultivé avec d'autres variétés. D'autres faibles corrélations significatives entre la hauteur finale avec la longueur et la largeur feuille dans notre étude ont été enregistrées. Des résultats similaires ont été enregistrés chez les travaux de Dossou-Aminon et al. (2015).

Le caractère exsertion pédonculaire est corrélé avec l'ensemble des paramètres étudiés dont 8 entre eux avec une interaction négative. Une interaction positive entre *LargF* et *PSF* et une autre interaction négative a été enregistrée entre exsertion pédonculaire (*Exs*) avec *LargF* et *PPF* avec un coefficient de corrélation  $r > -0,5$  et  $p < 0,0001$ .

La vigueur (*Vig*) a aussi présenté des corrélations avec la largeur paniculaire ( $r > 0,53$ ,  $p < 0,0001$ ) et la hauteur finale ( $r > -0,48$ ,  $p < 0,0001$ ). La hauteur finale représente un important paramètre morphologique, il présente généralement des corrélations avec la vigueur et la croissance de la plante (Ayub et al., 2012).

Stemler et *al.* (1975) et Doggett (1988) ont souligné que la race Caudatum et la race Durra montrent de bonnes valeurs agronomiques et une meilleure adaptation aux conditions difficiles. En se référant à l'aspect morphologique des populations algériennes en comparaison avec les hybrides commercialisés sur le marché et les variétés du Niger, nous trouvons que les panicules de nos landraces sont compactes. D'après les recherches de Harlan et De Wet (1972), Stemler et *al.* (1977) et Reddy et Patil (2015), nos landraces sont proches de la race Durra et/ou Caudatum ou des races intermédiaires, alors que les variétés du Niger ressemblent beaucoup à la race Kafir et les variétés hybrides commercialisées sur le marché algérien venues des Etats-Unis d'Amérique ou de l'Europe se ressemblent à la race Guinea (Figure 30).



**Figure 30.** L'inflorescence des cinq races du sorgho dans le monde (Reddy et Patil, 2015).

### III.2.5. Héritabilité des caractères agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante

Une héritabilité au sens large très élevée ( $H^2 > 0,8$ ) a été observée pour les deux paramètres longueur paniculaire (*LongPan*) et largeur paniculaire (*LargPan*), une héritabilité modérément élevée pour 8 autres paramètres, puis 6 autres paramètres qui ont montré une héritabilité moyenne, et enfin une faible héritabilité ( $H^2 < 0,3$ ) pour la matière sèche (*MSF*) et la teneur en chlorophylle (*SPAD*) (Tableau 10). Des résultats similaires ont été trouvés par Bello et *al.* (2007), Kamatar et *al.* (2011), Yaqoob et *al.* (2015), Abraha et *al.* (2015) et Mohammed et *al.* (2015).

La largeur feuille (*LongF*), la surface foliaire (*LargF*), le poids frais feuille (*PFF*), le poids sec feuille (*PSF*), la hauteur finale de la plante (*HautFin*), longueur paniculaire (*LongPan*), largeur paniculaire, (*LargPan*) exsertion pédonculaire (*Exs*), apparition paniculaire (*ApPan*) et floraison (*Flor*) sont tous des paramètres qui ont montré une héritabilité modérément élevée à très élevée.

**Tableau 10.** Variance génétique ( $V_g$ ), Variance environnementale ( $V_e$ ), Variance phénotypique ( $V_{phen}$ ), l'héritabilité au sens large ( $H^2$ ) pour les 18 paramètres étudiés et les 17 populations et variétés de l'essai n°1.

Paramètres	$V_g$	$V_e$	$V_{phen}$	$H^2$
<i>LongF</i> / cm	119,173	100,119	219,292	0,54*
<i>LargF</i> / cm	1,341	0,587	1,928	0,70**
<i>SurfF</i> / cm <sup>2</sup>	8743	5136	13879	0,63**
<i>PFF</i> / g	4,925	1,685	6,61	0,75**
<i>PSF</i> / g	0,48	0,282	0,762	0,63**
<i>MSF</i> / %	5,162	19,19	24,352	0,21
<i>HautFin</i> / cm	1607	587,565	2194,565	0,73**
<i>VitCr</i> / cm par jour	0,167	0,138	0,305	0,55*
<i>NbF</i>	1,818	1,577	3,395	0,54*
<i>NbT</i>	0,628	0,654	1,282	0,49*
<i>DiamT</i> / mm	4,693	3,23	7,923	0,59*
<i>SPAD</i> / sans unité	10,574	25,239	35,813	0,30
<i>LongPan</i> / cm	61,202	7,59	68,792	0,89***
<i>LargPan</i> / cm	9,809	1,869	11,678	0,84***
<i>Vig</i> / de 1 à 10	0,709	0,574	1,283	0,55*
<i>Exs</i> / cm	49,2	15,11	64,31	0,77**
<i>ApPan</i> / nb de jours	43,156	21,985	65,141	0,66**
<i>Flor</i> / nb de jours	49,646	21,488	71,134	0,70**

\*\*\* héritabilité très élevée ; \*\* héritabilité modérément élevée ; \* héritabilité moyenne ; sans \* héritabilité faible.

**LongF** : Longueur feuille, **LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **PFF** : Poids frais feuille, **PSF** : Poids sec feuille, **MSF** : Matière sèche feuille, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **NbF** : Nombre de feuilles, **NbT** : Nombre de talles, **DiamT** : Diamètre tige, **SPAD** : Taux de chlorophylle, **LongPan** : Longueur paniculaire, **LargPan** : Largeur paniculaire, **Vig** : Vigueur, **Exs** : Exsertion pédonculaire, **ApPan** : Apparition paniculaire, **Flor** : Floraison.

Les deux paramètres matière sèche de la feuille (*MSF*) et le taux de chlorophylle (*SPAD*) ont présenté de faible héritabilité au sens large. Une faible héritabilité indique un effet environnement (année) plus important que l'effet génétique (génotype). Une héritabilité élevée suggère qu'il y a des possibilités effectives de sélectionner des populations et variétés performantes (Hannachi, 2017). Lorsque les proportions d'héritabilité sont élevées, la génétique joue un grand rôle dans la détermination de la valeur phénotypique d'un individu dans la population (Nyquist et Baker, 1991 ; El Naim *et al.*, 2012 ; Rooney, 2013).

La connaissance de la variabilité existante et de leur héritabilité entre les différents paramètres agro-morphologiques est vitale. L'héritabilité exprime le mécanisme de transfert

de l'information génétique des parents à la descendance. Elle exprime la fiabilité de la valeur phénotypique comme indicateur de la valeur génotypique des individus. Plus l'héritabilité est élevée plus le gain génétique de la sélection est important (Fellahi, 2017).

Les connaissances génétiques et leur héritabilité parmi les différents paramètres agromorphologiques ont été très efficaces pour améliorer le rendement d'une culture. Une héritabilité au sens large élevée signifie que le génotype a joué un rôle plus important que l'environnement dans la détermination du phénotype et suggérant qu'une sélection simple serait suffisante pour l'amélioration génétique des caractères souhaitables (House, 1985).

Dans notre étude, la hauteur finale de la plante et le nombre de jours pour atteindre l'apparition paniculaire et la floraison ont été influencés par le génotype (facteur génotype) au détriment de l'environnement (facteur année) et répondraient positivement à la sélection en fonction de leur héritabilité élevée (Tableau 10).

### **III.2.6. Analyse des composantes principales des paramètres agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante**

L'analyse en composantes principales (ACP) représente un outil de réduction des données pour résumer les informations de l'ensemble de valeurs afin de diminuer l'influence du bruit sur les résultats (Ruiz et *al.*, 1997 ; Gerrano, 2010).

Le Tableau 11 nous montre les fréquences de corrélations significatives. Seuls les deux premiers axes sur 16 axes, qui ont présenté des corrélations importantes.

La représentation Biplot des variables mesurées, sur le plan des deux facteurs importants, nous montre que les deux premiers axes expliquent ensemble plus de 79% du total de la variation disponible dans les données soumises à l'analyse. Le premier axe seul a expliqué plus de 50% de la variation, principalement en raison de la variation des paramètres foliaires (*LargF*, *PPF*, *PSF*, *SurfF*) et la *Flor*. Le deuxième axe représente plus de 28% de l'information principalement en raison de la variation des paramètres *LargPan*, *HautFin* et

Vig. Les populations et variétés ont été groupées sur les quatre quadrants par rapport aux paramètres quantitatifs étudiés (Figure 31).

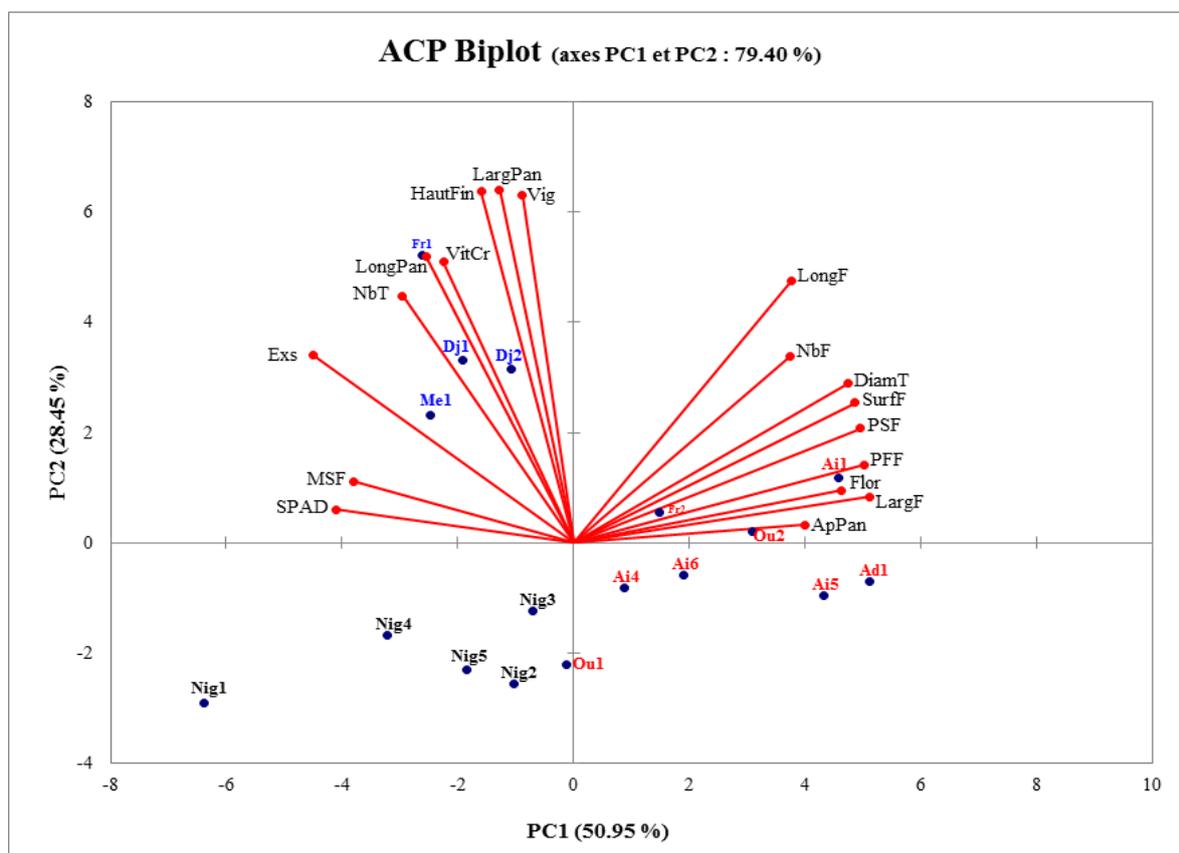
**Tableau 11.** Projections des différents paramètres agro-morphologiques, des 17 populations et variétés de l'essai n°1, sur les deux premiers axes PC1 et PC2 de l'analyse des composantes principales.

Paramètres	Composantes principales	
	PC1	PC2
<i>LongF</i> / cm	<b>0,4890</b>	0,4376
<i>LargF</i> / cm	<b>0,9080</b>	0,0135
<i>SurfF</i> / cm <sup>2</sup>	<b>0,8195</b>	0,1249
<i>PFF</i> / g	<b>0,8755</b>	0,0387
<i>PSF</i> / g	<b>0,8530</b>	0,0837
<i>MSF</i> / %	<b>0,5017</b>	0,0240
<i>HautFin</i> / cm	0,0882	<b>0,7865</b>
<i>VitCr</i> / cm par jour	0,1746	<b>0,5027</b>
<i>NbF</i>	<b>0,4876</b>	0,2219
<i>NbT</i>	0,3037	<b>0,3887</b>
<i>DiamT</i> / mm	<b>0,7761</b>	0,1617
<i>SPAD</i> / sans unité	<b>0,5851</b>	0,0071
<i>LongPan</i> / cm	0,2265	<b>0,5242</b>
<i>LargPan</i> / cm	0,0574	<b>0,7937</b>
<i>Vig</i> / de 1 à 10	0,0270	<b>0,7687</b>
<i>Exs</i> / cm	<b>0,7010</b>	0,2243
<i>ApPan</i> / nb de jours	<b>0,5521</b>	0,0021
<i>Flor</i> / nb de jours	<b>0,7455</b>	0,0175

**LongF** : Longueur feuille, **LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **PFF** : Poids frais feuille, **PSF** : Poids sec feuille, **MSF** : Matière sèche feuille, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **NbF** : Nombre de feuilles, **NbT** : Nombre de talles, **DiamT** : Diamètre tige, **SPAD** : Taux de chlorophylle, **LongPan** : Longueur paniculaire, **LargPan** : Largeur paniculaire, **Vig** : Vigueur, **Exs** : Exsertion pédonculaire, **ApPan** : Apparition paniculaire, **Flor** : Floraison.

D'après la figure 31, les flèches des paramètres cités sont élevés (très proches de 1). Ces paramètres sont corrélés positivement, citant principalement *LargF* et *PFF* qui sont fortement corrélés. Il ressort de la figure que les variétés hybrides originaires de l'Europe et des USA se sont distinguées sur le quadrant gauche en haut là où les paramètres de la *HautFin*, *LargPan* et *Vig* sur le deuxième axe, ce qui explique leurs caractéristiques. D'autre part, les populations algériennes se regroupent sur le premier quadrant en haut là où les paramètres de la feuille (*LargF*, *PFF*, *PSF*, *SurfF*) se positionnent. Ces remarques nous confirment l'importance de nos populations dans des futurs programmes d'amélioration

génétique du sorgho en Algérie. Chozin (2007) a estimé que l'analyse multivariée des composantes principales est le meilleur moyen pour choisir les parents pour hybridation. L'analyse des composantes principales est utilisée pour exprimer la variation des paramètres entre les individus d'une population. Des déductions similaires ont été démontrées antérieurement déjà par l'héritabilité.



**Figure 31.** Distributions des populations et variétés du sorgho de l'essai n°1 et valeurs de leurs paramètres agro-morphologiques autour des axes principaux PC1 et PC2 de l'Analyse en Composantes Principales.

De l'autre côté, *Exs*, *SPAD* et *MSF* ont montré une corrélation négative. Les paramètres qui ont le plus contribué à la deuxième composante principale expliquent 28,45% de la variation totale citant principalement *LargPan*, *HautFin* et *Vig*. Ces paramètres ont présenté des corrélations positives. Il est à signaler aussi que ces paramètres sont faiblement corrélés avec les paramètres liés à la feuille.

Ces résultats se rapprochent de ceux qui ont été trouvés chez Grenier et *al.* (2004), mais meilleurs par rapport aux recherches d'Ayana et Bekele (1999), Abraha et *al.* (2015) et Dossou-Aminon et *al.* (2015).

### **III.2.7. Structuration agro-morphologique des 17 populations et variétés en clusters à l'aide de la méthode de la Classification Hiérarchique Ascendante (Distance Génétique)**

Sur la base des caractères étudiés, en appliquant la méthode classification hiérarchique Ascendante (CHA), les populations et variétés ont été regroupées sous différents clusters. Le dendrogramme a divisé les populations et variétés en trois groupes principaux (Figure 32).

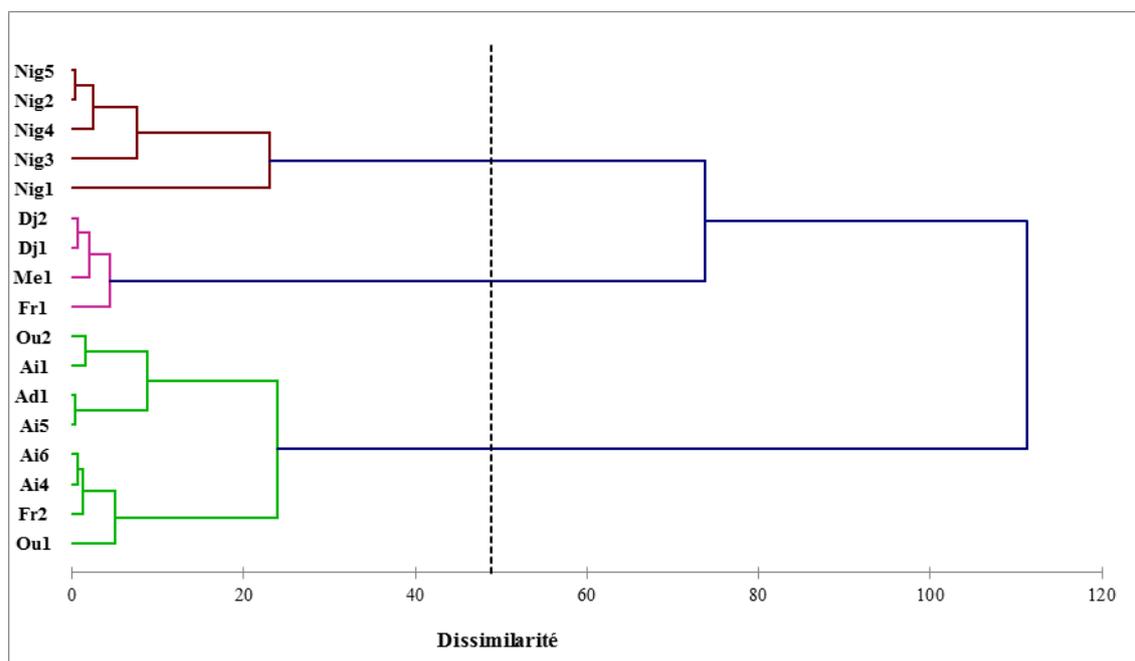
Le premier cluster a été produit à une distance génétique de 24, il contenait sept populations locales du sud algérien et l'hybride Fr2. Donc nos populations locales originaires de notre Sahara sont caractérisées par de bons caractères foliaires avec une floraison tardive.

Nos populations ressemblent aux races Durra et Caudatum par la couleur blanche du grain, et ces deux races sont connues pour être bien adaptées aux conditions de sécheresse. Ces résultats sont en accord avec ceux de Deu et *al.* (2006). La présence de l'hybride Fr2 parmi la classe de nos populations locales explique d'une partie les mêmes origines de cet hybride et nos populations. Durra et Caudatum sont bien adaptés aux conditions de sécheresse (Doggett 1988).

Le groupe 2 comprenait quatre variétés hybrides dont le témoin Fr1 à un coefficient de dissimilarité génétique de 4,6. Ces variétés sont caractérisées par une bonne hauteur finale de la plante, des panicules larges et longues et une exsertion pédonculaire longue. Ces caractéristiques sont très similaires à la race Guinée qui présentait une grande diversité (Abraha et *al.*, 2015).

Le troisième groupe comprenait cinq variétés du Niger à une distance génétique de 23. Ces populations sont similaires à la race Kafir, avec une faible largeur paniculaire et une

faible surface foliaire (Deu et *al.*, 2006), elles présentaient en général de faibles résultats avec une hauteur finale moyenne.



**Figure 32.** Dendrogramme des 17 populations et variétés (essai n°1) par la méthode de Classification Hiérarchique Ascendante sur la base des distances euclidiennes déduites des moyennes des variables mesurées.

Si nous mettons l'axe de dissimilarité sur la distance 80, nous pouvons déduire que les variétés du Niger et les variétés hybrides se ressemblent, mais il sera clair que les populations algériennes se distinguent aussi dans ces conditions dans un cluster séparé. Cependant, les populations algériennes présentent une diversité avec ce qui vient de l'étranger. La caractérisation des génotypes et leur regroupement sur la base de leurs caractéristiques morphologiques et de leur dissimilarité génétique aideront à identifier et sélectionner les meilleurs parents pour les hybridations (Souza et Sorrells, 1991).

### III.2.8. Structuration agro-morphologique des échantillons à l'aide de la méthode de l'Analyse Factorielle Discriminante

Pour comprendre l'importance des paramètres dans les deux composantes principales, une analyse discriminante a été réalisée en utilisant les trois classes obtenues du CHA comme variable catégorielle. Les caractères *LongF*, *LongPan* et *Exs* apparaissent comme les

descripteurs les plus discriminants, avec des contributions étroites ( $F = 47,584$ ,  $\text{Lambda} = 0,128$ ,  $P < 0,0001$ ,  $F = 22,09$ ,  $\text{Lambda} = 0,240$ ,  $P < 0,0001$  et  $F = 21,879$ ,  $\text{Lambda} = 0,242$ ,  $P < 0,0001$  respectivement) (Tableau 12).

**Tableau 12.** Test d'égalité unidimensionnel des classes pour les 18 paramètres étudiés.

Variable	1	2	3	Lambda	F	Prob.
<b>LongF</b> / cm	71,66 <sup>a</sup>	73,41 <sup>a</sup>	50,78 <sup>b</sup>	0,240	22,09	< <b>0,0001</b>
<b>LargF</b> / cm	-	-	-	-	-	-
<b>SurfF</b> / cm <sup>2</sup>	360,70	287,09	174,38	0,300	16,299	0,0002
<b>PFF</b> / g	7,11	4,77	2,84	0,337	13,791	0,0005
<b>PSF</b> / g	2,43	1,80	1,10	0,363	12,274	0,0008
<b>MSF</b> / %	34,49	38,48	39,38	0,457	8,294	0,0042
<b>HautFin</b> / cm	169,39	247,82	167,40	0,297	16,535	0,0002
<b>VitCr</b> / cm par jour	-	-	-	-	-	-
<b>NbF</b>	8,96	8,67	7,15	0,668	3,483	0,0592
<b>NbT</b>	2,62	4,42	2,66	0,287	17,389	0,0002
<b>DiamT</b> / mm	13,00	10,94	8,78	0,3143	15,2720	0,0003
<b>SPAD</b> / sans unité	38,38	44,30	42,41	0,415	9,849	0,0021
<b>LongPan</b> / cm	16,46 <sup>c</sup>	33,43 <sup>a</sup>	23,21 <sup>b</sup>	0,242	21,879	< <b>0,0001</b>
<b>LargPan</b> / cm	5,37	11,51	4,72	0,319	14,913	0,0003
<b>Vig</b> / de 1 à 10	5,83	7,11	5,19	0,289	17,220	0,0002
<b>Exs</b> / cm	7,28 <sup>c</sup>	23,72 <sup>a</sup>	17,02 <sup>b</sup>	0,128	47,584	< <b>0,0001</b>
<b>ApPan</b> / nb de jours	-	-	-	-	-	-
<b>Flor</b> / nb de jours	-	-	-	-	-	-

Prob. en gras sont les plus influencée par le génotype et l'année ;  $\lambda$  : Lambda de Wilks ; **F** : coefficient de Snedecor-Fisher. **LongF** : Longueur feuille, **LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **PFF** : Poids frais feuille, **PSF** : Poids sec feuille, **MSF** : Matière sèche feuille, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **NbF** : Nombre de feuilles, **NbT** : Nombre de tiges, **DiamT** : Diamètre tige, **SPAD** : Taux de chlorophylle, **LongPan** : Longueur paniculaire, **LargPan** : Largeur paniculaire, **Vig** : Vigueur, **Exs** : Exsertion pédonculaire, **ApPan** : Apparition paniculaire, **Flor** : Floraison.

En se basant sur les résultats de l'analyse discriminante, nous constatons que les populations locales caractérisées par leurs supériorité des paramètres foliaires comme la longueur de la feuille (*LongF*), une faible longueur paniculaire (*LongPan*) et surtout une très faible exsertion pédonculaire (*Exs*) sont classées séparément. Les variétés hybrides commercialisées sur le marché algérien se caractérisent par une longue exsertion et de longues panicules mais avec des feuilles courtes. Finalement, les variétés du Niger se caractérisent par de courtes feuilles mais avec des panicules moyennement longues et une exsertion pédonculaire moyenne. Pour des accessions de la Zambie, Ng'uni et *al.* (2011) ont constaté des résultats similaires par rapport à la longueur paniculaire et aussi à la hauteur finale et la date de floraison. Suivant la longueur du pédoncule et sa capacité à dégager la panicule de la dernière feuille, le caractère discrimine les variétés à bonne exsertion paniculaire de celle à médiocre voire mauvaise exsertion (Chantereau et *al.*, 2013).

Dans l'étude de l'essai n°1, l'analyse descriptive a montré une large variabilité du coefficient de variance :  $CV > 50\%$  pour *l'Exs*, *LargPan* et *PPF*. L'analyse de la variance a révélé des différences statistiques significatives entre les populations locales et celles importées pour l'ensemble des paramètres étudiés dont les paramètres foliaires émergent. La population locale Ai1 a présenté les longueurs feuilles les plus élevées ( $77,82 \pm 2,02\text{cm}$ ) par rapport à la variété Nig1 ( $39,58 \pm 0,49\text{cm}$ ) du Niger. L'hybride Fr1 a donné la hauteur la plus élevée ( $286,7 \pm 2,54\text{cm}$ ).

Dans l'étude de l'essai n°1, nous avons constaté que la hauteur finale de la plante, le nombre de jours pour atteindre l'apparition paniculaire et la floraison ont été influencés par le génotype au détriment de l'environnement et répondraient positivement à la sélection en fonction d'une héritabilité élevée.

L'ACP fait ressortir l'importance des paramètres de la feuille (*LargF*, *PPF*, *PSF*, *SurfF*) sur la distinction des populations algériennes sur un quadrant à part avec une fréquence de 50,9% du PC1. Les paramètres *LargPan*, *HautFin* et *Vig* ont contribué à la variation totale du PC2.

Les paramètres *LargF*, *LongPan* et *Exs* discriminent au mieux la distribution des échantillons durant l'ACP et la CHA. On observe certaines ressemblances entre les variétés du Niger et celles originaires des pays développés au détriment des populations algériennes. Ceci explique la large diversité entre le matériel génétique local et celui qui vient de l'étranger dont nous recommandons d'utiliser l'échange de certains marqueurs génétiques de ces échantillons afin d'obtenir et d'élargir une variation génétique locale des génotypes de reproduction.

### III.3. Etude de la variabilité génétique entre 19 populations locales de sorgho et un hybride de l'essai n°2

#### III.3.1. Caractérisation des 20 échantillons à l'aide des paramètres agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante (analyse descriptive)

Les résultats d'analyse descriptive sur le tableau 13 nous montrent une variation plus élevée des populations et la variété hybride avec un coefficient de variation supérieur à 50% pour la biomasse fraîche (*BioFr*) et le nombre de talles (*NbT*). De faibles valeurs inférieures à 20% (CV < 20%) ont été enregistrés pour l'émergence (*Emerg*), la floraison (*Flor*), l'indice fourrager (*IndFour*) et la matière sèche feuille (*MSF*). Le reste des paramètres ont donné des niveaux modérés (20% < CV < 50%). Les résultats d'analyse descriptive de l'essai n°2 seront discutés d'avantage dans le sous-chapitre « III.3.6 ».

**Tableau 13.** Analyse descriptive des résultats des paramètres étudiés agro-morphologiques des 20 populations et la variété hybride de l'essai n°2.

	<b>Marqueur</b>	<b>Moy</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Ecart type</b>	<b>CV%</b>
1	<i>LargF / cm</i>	7,60	4,30	14,30	1,70	22,35
2	<i>SurfF / cm<sup>2</sup></i>	401,00	138,12	1013,53	175,69	43,81
3	<i>MSF / %</i>	38,99	24,31	83,86	7,11	18,23
4	<i>BioFr / T</i>	96,56	29,02	291,31	59,38	61,50
5	<i>BioSèch / T</i>	17,28	6,73	39,66	8,49	49,13
6	<i>IndFor / sans unité</i>	0,41	0,29	0,61	0,07	16,29
7	<i>NbT</i>	2,39	1,00	8,00	1,46	60,98
8	<i>DiamT / mm</i>	14,47	5,85	33,51	4,95	34,19
9	<i>Emerg / %</i>	89,32	29,17	100,00	12,24	13,70
10	<i>HautFin / cm</i>	193,70	93,00	389,00	57,70	29,79
11	<i>VitCr / cm par jour</i>	3,92	0,25	12,63	1,94	49,58
12	<i>Flor / nb de jours</i>	91,38	70,00	123,00	14,49	15,85

**LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **MSF** : Matière sèche feuille, **BioFr** : Biomasse fraîche, **BioSèch** : Biomasse sèche, **IndFour** : Indice fourrager, **NbT** : Nombre de talles, **DiamT** : Diamètre tige, **Emerg** : Emergence, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **Flor** : Floraison.

#### III.3.2. Analyse de la variance (ANOVA) des variables agro-morphologiques de la plante

Les résultats de l'analyse de la variance (ANOVA) ont montré des différences significatives pour l'ensemble des paramètres étudiés. Le test des comparaisons multiples de Duncan a été utilisé pour distinguer les groupes homogènes (Annexe 4).

La population Ai19 a montré des rendements très élevés en biomasse fraîche (*BioFr*) avec plus de 260 tonnes, en biomasse sèche (*BioSèch*) avec plus de 38 tonnes, d'une surface

foliaire de plus de 877 cm<sup>2</sup>, de diamètre tige (*DiamT*) avec plus de 24 mm et d'une hauteur finale (*HautFin*) supérieure à 317cm (Figure 33-d, e, h, j). Cependant, de faibles teneurs en matière sèche des feuilles (*MSF*, 31.05%) ont été enregistrées, de faible accumulation de la biomasse exprimée par l'indice fourrager (*IndFour*, 0.31) et d'une faible vitesse de croissance (*VitCr*, 1.88cm) (Figure 33-f, k).

La population Ai9 a également présenté des feuilles très larges (*LargF*, 12,18cm) et automatiquement une grande surface foliaire (*SurfF*, 909cm<sup>2</sup>). Les populations Ai19, Ai40 et Ai30 ont révélé des faibles scores du nombre de talles (*NbT*) (Figure 33-a, b, g).

La variété hybride témoin Fr1 a montré des taux de croissance élevés (*VitCr*, 7,28cm par jour) et de nombre de talles par plantes (*NbT*, 5,5 talles). De bonnes valeurs de la hauteur finale (*HautFin*) et de l'indice fourrager (*IndFour*) contre de faibles scores de *LargF*, *SurfF*, *DiamT* et *Flor*. La population locale Ai13 a montré l'indice fourrager (*IndFour*) le plus élevé avec 0,56 et un cycle le plus court avec 75 jours de la floraison (*Flor*) (Figure 33).

Un cycle végétatif long a été observé chez certaines races locales telles que les populations Ai9, Ai19, Ai29, Ai30 et Ai40 correspondant à 113, 120, 115, 109 et 106 jours. Un cycle végétatif modéré a été trouvé chez de nombreuses populations locales à savoir Ai24, Ai33, Ai14, Ai8, Ai16, Ai42, Ai34 et Ai36 avec un intervalle entre 81 et 87 jours. La variété hybride Fr1 et les populations locales Ai12, Ai13 et Ai18 ont donné des cycles végétatifs courts (*Flor*) avec des valeurs inférieures à 80 jours après semis (Figure 33-1).

### **III.3.3. Analyse des corrélations entre les paramètres agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante**

La majorité des marqueurs phénotypiques étudiés ont révélé des corrélations entre eux. Nous avons 52 corrélations significatives parmi les 66 corrélations trouvées entre les caractères quantitatifs étudiés (Tableau 14).

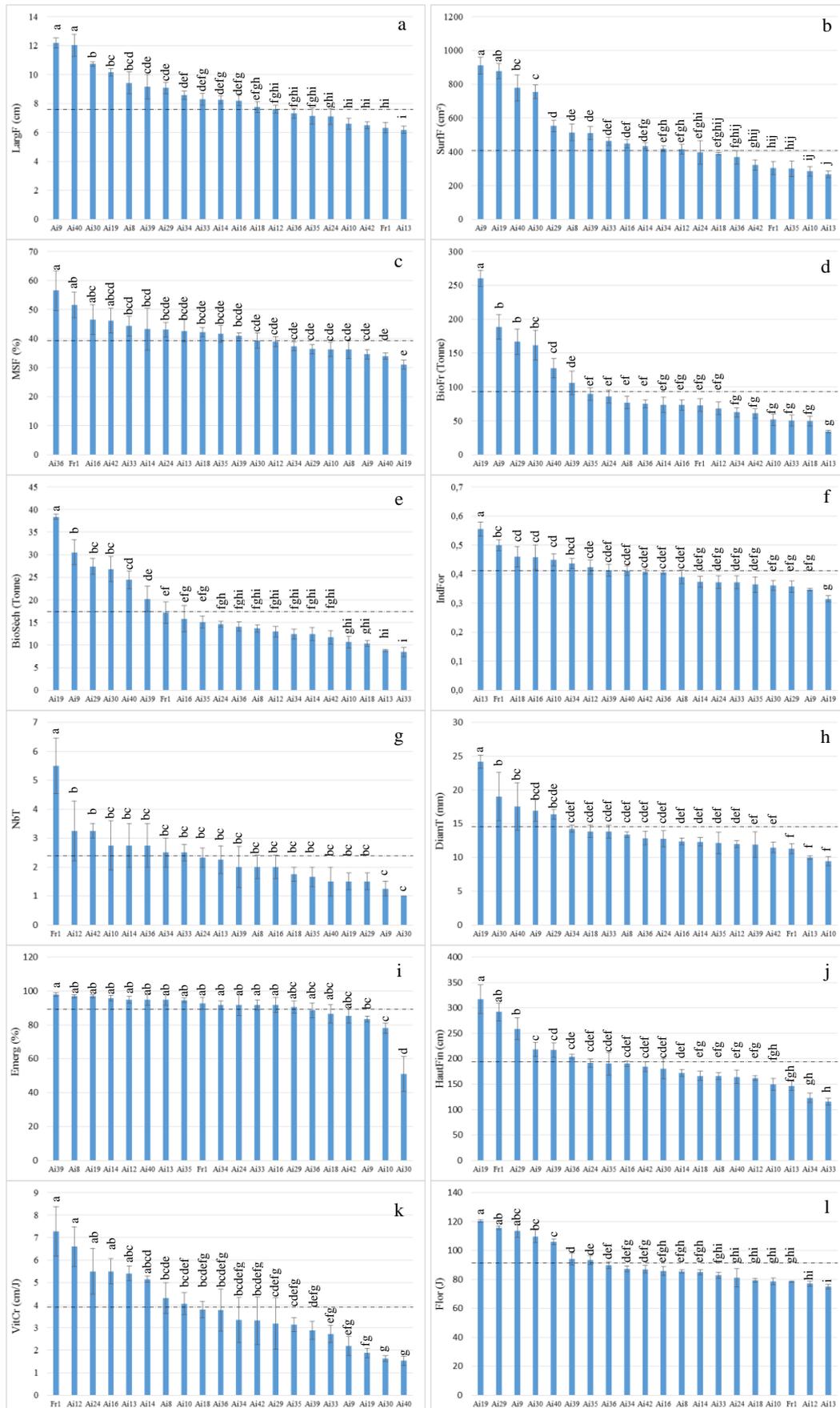


Figure 33. Diagrammes de comparaison des paramètres agro-morphologiques des populations et la variété hybride de l'essai n°2.

**Tableau 14.** Coefficients de corrélation entre les différents paramètres agro-morphologiques étudiés deux à deux (Pearson) pour les 20 populations et la variété hybride de l'essai n°2.

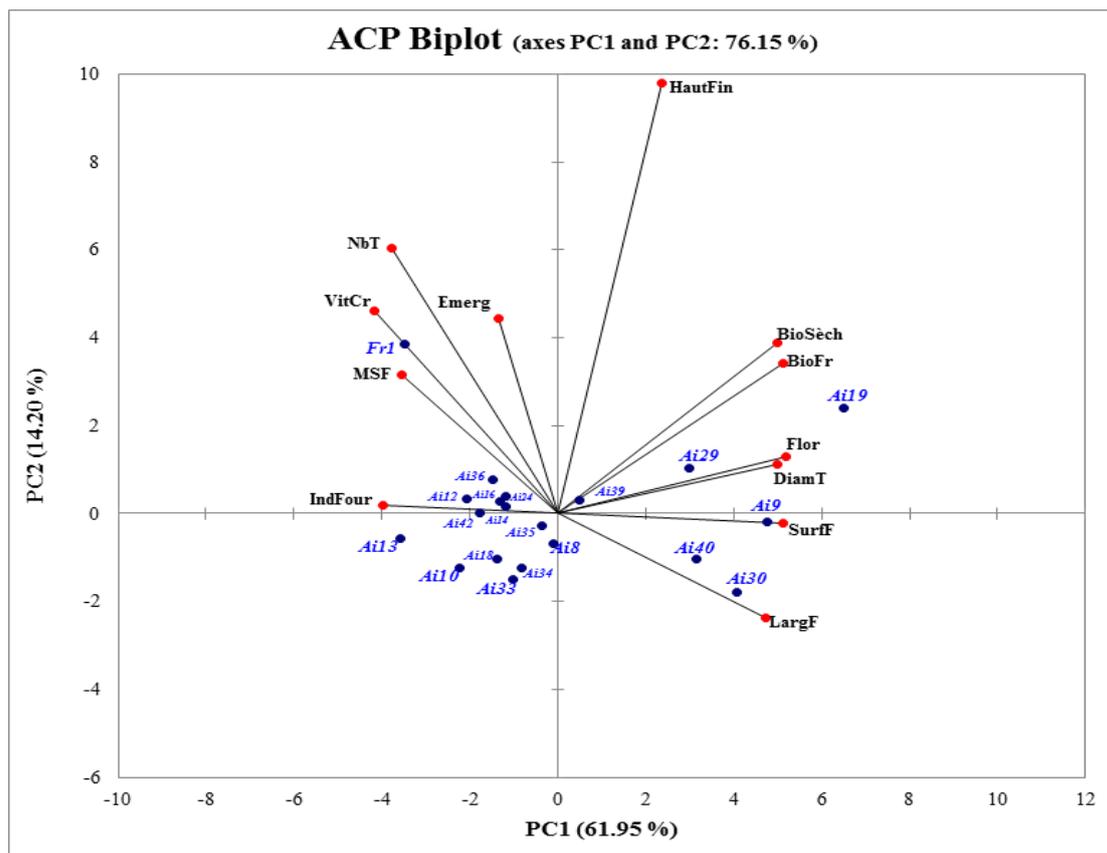
	<i>LargF</i>	<i>SurfF</i>	<i>MSF</i>	<i>BiomFr</i>	<i>BioSèch</i>	<i>IndFour</i>	<i>NbT</i>	<i>DiamT</i>	<i>Emerg</i>	<i>HautFin</i>	<i>VitCr</i>
<i>SurfF</i> / cm <sup>2</sup>	0,92**										
<i>MSF</i> / %	-0,47*	-0,47*									
<i>BioFr</i> / T	0,65**	0,81**	-0,35*								
<i>BioSèch</i> / T	0,67**	0,80**	-0,33*	0,97**							
<i>IndFour</i> / sans unité	-0,47*	-0,53	0,18*	-0,63**	-0,49*						
<i>NbT</i>	-0,43*	-0,41	0,37*	-0,36*	-0,32*	0,34*					
<i>DiamT</i> / mm	0,58*	0,69**	-0,32*	0,64**	0,61**	-0,45*	-0,35*				
<i>Emerg</i> / de 1 à 10	-0,17	-0,21	0,09	-0,12	-0,11	0,14	0,19	-0,24*			
<i>HautFin</i> / cm	0,13	0,32*	0,00	0,64**	0,66**	-0,26*	0,01	0,31*	0,14		
<i>VitCr</i> / cm par jour	-0,45*	-0,46*	0,25*	-0,40*	-0,35*	0,39*	0,38*	-0,38*	0,17	0,06	
<i>Flor</i> / nb de jours	0,67**	0,77**	-0,33*	0,84**	0,83**	-0,57*	-0,45*	0,61**	-0,14	0,46*	-0,61**

\*: signification modérée ; \*\*: signification élevée ; \*Significatif à  $\alpha = 0.01$ ; **LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **MSF** : Matière sèche feuille, **BioFr** : Biomasse fraîche, **BioSèch** : Biomasse sèche, **IndFour** : Indice fourrager, **NbT** : Nombre de talles, **DiamT** : Diamètre tige, **Emerg** : Emergence, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **Flor** : Floraison.

La *Flor* a été fortement et positivement corrélé avec *BioFr*, *BioSèch*, *SurfF*, *LargF*, *DiamT* et négativement avec *VitCr* et *IndFour*. Le *DiamT* a été également fortement et positivement corrélé avec *SurfF*, *BioFr* et *BioSèch*. La *HautFin* a été fortement corrélé avec *BioFr* et *BioSèch*.

### III.3.4. Analyse des composantes principales des paramètres agro-morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante

Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée à partir de 12 marqueurs. Les deux premières composantes ont mieux résumé les informations fournies par toutes les variables et elles ont montré ensemble plus de 76% de l'information contenues dans l'ensemble des données. La première composante principale expliquait à elle seule plus de 61% de la variation, principalement due à une variation positive en *Flor*, *DiamT*, *BioFr*, *SurfF*, *BioSèch*, *LargF* et négativement sur la *VitCr*. *Flor-DiamT* et *BioFr-BioSèch* ont été fortement et positivement corrélés (Figure 34).



**Figure 34.** Distributions des populations et la variété hybride du sorgho de l'essai n°2 et valeurs de leurs paramètres agro-morphologiques autour des axes principaux PC1 et PC2 de l'Analyse en Composantes Principales.

La deuxième composante principale (PC2) a expliqué jusqu'à 14 % de la variation totale. Cette variation a été dominée principalement par la *HautFin* (Figure 34 et Tableau 15). La troisième composante a été dominée principalement par le paramètre Emergence (*Emerg*) (Tableau 15).

La répartition des échantillons étudiés, selon les paramètres analysés, a indiqué que la variété hybride et les populations étudiées ont été regroupées sur les quatre quadrants montrant une grande variabilité génétique. Du côté positif du PC1, les génotypes Ai19, Ai9, Ai30, Ai40 et Ai29 ont été caractérisés par un excellent rendement fourrager (*BioFr* et *BioSèch*), un score élevé des marqueurs foliaires et *DiamT*. La population Ai13 et la variété hybride Fr1 sur le même axe du côté négatif, ont montré des scores élevés pour l'*IndFour*, le *NbT* et la *VitCr* (Figure 34).

**Tableau 15.** Projections des différents paramètres agro-morphologiques des 20 populations et la variété hybride de l'essai n°2, sur les deux premiers axes PC1 et PC2 de l'analyse des composantes principales.

Paramètres	Composantes principales		
	PC1	PC2	PC3
<i>LargF / cm</i>	<b>0,754</b>	0,044	0,017
<i>SurfF / cm<sup>2</sup></i>	<b>0,886</b>	0,000	0,002
<i>MSF / %</i>	<b>0,426</b>	0,078	0,217
<i>BioFr / T</i>	<b>0,889</b>	0,091	0,001
<i>BioSèch / T</i>	<b>0,849</b>	0,117	0,003
<i>IndFor / sans unité</i>	<b>0,539</b>	0,000	0,000
<i>NbT</i>	<b>0,483</b>	0,284	0,014
<i>DiamT / mm</i>	<b>0,845</b>	0,010	0,001
<i>Emerg / de 1 à 10</i>	0,062	0,154	<b>0,694</b>
<i>HautFin / cm</i>	0,189	<b>0,746</b>	0,016
<i>VitCr / cm par jour</i>	<b>0,593</b>	0,166	0,012
<i>Flor / nb de jours</i>	<b>0,919</b>	0,013	0,007

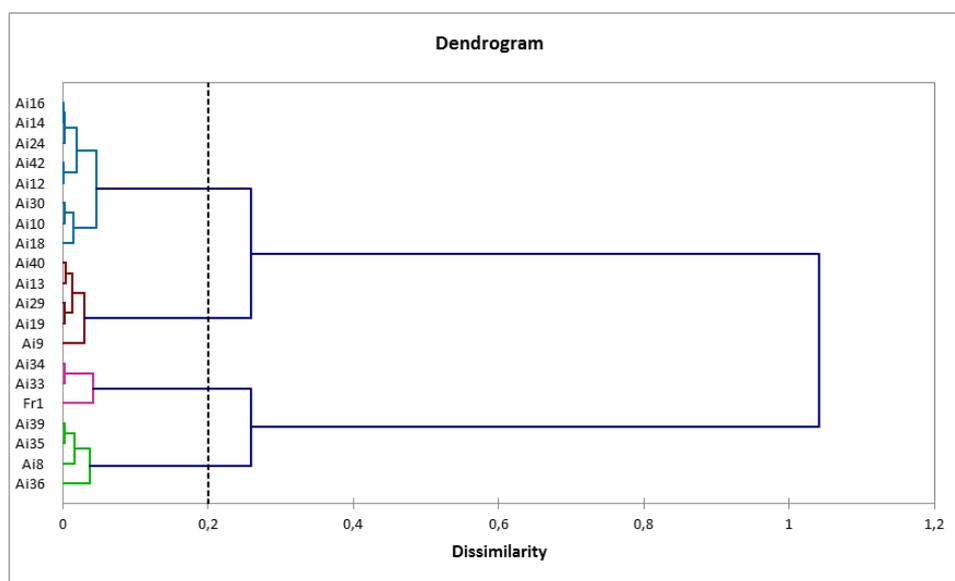
**LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **MSF** : Matière sèche feuille, **BioFr** : Biomasse fraîche, **BioSèch** : Biomasse sèche, **IndFour** : Indice fourrager, **NbT** : Nombre de talles, **DiamT** : Diamètre tige, **Emerg** : Emergence, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **Flor** : Floraison.

Le Tableau 15 nous montre les fréquences des corrélations significatives des trois premiers axes. Seuls les deux premiers axes sur 12 axes, qui ont présenté des corrélations importantes.

### III.3.5. Structuration agro-morphologique des 20 populations et la variété hybride en clusters à l'aide de la méthode de la Classification Hiérarchique Ascendante (Distance génétique)

Sur la base des 12 marqueurs quantitatifs étudiés, la relation entre les échantillons a été évaluée à l'aide d'une classification hiérarchique (Figure 35). À une distance génétique de 0,2, le dendrogramme a montré que les 20 populations et la variété hybride ont été facilement discriminées et regroupées sous quatre groupes.

Le premier groupe a réuni les populations Ai19, Ai9, Ai29, Ai13 et Ai40. Ces populations sont caractérisées par des feuilles les plus larges, une surface foliaire la plus élevée, les rendements les plus élevés en biomasse fraîche et sèche et enfin un cycle long par le nombre élevé de jours jusqu'au 50% de la floraison.



**Figure 35.** Dendrogramme des 20 populations et la variété hybride (essai n°2) par la méthode de Classification Hiérarchique Principale sur la base des distances euclidiennes déduites des moyennes des variables mesurées.

Le deuxième groupe a été constitué des populations Ai30, Ai12, Ai42, Ai14, Ai16, Ai24, Ai10 et Ai18. Ces populations ont présenté la largeur feuille et la surface foliaire les plus faibles, la matière sèche feuille la plus élevée, les productions les plus basses en biomasse fraîche et sèche, le nombre de talles le plus élevé, la tige la plus épaisse et les durées les plus courtes pour atteindre de floraison.

Le troisième groupe a assemblé la variété hybride Fr1 avec Ai33 et Ai34. Ce groupe a regroupé l'hybride Fr1 et les deux populations qui sont caractérisées par des feuilles moins larges et une surface foliaire faible. Elles sont les moins productives avec beaucoup de talles et un cycle court pour atteindre la floraison. Le témoin hybride Fr1 a été séparé des deux autres populations dans le troisième groupe indiquant une vitesse de croissance la plus élevée et une hauteur de la plante la plus élevée aussi.

Les populations Ai8, Ai35, Ai36 et Ai39 qui ont formé le dernier groupe sont caractérisées par la matière sèche foliaire la plus élevée et une valeur moyenne pour tous les autres caractères.

### III.3.6. Discussion de l'essai n°2

La caractérisation morphologique des échantillons aidera à identifier et à choisir les meilleurs parents pour l'hybridation (Souza et Sorrells, 1991). L'aspect morphologique des populations locales appartient aux races Durra, Caudatum ou les races intermédiaires (Figure 30), tandis que la variété hybride Fr1 ressemble à la race Guinea (Harlan et De Wet, 1972 ; Stemler et *al.*, 1977 ; Reddy et Patil, 2015). La préférence du type botanique des deux races Durra et Caudatum, chez les oasiens algériens, pourrait être liée à un héritage culturel en termes de populations traditionnelles, perpétué de génération en génération (Dede et *al.*, 2020).

Chez le sorgho, la floraison a été considérée comme un événement crucial en raison de son rôle clé dans l'adaptation et la répartition géographique (EL Mannai et *al.*, 2011). Il est signalé qu'il y a des types du sorgho à floraison précoce et à hauteur de plante courte. Ces génotypes conviennent aux régions où les précipitations sont limitées et une courte saison de croissance. En revanche, les génotypes les plus précoces en Inde donnent aux sélectionneurs des outils simples pour échapper au stress hydrique (Upadhiaya et *al.*, 2016). De nombreuses échantillons comme les hybrides Fr1, Ai13, Ai12 et Ai10 peuvent être sélectionnées pour leurs précocités avec un plafond de 80 jours. D'autres populations comme Ai9, Ai19, Ai29 et Ai30 se caractérisent par leurs retards atteignant 130 jours. En moyenne pour toutes les populations, la valeur moyenne de la floraison est de 91,38 jours. Nos résultats ont été en accord avec ceux rapportés par Upadhyaya et *al.* (2009) qui ont trouvé 82 jours de floraison parmi 242 accessions de l'Inde, mais moins que celui rapporté par Bello et *al.* (2007) et Dossou-Aminon et *al.* (2015) qui ont enregistré 113 et 138 jours, respectivement au Soudan et au Bénin. Les résultats obtenus sont supérieurs à ceux rapportés par Abu Assar et *al.* (2009) qui ont enregistré 75 jours parmi 40 accessions de sorgho du Soudan.

Parmi les paramètres agro-morphologiques étudiés, la hauteur finale de la plante (*HautFin*) a montré une variation significative. Les deux populations Ai19, Ai29 et l'hybride Fr1 ont donné les plantes les plus hautes, dépassant les 259cm, qui pourraient contribuer d'une manière significative à l'augmentation des rendements en biomasse fraîche et sèche. Ce type de populations est recommandé pour couvrir la demande énergétique de l'élevage (Figure 36).



**Figure 36.** Photo représentant la population locale Ai19 à droite et l'hybride Fr1 à gauche.

D'un autre côté, les populations comme Ai8, Ai12, Ai18, Ai10, Ai13 et Ai40 donnent des plantes courtes avec un maximum de 166cm d'hauteur finale de la plante. Les plantes les plus courtes aident les chercheurs à trouver des caractères nains très adaptés aux conditions environnementales sèches (House, 1985). La valeur moyenne de la hauteur finale de la plante est de 190,48cm, ce qui est approximativement similaire à celui trouvé par Grenier et *al.* (2004) et Abu Assar et *al.* (2009) au Soudan avec une valeur moyenne de 180cm. Tariq et *al.* (2012) qui ont enregistré environ 145cm parmi 25 géotypes. De nombreuses études ont rapporté que les populations locales sont plus courtes que les variétés européennes ou américaines. En fait, les agriculteurs recherchent des variétés avec une hauteur de plante plus courte car ces dernières ont des tiges plus robustes, plus faciles à récolter mécaniquement tout

en évitant les dommages et les pertes causés par le vent ou d'autres conditions environnementales (Lin et *al.*, 1995 ; Mutava et *al.*, 2011).

Les oasiens de la région du Tidikelt classent les populations de sorgho (tafsout) locales selon les deux critères suivants : la hauteur de la plante et la couleur de la graine. Selon la hauteur, il est classé en sorgho court (tafsout habta ou gsira, hauteur moins de 150 cm) et sorgho long (tafsout touila ou talaa, hauteur supérieure à 180 cm). Selon la couleur de la graine : le sorgho est classé en sorgho rouge (tafsout hamra), le sorgho blanc (tasout el beida) et sorgho de couleur rouge et blanc (tafsout mkhelta)

Le nombre de talles a également révélé une variation significative allant de 1 à 5,5 talles par plante. Les génotypes à faible capacité de production de talles, comme les plus hautes populations locales, nécessitent moins de ressources en eau et sont recommandées dans les régions sèches, en revanche, les génotypes à forte capacité de production de talles comme les plus courts conviennent aux régions potentielles.

Le rendement fourrager est crucial dans les programmes d'amélioration des cultures au profit de l'élevage. Ayub et *al.* (2012) ont constaté que les landraces présentant des valeurs élevées en surface foliaire, en poids frais des feuilles, en poids sec des feuilles, en diamètre des tiges et en hauteur finale de la plante, sont les plus préférées à l'utilisation sous forme de fourrage vert.

Dans le présent travail, les populations Ai9, Ai19 et Ai29 semblent être une bonne source de biomasse fraîche ou sèche atteignant respectivement 260 et 38 tonnes, ces populations ont présenté les valeurs les plus élevées des caractéristiques de la feuille et de la tige. La largeur des feuilles a donné une valeur moyenne de 8,43cm pour l'ensemble des échantillons de notre étude (Figure 37). Ces résultats se ressemblent à ceux enregistrés par Adugna (2014) et Dossou-Aminon et *al.* (2015) en Ethiopie et au Bénin avec 8,2 et 7,52cm respectivement.



**Figure 37.** Photo montrant la large variabilité enregistrée et les potentialités fourragères chez les populations locales.

La corrélation positive entre la hauteur de la plante et la floraison a été rapportée par Zongo *et al.* (1993) et Kebede *et al.* (2001). La surface foliaire est corrélée positivement avec la longueur et la largeur feuille (Shegro *et al.*, 2013). Plus de 75% des corrélations étaient significatives et nous remarquons que *BioFr*, *BioSèch*, *SurfF*, *Flor* et *DiamT* ont montré de fortes corrélations positives. Les populations présentant des valeurs élevées de ces paramètres peuvent être exploitées directement pour la production de biomasse et/ou d'être intégrées dans des programmes de sélection.

La présente étude a montré une contribution importante de la première composante principale dans la variabilité totale. Ceci est tout à fait en accord avec les recherches de Mujaju et Chakuya (2008) sur des landraces du Zimbabwe. De plus, Mulima *et al.* (2018) a enregistré dans des échantillons au Mozambique, comme notre étude, que la floraison est le caractère principal de la première composante principale, tandis que les marqueurs foliaires ont été trouvés parmi les caractères qui contribuent sur le premier axe. Les marqueurs *Flor*, *SurfF*, *DiamT*, *BioFr*, *BioSèch* et *Lwid* ont montré une grande influence sur la distribution des données sur les deux premières composantes principales (Figure 34, Tableau 15). Cependant,

certaines populations locales telles que les populations Ai19, Ai9, Ai29, Ai30 et Ai40 avaient une valeur de charge factorielle positive sur le premier composant majeur. L'hybride témoin Fr1, connu par une hauteur élevée, avait une charge factorielle négative à gauche de la première composante mais sur la partie positive de la deuxième composante qui représentait plus de 14% de l'information.

Ces résultats confirment l'importance de certaines populations locales algériennes par rapport à l'hybride pour les marqueurs évoqués. Ces résultats sont en accord avec Kavithamani et *al.* (2019) qui ont trouvé que les paramètres morphologiques importants de PC1 sont dus à des variations entre les populations et variété et ceci confirme que les races locales algériennes présentaient de bons caractères pour des futurs programmes de sélection.

Le dendrogramme de la classification hiérarchique définissait clairement les différences dans la distribution des caractères quantitatifs, qui se reflétaient dans la séparation des populations et la variété hybride (Figure 35). Les génotypes au sein des mêmes groupes peuvent provenir de fonds génétiques similaires.

Dans l'étude de l'essai n°2, l'analyse descriptive des paramètres quantitatifs étudiés a révélé une large diversité avec un coefficient de variation supérieure à 50% pour *BioFr* et *NbT*. Des CV modérés pour *LargF*, *BioSèch*, *SurfF*, *VitCr*, *DiamT* et *HautF*. Des CVs faibles inférieurs à 20% pour le reste des paramètres.

L'analyse de la variance a révélé chez deux populations locales (Ai19 et Ai9) une surface foliaire élevée (>900 cm<sup>2</sup>) avec des feuilles larges (>10 cm), une bonne biomasse sèche (>30 tonnes) et des diamètres de tiges les plus épais (>16 mm) mais avec un cycle long (>113 j) et un indice fourrager le plus faible d'environ 0,3. Fr1 et Ai13 ont montré un indice fourrager le plus élevé (>0,5) avec un cycle court (<80 j).

Cette diversité enregistrée pourrait résulter d'une variation du génotype suite à l'existence d'une forte variabilité phénotypique entre les populations et variété étudiées.

Les agriculteurs (Oasiens) du Sud algérien préfèrent les populations locales devant les hybrides suite aux problèmes rencontrés avec ces hybrides. Cependant, une classification locale est adoptée, à savoir le sorgho long et le sorgho court, et le sorgho blanc et le sorgho rouge, pour faire une distinction entre leurs semences. Nous pouvons confirmer cette classification lorsqu'on trouve des populations courtes et d'autres hautes avec la couleur blanche des graines ou la couleur rouge. Les hybrides ne répondent pas à cette classification oasienne à cause de l'éloignement claire des caractères.

Les oasiens préfèrent, voire exigent, leurs semences proches botaniquement des deux races Durra et Caudatum. Ceci pourrait être lié à un héritage culturel (Afrique) en termes de populations traditionnelles chez les oasiens algériens, perpétué de génération en génération.

Suite à des résultats satisfaisants des paramètres foliaires, l'amélioration de la qualité fourragère du sorgho algérien est devenue possible si nous nous basons sur un matériel végétal local. Notre étude démontre que les paramètres agro-morphologiques sont des outils très utiles pour détecter la large variation entre les populations locales ceci nous encourage et nous incite à nous lancer dans des programmes d'obtention variétale (au moins des hybrides locaux).

# **Conclusion**

## CONCLUSION

La finalité des travaux de cette thèse est une contribution à la description et l'analyse de la diversité du sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), cultivé dans les régions hyper arides du Sahara de l'Algérie.

L'approche adoptée a consisté à la constitution d'une collection, les installations des essais *ex-situ* de culture de la céréale dans la station expérimentale de l'ENSA, El Harrach, l'évaluation des caractères agro morphologiques quantitatifs de la partie végétative de la plante et des analyses statistiques des données expérimentaux.

Parmi les objectifs de ces travaux : (i) l'analyse de certains caractères agromorphologiques des populations de sorgho cultivées en Algérie, (ii) l'évaluation de la variabilité phénotypique et la diversité génétique des populations et variétés de sorgho et, (iii) la mise en évidence des propriétés phénotypiques spécifiques des populations locales pour se préparer à lancer de futurs programmes de sélection et d'amélioration du sorgho local.

Deux classes d'échantillons ont été collectées. La première est un matériel végétal local acquis suite à des prospections sur terrain dans les wilayas suivantes du Sahara : Adrar, Illizi, Ouargla, Ghardaïa, In Salah (région de Tidikelt) et une visite de la collection du sorgho local du Laboratoire de recherche : LEDTEGE, de l'Ecole Normale Supérieure, El Cheikh Mohamed El Bachir El Ibrahim, Alger. La deuxième représente des variétés étrangères demandées auprès de plusieurs organismes internationaux : INRAN (Niger), CAUSSADE (France); et d'autres variétés introduites (originaires des USA), procurées au niveau des grenetiers comme semence commerciale.

Les prospections des régions du Sahara de l'Algérie ont aidé à la mise en évidence d'un nombre appréciable de populations du sorgho local, d'une variabilité phénotypique considérable. Ces populations de céréales possèdent la particularité de pousser dans des conditions de température élevée, sur des sols parfois très salés et des eaux d'irrigation

souterraines connues aussi par leur salinité. Cette culture reste toujours à l'échelle traditionnelle, elle est sous exploitée et utilisée essentiellement comme plante fourragère. Les agriculteurs de ces régions conservent les semences d'une manière traditionnelle et vu les changements socio-économiques dans ces régions, ces ressources sont menacées de disparition. Selon les indications données dans les travaux de recherches de Harlan et De Wet (1972), Stemler et *al.* (1977), Paterson (2013), Reddy et Patil (2015) et Wang et *al.* (2015), nous déduisons que les populations locales sont similaires aux races Durra et Caudatum ou bien à des races intermédiaires. La race Durra est habituellement colorée en jaune et Caudatum en couleur blanche. La panicule compacte et les graines à prédominance blanche de la race Durra étaient des indications d'adaptation à des environnements à faibles précipitations avec un faible risque de moisissure (Paterson, 2013).

Les oasiens de la région du Tidikelt classent les populations de sorgho locales (tafsout) selon les deux critères suivants : la hauteur de la plante et la couleur de la graine. Selon la hauteur il est classé en sorgho court (tafsout habta ou gsira, hauteur environ 150 cm) et sorgho haut (tafsout touila ou talaa, hauteur supérieure à 180 cm). Selon la couleur de la graine : le sorgho est classé en sorgho rouge (tafsout el hamra), le sorgho blanc (tasout el beida) et sorgho de couleur rouge et blanc (tafsout mkhelta)

La culture des échantillons a été effectuée dans deux essais de culture comme suit : l'essai n°1 : culture des 17 échantillons (07 locaux et 10 introduits importés) durant deux années successives (2013 et 2014) ; l'essai n°2 : culture de 20 échantillons issus d'une seule région du Sahara : Tidikelt à la wilaya d'In Salah.

Dans l'étude de l'essai n°1, l'analyse descriptive a montré une large variabilité, une valeur de la variance supérieure à 50% ( $CV > 50\%$ ) pour l'exsertion, la largeur de la panicule et le pois frais des feuilles ; des valeurs faibles ( $CV < 20\%$ ) pour la Floraison, l'apparition paniculaire, la matière sèche fraîche, le taux de chlorophylle et la vigueur ; et des valeurs

modérées pour le reste des paramètres. L'analyse de la variance a révélé des différences statistiques significatives entre les populations locales et celles importées pour l'ensemble des paramètres étudiés dont les paramètres foliaires émergent. La population locale Ai1 a présenté les longueurs des feuilles les plus élevées ( $77,82 \pm 2,02\text{cm}$ ) par rapport à la variété importée du Niger : Nig1 ( $39,58 \pm 0,49\text{cm}$ ). La variété hybride française Fr1 a donné la hauteur la plus élevée ( $286,7 \pm 2,54\text{cm}$ ). Donc une grande diversité agro-morphologique entre les populations locales, en comparaison avec les variétés introduites soit du Niger ou de l'Europe et des USA, a été enregistrée.

Dans cet essai des niveaux variés d'héritabilité ( $H^2$ ) ont été enregistrés ; ils expliquaient que le génotype jouait un rôle plus important que l'environnement et ils décrivaient donc la variabilité phénotypique entre les populations et les variétés introduites de notre essai. La hauteur finale de la plante, le nombre de jours pour atteindre l'apparition paniculaire et la floraison ont été influencés par le génotype (facteur génotype) au détriment de l'environnement (facteur année) et répondraient positivement à la sélection en fonction de leur héritabilité élevée.

L'analyse en composante principale (ACP) fait ressortir l'importance des paramètres de la feuille : la largeur de la feuille, le poids de feuilles fraîches, poids de feuilles sèches et surface foliaire ( $LargF$ ,  $PPF$ ,  $PSF$ ,  $SurfF$ ), sur la distinction des populations algériennes sur un quadrant à part avec une fréquence de 50,9% de la composante principale n°1 (PC1). Les paramètres : largeur de la feuille, la hauteur finale et la vigueur ( $LargPan$ ,  $HautFin$  et  $Vig$ ) ont contribué à la variation totale de la composante principale n°2 (PC2).

Les paramètres : largeur de la feuille, longueur de la panicule et l'exsertion ( $LargF$ ,  $LongPan$  et  $Exs$ ) discriminent au mieux la structuration agro-morphologique des 17 échantillons dans l'analyse en composante principale (ACP) et la classification en trois clusters à l'aide de la méthode de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).

D'ailleurs, des ressemblances, sont très prononcées, entre les variétés du Niger et celles venues des pays développés au détriment des populations algériennes. Ceci explique la large diversité entre le matériel génétique local et celui qui vient de l'étranger dont nous recommandons d'utiliser l'échange de certains marqueurs génétiques de ces populations et variétés afin d'obtenir et d'élargir une variation génétique locale du matériel génétique de reproduction.

Dans l'étude de la culture des populations locales de la région du Tidikelt (essai n°2), les résultats de l'analyse descriptive des paramètres quantitatifs ont révélé aussi une large variabilité :  $CV > 50\%$  pour la biomasse fraîche, le nombre de talles, et la vitesse de croissance (*BioFr*, *NbT* et *VitCr*) ; un  $CV < 20\%$  pour l'émergence, la floraison, la matière sèche feuille (*Emerg*, *Flor*, *IndFour* et *MSF*) et un CV modéré pour la largeur de la feuille, la biomasse sèche, la surface foliaire, le diamètre de la tige et la hauteur finale (*LargF*, *BioSèch*, *SurfF*, *DiamT* et *HautF*). L'analyse de la variance, chez les deux populations Ai19 et Ai9, a révélé une surface foliaire élevée avec environ  $900 \text{ cm}^2$  avec feuilles larges de plus de 10 cm, une biomasse sèche dépassant 30 tonnes et des diamètres de tiges les plus épais (plus de 16 mm), mais avec un cycle long de plus de 113 jours pour atteindre la floraison et un indice fourrager le plus faible d'environ 0,3. La variété hybride Fr1 avec la population Ai13 ont montré un indice fourrager le plus élevé de plus de 0,5 avec un cycle court moins de 80 jours. Cette diversité importante entre les populations locales en comparaison avec l'hybride nous encourage à approfondir la recherche dans le domaine. Cette large variation enregistrée pour le cycle végétative et l'exploitation des données des paramètres foliaires : la biomasse sèche, la surface foliaire et l'indice fourrager sont nécessaires et indispensables pour l'amélioration de la qualité fourragère du sorgho algérien.

L'analyse des composantes principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) confirment ces résultats tout en regroupant les 20 populations et variétés

sous quatre clusters. Le premier cluster contient les populations suivantes : Ai19, Ai9 et Ai13. Alors que l'hybride Fr1 se trouve, seulement avec les populations : Ai33 et Ai34, dans le quatrième cluster.

La valorisation du sorgho local originaire du Tidikelt, à cause de sa grande diversité et sa haute qualité, nécessite divers travaux de recherche et mérite une importance particulière. Quelques populations locales, citant principalement : Ai19 et Ai13, ont présenté des caractères particuliers spécifiques à la région.

D'une manière générale, notre étude montre que les paramètres agro-morphologiques sont des outils très utiles pour évaluer de la variabilité génétique, entre des échantillons locaux et importés de sorgho d'une part et dans les échantillons locaux d'autre part. Cette large diversité, enregistrée dans nos travaux nous incite à se lancer dans des programmes d'obtention variétale (au moins des hybrides locaux). D'autre part et suite à des résultats satisfaisants des paramètres foliaires dans les deux essais, l'amélioration de la qualité fourragère du sorgho algérien est devenue possible grâce au choix du bon matériel végétal local.

La grande variabilité observée entre les populations et variétés étudiées des deux essais, constitue un argument de choix pour la conservation de ces populations traditionnelles de sorgho algérien. D'ailleurs la régression de l'utilisation du sorgho d'une année à l'autre fait ressortir l'urgence d'instaurer une stratégie pour encourager d'abord la conservation *in situ* chez les oasiens. Aussi, les pertes probables de cette diversité nous obligent à réagir vite et accorder une attention particulière aux régions qui assurent la pérennité de cette importante source de variabilité.

Comme les deux essais ont été installés dans le même endroit en 2014, une comparaison visuelle sur terrain nous a montré une large diversité entre les populations locales des deux essais. D'ailleurs, le deuxième essai a été installé suite à la diversité

remarqué en 2013. Cependant, nous n'avons pas effectué des comparaisons statistiques entre les données des deux essais, mais nous déduisons des différences sur plusieurs paramètres, tel que la hauteur finale, le diamètre tige, l'exsertion, forme paniculaire, ..., etc.

Il est à signaler qu'une comparaison entre les résultats des deux essais pour l'année 2014 pour certains paramètres seulement, est à valoriser pour tirer le maximum d'informations de notre étude.

Comme perspective et en vue de consolider les résultats déjà obtenus dans notre étude, nous proposons ce qui suit :

- Elargir et multiplier les visites et les prospections pour couvrir tous le territoire algérien et entamer des travaux de sélection pour faire face à la perte sans cesse de notre richesse génétique,
- Réaliser des essais multi-locaux de culture de la céréale,
- Réaliser une évaluation de diversité génétique du sorgho local à l'aide des marqueurs moléculaires, bien qu'une analyse moléculaire a été entamée il y a un bon moment mais malheureusement n'a pas été achevé,
- Réaliser une étude approfondie sur la qualité fourragère des populations locales, par des analyses chimiques et biochimiques de la biomasse pour recueillir des informations sur les qualités nutritionnelles chez les animaux,
- Organiser en urgence la conservation et la gestion des collections de sorgho.

# **Références bibliographiques**

**Références bibliographiques**

1. Abraha T, Githiri SM, Kasili R, Araia W, Nyende AB (2015). Genetic Variation among Sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) Landraces from Eritrea under Post-Flowering Drought Stress Conditions. *Am J Plant Sci*, 6: 1410-1424.
2. Abu Assar AH, Uptmoor R, Abdelmula AA, Wagner C, Salih M, Ali AM, Ordon F, Friedt W (2009). Assessment of Sorghum Genetic Resources for Genetic Diversity and Drought Tolerance Using Molecular Markers and Agro-morphological Traits. *U K J Agric Sci*, 17: 1-22.
3. Adugna A (2014). Analysis of in situ diversity and population structure in Ethiopian cultivated *Sorghum bicolor* (L.) landraces using phenotypic traits and SSR markers. *Springerplus* 3:212.
4. Ali MA, Jabran K, Awan SI, Abbas A, Ehsanullah Zulfikal M, Acet T, Farooq J, Rehman A (2011). Morpho-physiological diversity and its implications for improving drought tolerance in grain sorghum at different growth stages. *Aust J Crop Sci*, 5(3): 311-320.
5. Appa Rao S, Prasada RK, Mengesha M, Reddy GV (1996). Morphological diversity in sorghum germplasm from India. *Genet Resour Crop Evol*, 43: 559-567.
6. Ayana A, Bekele E (1999). Multivariate analysis of morphological variation in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) germplasm from Ethiopia and Eritrea. *Genet Resour Crop Evol*, 273-284.
7. Ayana A, Bekele E (2000). Geographical patterns of morphological variation in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) germplasm from Ethiopia and Eritrea : Quantitative characters. *Euphytica*, 115: 91-104.
8. Ayana A, Bekele E, Bryngelsson T (2000). Genetic variation in wild sorghum (*Sorghum bicolor* ssp. *verticilliflorum* (L.) Moench) germplasm from Ethiopia assessed by random amplified polymorphic DNA (RAPD). *Hereditas*, 132: 249-254.
9. Ayub M, Khalid M, Tariq M, Elahi M, Nadeem (2012). Comparison of sorghum genotypes for forage production and quality. *J Anim Plant Sci*, 22: 733-737.
10. Badri M, BenCheikh N, Mahjoub A, Abdelly C (2016). Morpho-phenological diversity among natural populations of *Medicago polymorpha* of different Tunisian ecological areas. *African J Biotechnol*, 15: 1330-1338.
11. Bantilan MCS, Deb UK, Gowda CLL, Reddy BVS, Obilana AB, Evenson RE (2004). Sorghum genetic enhancement: research process, dissemination and impacts. Patancheru 502 324, Andhra Pradesh, India. 312p.
12. Bello D, Kadamsa M, Simon SY, Mashi DS (2007). Studies on Genetic Variability in Cultivated Sorghum

- (*Sorghum bicolor* L. Moench) Cultivars of Adamawa State Nigeria. *Am J Agric Environ Sci*, 2: 297-302.
13. Berenji J. et Dahlberg J. (2004). Perspectives of Sorghum in Europe. *J Agron Crop Sci*, 1905: 332-338.
  14. Billot C, Rivallan R, Sall MN, Fonckea D, Deu M, Glaszmann JC, Noyer JL, Rami JF, Risterucci AM, Wincker P, Ramu P, Hash CT (2012). A reference microsatellite kit to assess for genetic diversity of *Sorghum bicolor* (Poaceae). *Am J Bot*, 99 (6): 245-250.
  15. Blum A (2011). *Plant Breeding for Water-Limited Environments*. Springer, ISBN 978-1-4419-7490-7. Pp 217-230.
  16. Boudries N, Belhaneche N, Nadjemi B, Deroanne C, Mathlouthi, Roger B, Sindic M (2009). Physicochemical and functional properties of starches from sorghum cultivated in the Sahara of Algeria. *Carbohydr Polym*, 78: 475-480.
  17. Bouderies N (2010). Contribution à la caractérisation physico-chimique et à l'hydrolyse d'amidon de sorgho et de mil chandelle cultivée au sud de l'Algérie. Thèse de doctorat, ENP El-Harrach, Algérie. 197p.
  18. Chandel KPS, Paroda RS (2000). Status of plant genetic resources conservation and utilization in Asia-Pacific region Regional synthesis report Asia-Pacific Association of Agricultural Research Institutions. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, Thailand, 158 p.
  19. Chantereau J (1994). La taxonomie du sorgho. In : Acte de l'atelier de formation sur les variétés locales de sorgho, 10-14 octobre, Bamako/Mali : 17-27.
  20. Chantereau J, Cruz JF, Ratnadass A, Trouche G (2013). *Le Sorgho*, Ed. Quae. CTA, Presses agronomiques de Gembloux. France. ISBN (Quæ) : 978-2-7592-2062-5. 267p.
  21. Chaudhry AR, Ghani AA, Mukhtar AM (1991). Evaluation of two new high yielding varieties of berssem. *Pak J Agric Res*, 12(1): 35-39.
  22. Chaudhry GH, Muhammed R, Ghulam A (2006). Comparison of some advanced lines of *Sorghum bicolor* L. Monech for green fodder/dry matter yields and morpho-economic parameters. *J Agric Res*, 44(3): 191-196.
  23. Chozin M (2007). Characterization of sorghum accessions and choice of parents for hybridization. *J Akta Agr Edisi Khusus*, 2: 227-232.
  24. Clerget B (2004). Le rôle du photopériodisme dans l'élaboration du rendement de trois variétés de sorgho cultivées en Afrique de l'Ouest. Thèse de doctorat de l'INA-PG, PARIS/France. 192p.
  25. Corredor DY, Salazar JM, Hohn KL, Bean S, Bean B, Wang D (2008). Evaluation and characterization of forage sorghum as feedstock for fermentable sugar production. *Appl Biochem Biotechnol*, 158: 164-179.

26. Dahlberg JA (2000). Classification and characterization of sorghum. In: Smith, C.W., Frederiksen, R.A. (Eds.), *Sorghum: Origin, History, Technology, and Production*. Wiley, New York, NY, Pp. 99-130.
27. Dahlberg J, Berenji J, Sikora V, Latkovic D (2011). Assessing sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] germplasm for new traits: food, fuels and unique uses. *Maydica*, 56(1750): 85-92.
28. Dede LE, N'Da HA, Akanvou L, Sie SR (2020). Diversité agro-morphologique et botanique de 357 accessions de sorgho [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] collectées en côte d'ivoire. *Agronomie Africaine*, 32 (3): 297 - 308.
29. Deu M, Rattunde F, Chantereau J (2006). A global view of genetic diversity in cultivated sorghums using a core collection. *Genome*, 49: 168-180.
30. Doggett H (1965). *Striga hermonthica* on sorghum in East Africa. *J Agric Sci*, 65: 183-194.
31. Doggett H (1988). Sorghum. Tropical agricultural series. Longman Scientific, Essex Dong J, Teng W, Buchholz WG, Hall TC (1996) Agrobacterium- mediated transformation of Javanica rice. *Mol Breed*, 2: 167-276.
32. Doggett H (1991). Sorghum history in relation to Ethiopia. In: Plant Genetic Resources of Ethiopia (eds JMM. Engels, JG. Hawkes and M. Worede), Cambridge University Press, Cambridge. Pp140-159.
33. Dossou-Aminon I, Loko LY, Adjatin A, Adjatin A, Ewédjè EEBK, Dansi A, Rakshit S, Cissé Patil NJV, Agbangla C, Sanni A, Akoègninou A, Akpagana K (2015). Genetic divergence in northern benin sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) landraces as revealed by agro-morphological traits and selection of candidate genotypes. *Sci World J*, 2015: 1-10.
34. El Mannai Y, Shehzad T, Okuno K (2011). Variation in flowering time in sorghum core collection and mapping of QTLs controlling flowering time by association analysis. *Genet Resour Crop Evol*, 58: 983-989.
35. El Naim AM, Ibrahim IM, Rahman MEA, Ibrahim EA (2012). Evaluation of Some Local Sorghum (*Sorghum Bicolor* L. Moench) Genotypes in Rain-Fed. *Int J Plant Res*, 2: 15-20.
36. FAO (1991). Annuaire de la production 1990. 44. Série statistique de la FAO n° 99. Rome.
37. FAOSTAT (2021). Food and Agriculture Organization Statistics Data of the United Nations. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> consulté le 10/07/2021.
38. Fellahi ZA (2017). Analyse génétique d'un croisement line x tester, réponse à la sélection et tolérance des stress du blé tendre (*Triticum aestivum* L.) sous conditions semi-arides. Thèse doctorat, Univ. Sétif 1. LVRBN. 181p.
39. GBIF (2021). The Global Biodiversity Information Facility. Copenhagen. Plants of Missouri.

- <https://www.gbif.org/species/4108244>
40. Gerrano AS (2010). Biodiversity in plant, grain and nutritional characteristics of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] accessions from Ethiopia and South Africa. Thèse doctorat, University of the Free State Bloemfontein, South Africa. 164p.
  41. Getachew G, Putnam DH, Ben CM, Peters EJ (2016). Potential of sorghum as an alternative to corn forage. *American Journal of Plant Sciences*, 7: 1106-1121.
  42. Grenier C, Bramel PJ, Dahlberg JA, El-Ahmadi A, Mahmoud M, Peterson GC, Rosenow DT, Ejeta G (2004). Sorghums of the Sudan : analysis of regional diversity and distribution. *Genet Resour Crop Evol*, 51: 489-500.
  43. Fulgueira CL, Amigot SL, Gaggiotti M, Romero LA, Basílico JC (2007). Forage quality: Techniques for testing. *Fresh Produce Journal*, 1: 121-131.
  44. Hadbaoui Z, Djeridane A, Yousfi M, Saidi M, Nadjemi B (2010). Fatty acid, tocopherol composition and the antioxidant activity of the lipid extract from the sorghum grains growing in Algeria. *Med J Nutrition Metab*, 3: 215-220.
  45. Hannachi A (2017). Aptitude à la combinaison, sélection mono et multi caractères et adaptabilité du blé du (*Triticum durum* Desf.) aux conditions semi-arides. Thèse de doctorat, Sétif 1, LVRBN, 177p.
  46. Harlan JR (1992). Crops and Man. Madison, Wisconsin, CSSA, Inc. Pp 272.
  47. Harlan JR, De Wet JMJ (1972) A Simplified Classification of Cultivated Sorghum. *Crop Sci*, 12: 172-176.
  48. Hesketh JD, Chase SS, Nanda DK (1969). Environmental and genetic modification of leaf number in maize, sorghum and Hungarian millet. *Crop Sci*, 19: 460-467.
  49. House LR (1985). A Guide to Sorghum Breeding, Second Edi. Tropics, International Crops Research Institute for the Semi-Arid. Patancheru, India. 206p.
  50. House LR (1987). Manuel pour la sélection du sorgho. Deuxième édition. Crop Research Institute for the Semi-Arid Tropics. 229p.
  51. IBPGR/ICRISAT (1993). Descriptor for Sorghum [*Sorghum bicolor* (L) Moench]. International Board for Plant Genetic Resources; International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics; Rome; Patancheru, India. 38p.
  52. Kamatar MY, Kotragouda M, Shinde DG, Salimath PM (2011). Studies on variability, heritability and genetic advance in F3 progenies of kharif × rabi and rabi × rabi crosses of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Plant Arch*, 11: 899-901.
  53. Kavithamani D, Yuvaraja A, Selvi B (2019). Principal component analysis and grouping of sorghum

- (*Sorghum bicolor* L. Moench) gene pool for genetic diversity. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 10(4): 1426-1434.
54. Kebede H, Subudhi PK, Rosenow DT, Nguyen HT (2001). Quantitative trait loci influencing drought tolerance in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Theor Appl Genet*, 103: 266-276.
55. Kudadjie CY, Struik PC, Richards P, Offei SK (2004). Assessing production constraints, management and use of sorghum diversity in north-east Ghana: a diagnostic study. *NJAS - Wageningen J Life Sci*, 52: 371-391.
56. Lin YR, Schertz KF, Paterson AH (1995). Comparative Analysis of QTLs Affecting Plant Height and Maturity Across the Poacea, in Reference to an Interespecific Sorghum Population. *Genetics*, 141: 391-411.
57. Louise A, Paul K, Akanza MB (2007). Bien cultiver le sorgho en Côte d'Ivoire, CNRA, 123p.
58. Mann JA, Kimber CT, Miller FR (1983). The origin and early cultivation of sorghums in Africa. Texas Agricultural Experiment Bulletin, Texas A&M University, College Station, TX, Report 1454.
59. Matthews RB, Azam-Ali SN, Peacock JM (1990). Response of four sorghum lines to mid-season drought. II. Leaf characteristics. *F Crop Res*, 25: 297-308.
60. Miron J, Solomon R, Adin G, Nir U, Nikbachat M, Yosef E, Carmi A, Weinberg ZG, Kipnis T, Zuckerman E, BenGhedalia D (2006). Effects of harvest stage and re-growth on yield, composition, ensilage and *in vitro* digestibility of new forage sorghum varieties. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86, 140-147.
61. Mohammed R, Are AK, Bhavanasi R, Munghate RS, Kavi Kishor PB, Sharma HC (2015). Quantitative genetic analysis of agronomic and morphological traits in sorghum, *Sorghum bicolor*. *Front Plant Sci*, 6: 1-17.
62. Mokrane (2010). Valorisation des matières protéiques de céréales locales : Sorgho (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) et mil (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br). Thèse doctorat, ENP El-Harrach, Algérie. 161p.
63. Mokrane H, Amoura H, Belhaneche-bensemra N, Courtin CM, Delcour JA, Nadjemi B (2010). Assessment of Algerian sorghum protein quality. *Food chemistry*, 121: 719-723.
64. Mokrane H, Lagrain B, Gebruers K, Courtin CM, Brijs K, Proost P, Delcour JA (2009). Characterization of kafirins in algerian sorghum cultivars. *Cereal Chem*, 86: 487-491.
65. Mujaju C, Chakuya E (2008). Morphological Variation of Sorghum Landrace Accessions On-Farm in Semi-Arid Areas of Zimbabwe. *Int J Bot*, 4: 376-382.
66. Mulima E, Sibiyi J, Musvosvi C, Nhamucho E (2018). Identification of important morphological traits in Mozambican sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] germplasm using multivariate analysis. *Afr J Agric Res*, 13(34): 1796-1810.
67. Mutava RN, Prasad PV V, Tuinstra MR, Kofoed KD, Yu J (2011). Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. *F Crop Res*, 123: 10-18.

68. Muui CW, Muasya RM, Kirubi DT (2013). Identification and evaluation of sorghum germplasm from Eastern Kenya. *Afr J Agric Res*, 8: 4573-4579.
69. Ng'uni D, Geleta M, Bryngelsson T (2011). Genetic diversity in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] accessions of Zambia as revealed by simple sequence repeats (SSR). *Hereditas*, 148: 52-62.
70. Nyquist WE, Baker RJ (1991). Estimation of heritability and prediction of selection response in plant populations. *CRC Crit Rev Plant Sci*, 10: 235-322.
71. Paterson HA (2013). Plant Genetics and Genomics: Crops and Models - Genomics of Saccharinae. Ed. Richard A. Jorgensen. Volume 11. Springer. University of Georgia, USA. ISBN 978-1-4419-5946-1. 567p.
72. Paterson AH, Kong W, Johnston RM, Nabukalu P, Wu G, Poehlman WL, Goff VH, Isaacs K, Lee T-H, Guo H, Zhang D, Sezen UU, Kennedy M, Bauer D, Feltus FA, Weltzien E, Rattunde HF, Barney JN, Barry K, Cox TS, Scanlon MJ (2020). The Evolution of an Invasive Plant, *Sorghum halepense* L. ('Johnsongrass'). *Front Genet*, 11: 1-10.
73. Rakshit S, Gomashe SS, Ganapathy KN, Elangovan M, Ratnavathi CV, Seetharama N, Patil JV (2012). Morphological and molecular diversity reveal wide variability among sorghum Maldandi landraces from India. *J Plant Biochem Biotechnol*, 21(2): 145-156.
74. Rakshit S, Hariprasanna K, Gomashe S, Ganapathy KN, Das IK, Ramana OV, Dhandapani A, Patil JV (2014). Changes in area, yield gains, and yield stability of sorghum in major sorghum-producing countries, 1970 to 2009. *Crop Sci*, 54: 1571-1584.
75. Rao PS, Kumar CG, Reddy BVS (2013). Characterization of Improved Sweet Sorghum Cultivars, ICRISAT. India. ISBN 978-81-322-0782-5. 130p.
76. Rapsaniye Pogodi Ltd (2017). Weather for 243 countries of the world. In: RSS. <https://rp5.ru/>. (Consulté le 24 Mai 2021).
77. Reddy PS, Patil JV (2015). Genetic Enhancement of Rabi Sorghum, Elsevier. India. ISBN: 978-0-12-801926-9. 240p.
78. Reddy BVS, Ramesh S, Reddy PS (2006). Sorghum genetic resources, cytogenetics, and improvement. In: Singh, R.J., Jauhar, P.P. (Eds.), Genetic Resources Chromosome Engineering and Crop Improvement, Cereals, vol. 2. CRC Press, Taylor et Francis Group, Boca Raton, FL, Pp 309-363.
79. Reddy BVS, Ashok Kumar A, Sanjana Reddy P (2008). *Designing a sorghum genetic improvement program*. In: Sorghum Improvement in the New Millennium. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru 502 324, Andhra Pradesh, India, Patancheru, Andhra Pradesh, ISBN 978-

- 92-9066-512-0. Pp. 31-49.
80. Rodrigues PHM, Pinedo LA, Meyer PM, da Silva TH, Guimarães ICSB (2020). Sorghum silage quality as determined by chemical-nutritional factors. *Grass Forage Sci.*, 00: 1-12.
81. Rooney WL (2013). Inbred Sorghum Line “R07007.” 2:23.
82. Rooney WL, Blumenthal J, Bean B, Mullet JE (2007). Designing sorghum as a dedicated bioenergy feedstock. *Biofuels Bioprod Bioref*, 1: 147-157.
83. Ruiz M, Varela F, Carillo JM (1997). Analysis of the discriminating power of agro-morphological and biochemical descriptors in a sample of Spanish collection barely (*Hordeum vulgare* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution*, 44: 247-255.
84. Sanchez AC, Subudhi PK, Rosenow DT, Nguyen HT (2002). Mapping QTLs associated with drought resistance in sorghum. *Plant Mol Biol* 48:713–726.
85. Sanjana Reddy P, Patil JV, Nirmal SV, Gadakh SR (2012). Improving post-rainy season sorghum productivity in medium soils: does ideotype breeding hold a clue ? *Curr Sci*, 102: 904-908.
86. Shegro A, Shargie NG, van Biljon A, Labuschagne MT (2012). Diversity in starch, protein and mineral composition of sorghum landrace accessions from Ethiopia. *J. Crop Sci. Biotechnol.*, 15 (4): 275-280.
87. Shegro A, Labuschagn, MT, van Biljon A, Shargie NG (2013). Assessment of genetic diversity in sorghum accessions using amplified fragment length polymorphism (AFLP) analysis. *Afr J Biotechnol*, 12(11): 1178-1188.
88. Smith CW, Frederiksen RA (2000). Sorghum: Origin, History, Technology and Production. Wiley John and Sons, New York, 824p.
89. Snowden (1936). The cultivated races of sorghum. Adlard, London Royaume-Uni. 274p.
90. Snowden JD (1955). The wild fodder *Sorghums* of the section. London. *EuSorghum. Journ Linn Soc-Botany*, 55: 191-260.
91. Somegowda VK, Vemula A, Naravula J, Prasad G, Rayaprolu L, Rathore A, Blümmel M, Deshpande SP (2021). Evaluation of fodder yield and fodder quality in sorghum and its interaction with grain yield under different water availability regimes. *Current Plant Biology*, 25: 100191.
92. Souilah R, Djabali D, Belhadi B, Mokrane H, Boudries N, Nadjemi B (2014). In vitro starch digestion in sorghum flour from Algerian cultivars. *Food Sci nutrition*, 2(3): 251-259.
93. Souza E, Sorrells ME (1991). Relationships among 70 American oat germplasm. Cluster analysis using quantitative characters. *Crop science*, 31: 599-605.

94. Stemler A, Harlan J, De Wet J (1977). The Sorghums of Ethiopia. *Econ Bot*, 31: 446-460.
95. Stemler A, Harlan J, DeWet J (1975). Caudatum sorghums and speakers of charinile languages in Africa. *J Afr Hist*, 16: 161-183.
96. Stickler FC, Wearden S, Pauli AW (1961). Leaf Area Determination in Grain Sorghum. *Agronomy Journal*, 187-188.
97. Tariq AS, Akram Z, Shabbir G, Gulfranz M, Khan KS, Iqbal MS, Mahmood T (2012). Character association and inheritance studies of different sorghum genotypes for fodder yield and quality under irrigated and rainfed conditions. *African J Biotechnol*, 11: 9189-9195.
98. Teshome A, Patterson D, Asfaw Z, Dalle S, Torrance JK (2016). Changes of Sorghum bicolor landrace diversity and farmers' selection criteria over space and time, Ethiopia. *Genet Resour Crop Evol*, 63: 55-77.
99. Tonapi VA, Patil JV, Rao D, Elangovan M, Venkatesh Bhat B, Raghavendra Rao KV (2011). Sorghum: Vision 2030. Directorate of sorghum research, Rajendranagar, Hyderabad 500 030 (AP), India, 38 p.
100. Upadhyaya HD, Pundir RPS, Dwivedi SL, Gowda CLL, Reddy VG, Singh S (2009). Developing a Mini Core Collection of Sorghum for Diversified Utilization of Germplasm. *Crop Sci*, 49: 1769-1780.
101. Upadhyaya HD, Dwivedi SL, Vetriventhan M, Krishnamurthy L, Singh SK, (2016). Post-flowering drought tolerance using managed stress trials, adjustment to flowering, and mini core collection in sorghum. *Crop Sci*, 57: 1-12.
102. USDA (2021). United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service <https://plants.usda.gov/home/plantProfile?symbol=SOBID> (Consulté le 24 Mai 2021).
103. Vittal R, Ghosh N, Weng Y, Stewart BA (2010). Genetic diversity among *Sorghum bicolor* L. Moench genotypes as revealed by prolamines and SSR markers. *J Biotech Res*, 2: 101-111.
104. Wang YH, Upadhyaya HD, Kole C (2015). Genetics, genomics and breeding of Sorghum, Taylor and CRC Press, India.
105. Yaqoob M, Hussein N, Rachid A (2015). Genetic variability and heritability analysis for yield and morphological traits in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) genotypes. *J Agric Res*, 53: 331-343.
106. Zongo JD (1993). Genetic variability among sorghum accessions from the Sahelian agro-ecological region of Burkina Faso. *Biodiversity and Conservation*, 2: 627-636.

# **Annexes**

**Annexes 1.** Présentation des graines des populations et variétés de départ pour l'essai n° 1



**Fr1**



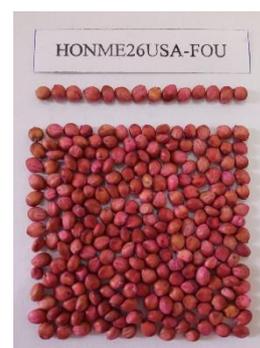
**Fr2**



**Dj1**



**Dj2**



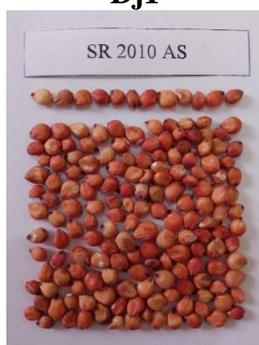
**Me1**



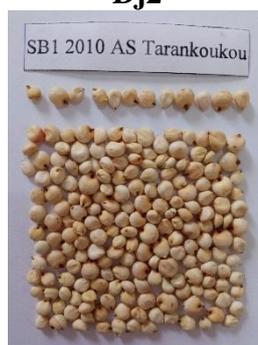
**Ad1**



**Ai1**



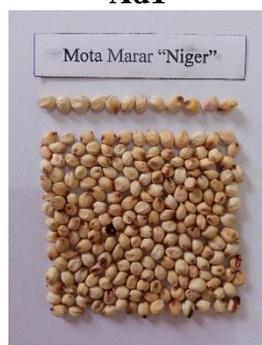
**Ai4**



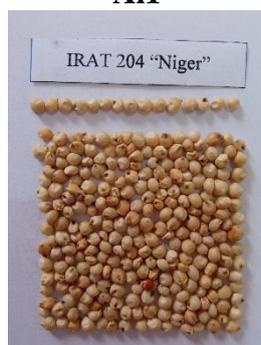
**Ai5**



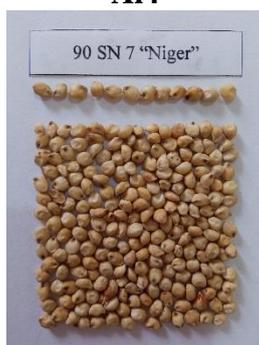
**Ai6**



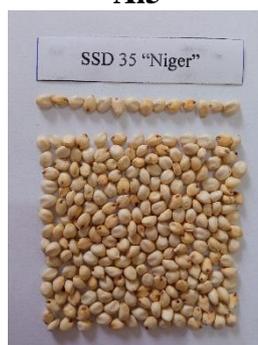
**Nig1**



**Nig2**



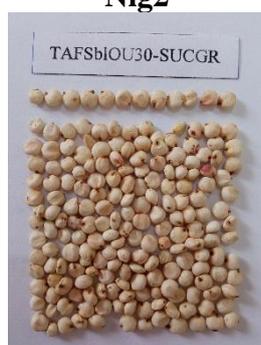
**Nig3**



**Nig4**



**Nig5**



**Ou1**



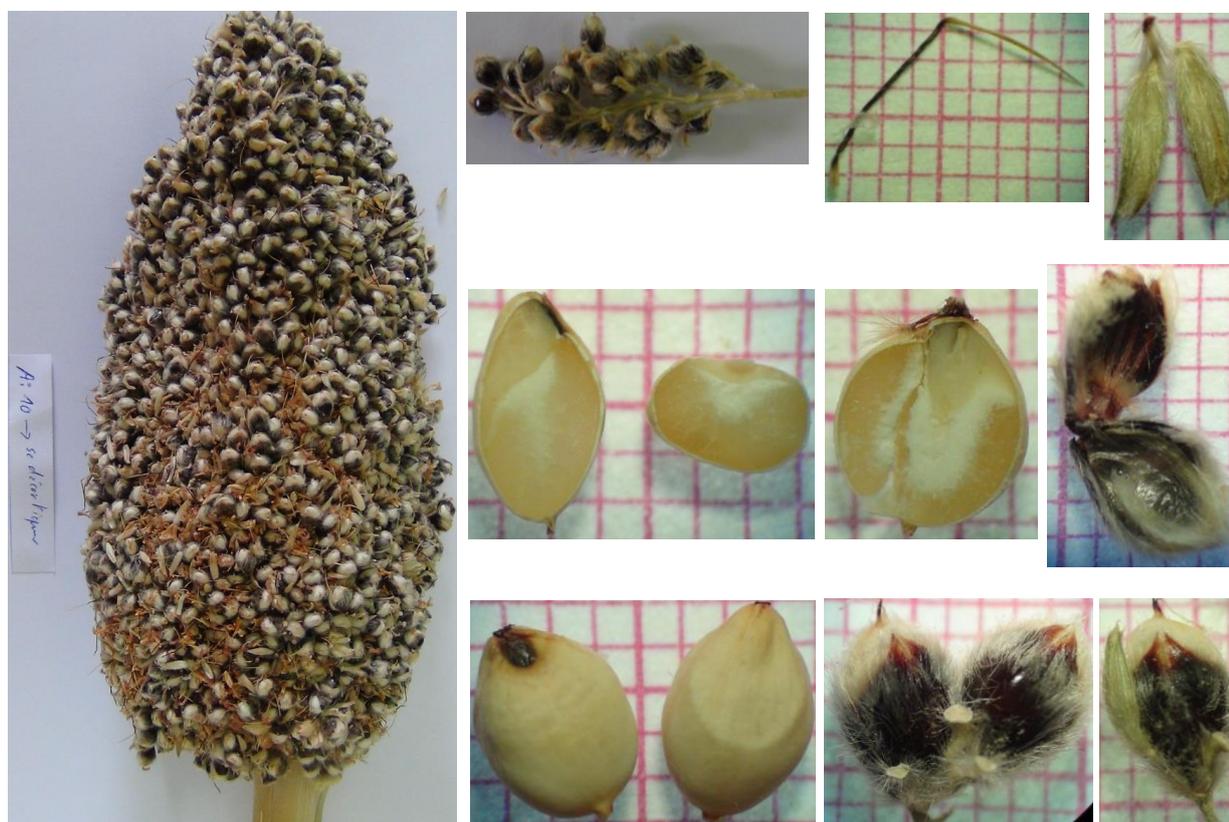
**Ou2**

## Annexe 2. Tentative de détermination des races du sorgho local (Quelques exemples)

### - Tafsout blanche (Ai9 pluriannuel)



### - Tafsout blanche (Ai10 égrenage facile)



**- Tafsout rouge (Ai16)**



**- Tafsout blanche (Ai24)**



**- Tafsout blanche (Ai29)**



**Tafsout blanche (Ai35)**



**Variété hybride CAUSSADE (Fr1)**



**Variété hybride CAUSSADE (Fr2)**



**Variété fixe INRAN (Nig 1)**



**Variété fixe INRAN (Nig 3)**



Annexe 3. Détermination et classification des espèces du sorgho selon Harlan et DeWet (1972)

Table 1. Classification of the species used by Snowden.

Species	Race
(1) <i>S. aterrimum</i>	Shattercane
(2) <i>S. drummondii</i>	Shattercane
(3) <i>S. nitens</i>	Shattercane
(4) <i>S. margaritiferrum</i>	Guinea
(5) <i>S. guineense</i>	Guinea
(6) <i>S. mellitum</i>	Guinea-bicolor
(7) <i>S. conspicuum</i>	Guinea
(8) <i>S. roxburghii</i>	Guinea-kafir
(9) <i>S. gambicum</i>	Guinea
(10) <i>S. exsertum</i>	Bicolor
(11) <i>S. membranaceum</i>	(various)
(12) <i>S. basatorum</i>	Kafir-bicolor
(13) <i>S. nervosum</i>	in part Bicolor in part Caudatum-bicolor in part Kafir-bicolor
(14) <i>S. melaleucum</i>	Guinea-bicolor
(15) <i>S. ankolib</i>	Durra-bicolor
(16) <i>S. splendidum</i>	Bicolor
(17) <i>S. doehna</i>	Bicolor
(18) <i>S. bicolor</i>	Bicolor
(19) <i>S. mlliiforme</i>	Kafir-bicolor
(20) <i>S. simulans</i>	Kafir-bicolor
(21) <i>S. elegans</i>	in part Guinea-caudatum in part Kafir-bicolor
(22) <i>S. notabile</i>	in part Guinea-caudatum in part Caudatum-bicolor
(23) <i>S. coriaceum</i>	Kafir
(24) <i>S. caffrorum</i>	Kafir
(25) <i>S. nigricans</i>	in part Kafir-caudatum in part Caudatum
(26) <i>S. caudatum</i>	in part Caudatum in part Guinea-caudatum in part Durra-caudatum
(27) <i>S. dulcicaule</i>	Guinea-caudatum
(28) <i>S. rigidum</i>	Durra-bicolor
(29) <i>S. durra</i>	Durra
(30) <i>S. cernuum</i>	Durra
(31) <i>S. subglabrescens</i>	Durra-bicolor

Table 2. Classification of work groups according to specimens received from USDA and grown in Puerto Rico.

Work group	Race
(1) Roxburghii	Guinea*
(2) Roxburghii/Shallu.	Guinea-kafir
(3) Conspicuum	Guinea
(4) Guineense	Guinea
(5) Margaritifera	Guinea
(6) Membranaceum	Durra (py glumes)
(7) Kaoliang	Bicolor
(8) Nevosum-kaoliang	Kafir-bicolor
(9) Bicolor-broomcorn	Bicolor
(10) Bicolor-sorgos & others	Kafir*
(11) Bicolor/Kafir	Bicolor
(12) Dochna	Bicolor
(13) Dochna/Leoti	Bicolor
(14) Dochna/Amber	Bicolor
(15) Dochna/Collier	Caudatum-bicolor
(16) Dochna/Honey	Bicolor
(17) Dochna/Roxburghii	Guinea-caudatum
(18) Dochna/Kafir	Kafir
(19) Dochna/Nigricans	Caudatum
(20) Dochna/Durra	Durra
(21) Elegans	No specimen
(22) Caffrorum	Kafir-caudatum
(23) Caffrorum/Darso	Kafir-caudatum
(24) Caffrorum/Birdproof	Kafir-caudatum
(25) Caffrorum/Roxburghii	Guinea-kafir
(26) Caffrorum/Bicolor	Caudatum-bicolor
(27) Caffrorum/Feterita	Durra-caudatum
(28) Caffrorum/Durra	Kafir
(29) Nigricans	Caudatum
(30) Nigricans/Bicolor	Kafir
(1) Dobbs	Guinea-caudatum
(2) Nigricans/Guinea	Guinea-caudatum
(31) Nigricans/Feterita	Caudatum
(1) Dobbs	Caudatum
(32) Nigricans/Durra	Durra
(33) Caudatum	Durra*
(34) Caudatum/Kaura	Durra-caudatum
(35) Caudatum/Guinea	Bicolor*
(36) Caudatum/Bicolor	Caudatum-bicolor
(37) Caudatum/Dochna	Bicolor
(38) Caudatum/Kafir (Hegari)	Caudatum
(39) Caudatum/Nigricans	Caudatum
(1) Zera-Zera	Caudatum
(40) Caudatum/Durra	Caudatum
(41) Durra	Durra
(42) Durra/Roxburghii	Guinea-bicolor
(43) Durra/Membranaceum	Guinea-durra
(44) Durra/Bicolor	Durra-bicolor
(45) Durra/Dochna	Durra-bicolor
(46) Durra/Kafir	Kafir-caudatum
(1) Nandyal	Durra
(47) Durra/Nigricans	Caudatum
(48) Durra/Kaura and others	No specimen
(49) Cernuum	Guinea-bicolor*
(50) Subglabrescens	Durra-bicolor
(51) Subglabrescens/Milo	Durra
(52) Sudanense	Bicolor
(53) Grass-grains	No specimen
(54) S. halepense	Durra-caudatum*
(55) S. alnum	Shattercane*
(60) S. plumosum	Shattercane*
(61) S. verticilliflorum	Shattercane*
(62) S. virgatum	Shattercane*

\* Specimen does not agree with descriptive name of work group.

**Annexe 4.** Tableau des moyennes des paramètres agro-morphologiques étudiés avec le test post-hoc de comparaisons multiples de Duncan pour les 17 populations et variétés de l'essai n° 1.

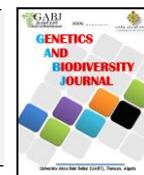
Génotype	LongF (cm)	LargF (cm)	SurfF (cm <sup>2</sup> )	PFF (g)	PSF (g)	MSF (%)	HautFin (cm)	VitCr (cm par jour)	NbF	NbT	DiamT (mm)	SPAD (sans unité)	Vig (de 1 à 10)	ApPan (nb de jours)	Flor (nb de jours)	Exs (cm)	LongPan (cm)	LargPan (cm)
<b>Ai1</b>	77,82 ab	7,20 b	427,38 b	8,63 b	3,20 a	36,95 de	202,61 d	1,80 fg	11,08 a	1,95 h	14,14 a	35,75 fg	6,06 d	81,00 a	95,88 b	7,79 g	23,01 gh	5,34 f
<b>Ai4</b>	67,54 f	6,21 c	314,48 e	5,67 d	2,00 e	35,71 ef	174,25 fg	1,92 ef	7,97 e	3,23 e	11,59 d	39,27 d	5,94 de	70,38 cd	82,50 f	7,34 g	12,27 m	5,16 fg
<b>Ai5</b>	77,55 ab	7,20 b	418,28 b	8,65 b	2,64 b	30,73 h	156,98 i	1,42 ij	9,28 c	2,39 g	14,21 a	38,91 de	4,75 j	71,50 c	94,75 bc	5,37 h	13,60 k	5,20 fg
<b>Ai6</b>	71,49 de	6,34 c	341,74 cd	6,47 c	2,24 c	34,68 f	180,64 f	2,03 e	7,95 e	2,84 f	12,57 c	40,26 cd	5,63 f	76,25 b	88,63 d	8,09 g	13,41 kl	4,70 gh
<b>Ad1</b>	75,88 bc	8,00 a	453,52 a	10,09 a	3,31 a	32,76 g	145,70 j	1,30 j	8,48 d	2,45 g	14,30 a	38,47 de	5,50 fg	76,25 b	95,25 bc	4,78 h	12,72 klm	4,72 gh
<b>Ou1</b>	58,85 g	5,78 d	254,40 f	4,77 e	1,54 gh	32,51 g	155,88 i	1,51 hi	6,97 f	2,61 fg	10,20 fgh	41,79 c	6,00 d	67,38 f	81,75 f	8,17 g	12,44 lm	4,57 f
<b>Ou2</b>	74,87 bcd	6,20 c	353,08 c	6,44 c	2,34 c	36,79 de	170,14 g	1,51 hi	10,17 b	2,69 fg	13,27 b	35,25 g	5,94 de	75,13 b	97,50 a	4,38 h	21,73 i	7,00 d
<b>Fr1</b>	70,44 ef	5,62 d	296,85 e	4,26 fg	1,64 fg	38,79 cd	286,70 a	3,20 a	7,81 e	4,14 c	11,44 d	40,30 cd	7,75 a	67,38 f	82,25 f	27,76 a	38,58 a	17,75 a
<b>Fr2</b>	69,24 ef	6,18 c	322,73 de	6,16 c	2,18 cde	35,77 ef	168,89 gh	1,74 g	9,81 b	2,77 f	13,69 ab	37,33 ef	6,81 bc	67,75 ef	84,75 e	12,30 f	22,50 hi	6,30 e
<b>Dj1</b>	72,56 cde	4,61 gh	253,58 f	4,64 ef	1,77 f	38,12 cd	242,16 b	2,67 c	9,81 b	4,72 b	10,75 ef	45,58 ab	7,00 b	66,13 fg	85,25 e	22,12 cd	30,26 d	9,88 b
<b>Dj2</b>	80,16 a	5,60 d	344,00 cd	6,02 cd	2,13 de	36,62 de	231,70 c	3,06 b	8,61 d	3,70 d	11,14 de	44,83 ab	6,63 c	65,38 g	82,75 f	21,33 d	33,63 b	9,57 b
<b>Me1</b>	70,50 ef	4,72 fg	253,94 f	4,18 fg	1,68 fg	40,40 ab	230,72 c	1,58 h	8,44 d	5,13 a	10,43 fg	46,47 a	7,06 b	70,50 cd	85,00 e	23,68 b	31,25 c	8,85 c
<b>Nig1</b>	39,58 j	3,19 i	94,44 i	1,41 j	0,58 k	41,00 a	161,27 hi	2,36 d	5,31 g	3,70 d	6,07 k	45,57 ab	5,06 hi	53,75 i	69,88 h	23,02 bc	18,26 j	3,78 i
<b>Nig2</b>	52,16 i	5,08 e	199,34 g	4,04 g	1,38 hi	34,78 f	140,28 jk	1,40 ij	7,75 e	2,39 g	9,11 ij	41,94 c	4,94 ij	71,00 cd	85,50 e	15,74 e	23,50 gh	4,36 h
<b>Nig3</b>	56,20 gh	4,88 efg	205,62 g	3,29 h	1,37 hi	41,83 a	207, 23 d	1,55 hi	8,52 d	1,95 h	9,98 gh	40,29 cd	5,00 hij	81,38 a	93,63 c	15,18 e	25,69 e	5,32 f
<b>Nig4</b>	52,89 hi	4,35 h	172,48 h	2,29 i	0,92 j	40,32 ab	191,47 e	1,57 h	6,55 f	2,88 f	9,03 j	40,47 cd	5,69 ef	63,50 h	78,00 g	15,97 e	24,58 f	5,34 f
<b>Nig5</b>	53,07 i	5,00 ef	200,01 g	3,19 h	1,25 i	39,00 bc	136,73 k	1,44 hij	7,64 e	2,39 g	9,69 hi	43,76 b	5,25 gh	69,38 de	81,75 de	15,17 e	24,01 fg	4,78 gh

**LongF** : Longueur feuille, **LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **PFF** : Poids frais feuille, **PSF** : Poids sec feuille, **MSF** : Matière sèche feuille, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **NbF** : Nombre de feuilles, **NbT** : Nombre de tiges, **DiamT** : Diamètre tige, **SPAD** : Taux de chlorophylle, **LongPan** : Longueur paniculaire, **LargPan** : Largeur paniculaire, **Vig** : Vigueur, **Exs** : Exsertion pédonculaire, **ApPan** : Apparition paniculaire, **Flor** : Floraison.

Tableau des moyennes des paramètres agro-morphologiques étudiés avec le test post-hoc de comparaisons multiples de Duncan pour les 20 populations et variété de l'essai n°2.

Génotype	LargF (cm)	SurfF (cm <sup>2</sup> )	MSF (%)	BioFr (T)	BioSèch (T)	IndFour (sans unité)	NbT	DiamT (mm)	Emerg (de 1 à 10)	HautFin (cm)	VitCr (cm par jour)	Flor (nb de jours)
Ai8	9,43 <sup>bcd</sup>	514,17 <sup>de</sup>	36,2 <sup>cde</sup>	76,85 <sup>ef</sup>	13,65 <sup>fghi</sup>	0,39 <sup>cdef</sup>	2b <sup>c</sup>	13,38 <sup>cdef</sup>	96,88 <sup>ab</sup>	166 <sup>efg</sup>	4,32 <sup>bcde</sup>	85,5 <sup>efgh</sup>
Ai9	12,18 <sup>a</sup>	909 <sup>a</sup>	34,61 <sup>cde</sup>	188,43 <sup>b</sup>	30,49 <sup>b</sup>	0,35 <sup>fg</sup>	1,25 <sup>c</sup>	16,9 <sup>bcd</sup>	83,33 <sup>bc</sup>	218,5 <sup>c</sup>	2,19 <sup>efg</sup>	113,5 <sup>abc</sup>
Ai10	6,6 <sup>hi</sup>	283,29 <sup>ij</sup>	36,26 <sup>cde</sup>	51,58 <sup>fg</sup>	10,63 <sup>ghi</sup>	0,45 <sup>bc</sup>	2,75 <sup>bc</sup>	9,42 <sup>f</sup>	78,13 <sup>c</sup>	149,5 <sup>fgh</sup>	4,06 <sup>bcdef</sup>	78,5 <sup>ghi</sup>
Ai12	7,6 <sup>fghi</sup>	414,61 <sup>efgh</sup>	38,95 <sup>cde</sup>	68,44 <sup>efg</sup>	12,94 <sup>fghi</sup>	0,42 <sup>cde</sup>	3,25 <sup>b</sup>	11,97 <sup>def</sup>	94,79 <sup>ab</sup>	161,75 <sup>efg</sup>	6,59 <sup>a</sup>	77 <sup>hi</sup>
Ai13	6,18 <sup>i</sup>	267,37 <sup>j</sup>	42,59 <sup>bcde</sup>	34,27 <sup>g</sup>	8,8 <sup>hi</sup>	0,56 <sup>a</sup>	2,25 <sup>bc</sup>	9,98 <sup>f</sup>	94,79 <sup>ab</sup>	146,75 <sup>fgh</sup>	5,41 <sup>abc</sup>	75 <sup>i</sup>
Ai14	8,25 <sup>defg</sup>	433,84 <sup>defg</sup>	43,25 <sup>bcd</sup>	73,86 <sup>efg</sup>	12,4 <sup>fghi</sup>	0,37 <sup>defg</sup>	2,75 <sup>bc</sup>	12,32 <sup>def</sup>	95,83 <sup>ab</sup>	172,5 <sup>def</sup>	5,16 <sup>abcd</sup>	85 <sup>efgh</sup>
Ai16	8,2 <sup>defg</sup>	447,47 <sup>defg</sup>	46,52 <sup>abc</sup>	73,15 <sup>efg</sup>	15,83 <sup>efg</sup>	0,46 <sup>bc</sup>	2 <sup>bc</sup>	12,34 <sup>def</sup>	91,67 <sup>ab</sup>	190,25 <sup>cdef</sup>	5,5 <sup>ab</sup>	85,75 <sup>efgh</sup>
Ai18	7,75 <sup>efgh</sup>	387,96 <sup>efghij</sup>	42,2 <sup>bcde</sup>	49,82 <sup>fg</sup>	10,38 <sup>ghi</sup>	0,46 <sup>bc</sup>	1,75 <sup>bc</sup>	13,84 <sup>cdef</sup>	86,46 <sup>abc</sup>	166,25 <sup>efg</sup>	3,81 <sup>bcdefg</sup>	79,25 <sup>ghi</sup>
Ai19	10,15 <sup>bc</sup>	877,94 <sup>ab</sup>	31,05 <sup>e</sup>	260,61 <sup>a</sup>	38,38 <sup>a</sup>	0,31 <sup>g</sup>	1,5 <sup>bc</sup>	24,17 <sup>a</sup>	96,88 <sup>ab</sup>	317 <sup>a</sup>	1,88 <sup>fg</sup>	120,5 <sup>a</sup>
Ai24	7,1 <sup>ghi</sup>	396,73 <sup>efghi</sup>	43,03 <sup>bcde</sup>	85,69 <sup>ef</sup>	14,63 <sup>fgh</sup>	0,37 <sup>defg</sup>	2,33 <sup>bc</sup>	12,77 <sup>cdef</sup>	91,67 <sup>ab</sup>	191,33 <sup>cdef</sup>	5,5 <sup>ab</sup>	81 <sup>ghi</sup>
Ai29	9,08 <sup>cde</sup>	552,20 <sup>d</sup>	36,36 <sup>cde</sup>	166,58 <sup>b</sup>	27,38 <sup>bc</sup>	0,36 <sup>efg</sup>	1,5 <sup>bc</sup>	16,35 <sup>bcde</sup>	90,63 <sup>abc</sup>	259 <sup>b</sup>	3,09 <sup>cdefg</sup>	115,75 <sup>ab</sup>
Ai30	10,73 <sup>b</sup>	755,33 <sup>c</sup>	39,32 <sup>cde</sup>	161,27 <sup>bc</sup>	26,8 <sup>bc</sup>	0,36 <sup>efg</sup>	1 <sup>c</sup>	19,03 <sup>b</sup>	51,04 <sup>d</sup>	180,25 <sup>cdef</sup>	1,63 <sup>g</sup>	109,75 <sup>bc</sup>
Ai33	8,3 <sup>defg</sup>	462,98 <sup>def</sup>	44,32 <sup>bcd</sup>	50,23 <sup>fg</sup>	8,45 <sup>i</sup>	0,37 <sup>defg</sup>	2,5 <sup>bc</sup>	13,8 <sup>cdef</sup>	91,67 <sup>ab</sup>	115,5 <sup>h</sup>	2,72 <sup>efg</sup>	82,75 <sup>fghi</sup>
Ai34	8,58 <sup>def</sup>	417,32 <sup>efgh</sup>	37,30 <sup>cde</sup>	62,36 <sup>fg</sup>	12,43 <sup>fghi</sup>	0,44 <sup>bcd</sup>	2,5 <sup>bc</sup>	14,25 <sup>cdef</sup>	91,67 <sup>ab</sup>	123 <sup>gh</sup>	3,66 <sup>bcdefg</sup>	87,25 <sup>defg</sup>
Ai35	7,13 <sup>fghi</sup>	299,11 <sup>hij</sup>	41,60 <sup>bcde</sup>	89,46 <sup>ef</sup>	15,07 <sup>efg</sup>	0,36 <sup>defg</sup>	1,67 <sup>bc</sup>	12,16 <sup>def</sup>	94,44 <sup>ab</sup>	190,33 <sup>cdef</sup>	3,13 <sup>cdefg</sup>	93,33 <sup>de</sup>
Ai36	7,33 <sup>fghi</sup>	367,13 <sup>fghij</sup>	56,51 <sup>a</sup>	75,04 <sup>ef</sup>	14,08 <sup>fghi</sup>	0,41 <sup>cdef</sup>	2,75 <sup>bc</sup>	12,85 <sup>cdef</sup>	88,54 <sup>abc</sup>	204 <sup>cde</sup>	3,78 <sup>bcdefg</sup>	89,75 <sup>def</sup>
Ai39	9,15 <sup>cde</sup>	511,02 <sup>de</sup>	40,99 <sup>bcde</sup>	105,87 <sup>de</sup>	20,23 <sup>de</sup>	0,41 <sup>cdef</sup>	2 <sup>bc</sup>	11,92 <sup>ef</sup>	97,92 <sup>a</sup>	217 <sup>cd</sup>	2,88 <sup>defg</sup>	94,25 <sup>d</sup>
Ai40	12,03 <sup>a</sup>	778,27 <sup>bd</sup>	33,97 <sup>de</sup>	127,85 <sup>cd</sup>	24,41 <sup>cd</sup>	0,41 <sup>cdef</sup>	1,5 <sup>bc</sup>	17,56 <sup>bc</sup>	94,79 <sup>ab</sup>	164,25 <sup>efg</sup>	1,78 <sup>g</sup>	106 <sup>c</sup>
Ai42	6,5 <sup>hi</sup>	321,14 <sup>ghij</sup>	46,16 <sup>abcd</sup>	60,94 <sup>fg</sup>	11,69 <sup>fghi</sup>	0,41 <sup>cdef</sup>	3,25 <sup>b</sup>	11,48 <sup>ef</sup>	85,42 <sup>abc</sup>	184,5 <sup>cdef</sup>	3,19 <sup>bcdefg</sup>	87 <sup>defg</sup>
Fr1	6,33 <sup>hi</sup>	303,72 <sup>hij</sup>	51,5 <sup>ab</sup>	73,06 <sup>efg</sup>	17,12 <sup>ef</sup>	0,5 <sup>ab</sup>	5,5 <sup>a</sup>	11,3 <sup>f</sup>	92,72 <sup>ab</sup>	292 <sup>ab</sup>	7,28 <sup>a</sup>	78,5 <sup>ghi</sup>

**LargF** : Largeur feuille, **SurfF** : Surface foliaire, **MSF** : Matière sèche feuille, **BioFr** : Biomasse fraîche, **BioSèch** : Biomasse sèche, **IndFour** : Indice fourrager, **NbT** : Nombre de talles, **DiamT** : Diamètre tige, **Emerg** : Emergence, **HautFin** : Hauteur finale de la plante, **VitCr** : Vitesse de croissance, **Flor** : Floraison.



Original Research Paper



## Genetic diversity of Algerian sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) landraces by using agro-morphological markers

Ould-Kiar R<sup>1,3\*</sup>, Kirouani A<sup>2,4</sup>, Laouar M<sup>2</sup>, Nadjemi B<sup>5</sup>, Abdelguerfi A<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire des Ressources Génétiques et Biotechnologies (LRGB), Département de Productions Végétales, Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA), Avenue Hassane Badi, El Harrach, Algiers 16200, Algeria.

<sup>2</sup>Laboratoire d'Amélioration Intégrative des Productions Végétales (AIPV), Département de Productions Végétales, Ecole Nationale Supérieure Agronomique (ENSA), Avenue Hassane Badi, El Harrach, Algiers 16200, Algeria.

<sup>3</sup>Faculté SNVSTU, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi de Bordj Bou Arréridj, Algeria.

<sup>4</sup>Faculté des sciences, Université Dr Yahia Fares de Médéa, Algeria.

<sup>5</sup>Laboratoire d'Etudes et Développement des Techniques d'Épuration et de Traitement des Eaux et Gestion Environnementale (LEDTEGE), Département de Chimie, Ecole Normale Supérieure de Kouba, Cheikh Mohamed El Bachir Ibrahimi Algiers, Algeria

\*Corresponding author: Redha OULD KIAR. École Nationale Supérieure Agronomique Alger, Algeria  
Email: [redhaagro@gmail.com](mailto:redhaagro@gmail.com) / [redha.ouldkiar@univ-bba.dz](mailto:redha.ouldkiar@univ-bba.dz)

### Abstract

The present study was performed to assess the native Algerian sorghum germplasm, 19 accessions originating from the South of Algeria and one introduced commercial hybrid were evaluated for 12 quantitative agro-morphological markers. Analysis of variance revealed significant differences ( $p < 0.05$ ) between accessions for all characters. Comparison of means by Duncan's least significant test separate accessions into several homogeneous groups. It was found that sorghum landrace Ai19 showed the highest scores of final height (317 cm) and biomass dry yield (38 tons), Ai13 showed shortest vegetative cycles by 75 days to 50% flowering and the highest exploration of water to accumulate dry matter. The first two-principle component showed together more than 76% of the total variation. Clustering analysis showed that the 20 accessions were divided into four groups, mainly differentiated by forage production, days to 50% of flowering, final height, tillering capacity and leaf characteristics. The current study demonstrates that the characterization of the entire collection revealed a great phenotypic variability within the accessions and showed those that have markers of agronomic interest. Agro-morphological traits were very practical in detecting variation between local and commercial hybrid sorghum. Landraces Ai19, Ai13 and Fr1, through their valuable agro-morphological markers, could be used in sorghum genetic breeding programs.

**Keywords:** *Sorghum bicolor* (L) Moench, landrace, agro-morphological markers, phenotypic variability, diversity.

### Introduction

Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] is the fifth most important cereal after maize, rice, wheat, and barley. It is grown for different purposes, such as grain, forage, sugar syrup, biofuel, and various medicinal uses (Bantilan et al., 2004; Tonapi et al., 2011; Dahlberg et al., 2011; Teshome et al., 2015; Upadhyaya et al., 2016). It was a staple food crop of millions of populations throughout the world and helped poor farmers to survive during difficult times. It is still an integral part of the livelihood of African and Asian farmers (Tonapi et al., 2011; Rakshit et al., 2014). Sorghum plays a major role in the semi-arid regions where drought, heat and poor soil conditions made the production of other cereals difficult (House, 1985; Ayana and Bekele, 2000). Sorghum adaptation to biotic and abiotic stress made it an important major cereal in the worldwide (Almodares et al., 2013; Hadebe et al., 2019), which could be also a useful model for identifying genes related to stress tolerance (Rao et al., 2013). Information of genetic diversity is important for improvement, conservation, and survival of sorghum (Gerrano et al., 2014). Agronomic and morphological characterization and evaluation have long been, over the years, used to study genetic diversity within and among the accessions in different crops. The best use of the information contained in the data for morphological characterization is an important issue in plant breeding (Al-Naggar et al., 2020). Agro-morphological traits in sorghum were

associated with important economical traits and helpful in selecting the high yielding sorghum genotypes (Mohammed et al., 2015). There were several scientific reports on agro-morphological diversity, genetic variability, adaptation to environmental conditions, nutritional, and biological properties of sorghum. However, in Algeria, most of the studies on sorghum focused on grain quality (Boudries et al., 2009; Belhadi et al., 2013; Souilah et al., 2014), protein fractions (Mokrane et al., 2009, 2010), their benefit characteristics for food and non-food uses (Mokrane et al., 2009, 2010; Souilah et al., 2014), and antioxidant activity (Hadbaoui et al., 2010). To the best of our knowledge, no study reported genetic and morphological variability of sorghum cultivated in Algeria and on its potential uses in breeding plant programs. Thus, the main objectives of this study were to estimate the level of phenotypic variability and genetic diversity among local sorghum landraces and the commercial hybrid according to agro-morphological markers and promising accessions for different traits that could be used in sorghum breeding programs.

## Materials and methods

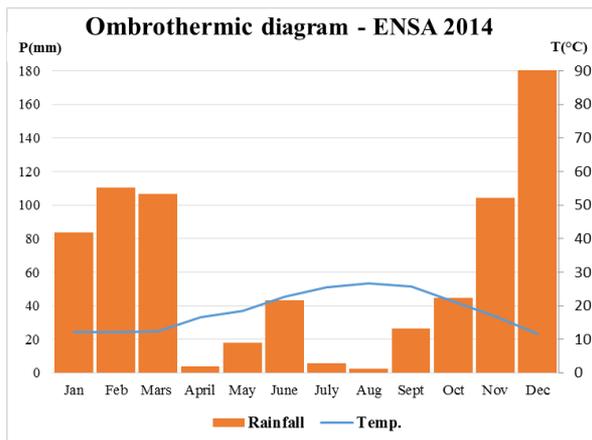
### *Experimental site and materials*

**Table 1.** List of common name sorghum accessions, origin and their status.

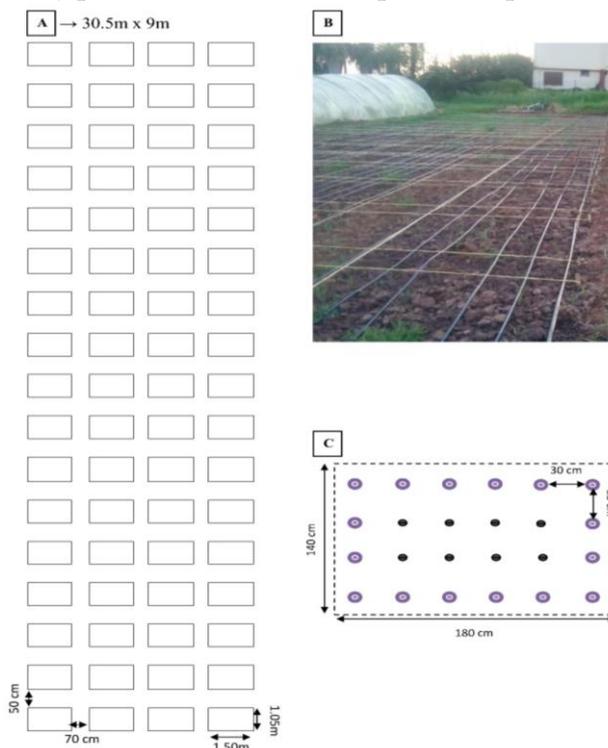
Accession code	Common name	Origin and status
Ai08	<i>Tafsoutbeid</i>	In salah-SalahTouil/ Landrace
Ai09	<i>Tafsoutbeid</i>	ElMaleh - Elham.Plur/ Landrace
Ai10	<i>Tafsoutbeid</i>	ElMaleh - Elham.Khort/ Pop
Ai12	<i>Tafsoutbeid</i>	In salah - Salah20 / Landrace
Ai13	<i>Tafsouthamr</i>	In salah - Salah21 / Landrace
Ai14	<i>Tafsouthamr</i>	ElMaleh - DaiesTouil/ Landrace
Ai16	<i>Tafsouthamr</i>	ElMaleh - DaiesHab/ Landrace
Ai18	<i>Tafsouthamr</i>	ElMaleh - 17BTouil / Landrace
Ai19	<i>Tafsoutbeid</i>	ElMaleh - Elham.Touil/ Landrace
Ai24	<i>Tafsoutbeid</i>	FogEzz-Bakad2II / Landrace
Ai29	<i>Tafsoutbeid</i>	FogEzz- BakadIII6 / Landrace
Ai30	<i>Tafsoutbeid</i>	FogEzz-BakadIV2 / Landrace
Ai33	<i>Tafsoutmouch</i>	ElMaleh-DaiesHab/ Landrace
Ai34	<i>Tafsoutbeid</i>	ElBarka-DahriHab/ Landrace
Ai35	<i>Tafsoutbeid</i>	ElBarka-DahriTouil/ Landrace
Ai36	<i>Tafsouthamr</i>	ElBarka-HamraniTouil/ Landrace
Ai39	<i>Tafsouthamr</i>	ElBarka-HamraniHab/ Landrace
Ai40	<i>Tafsoutbeid</i>	ElBarka-HamraniHab/ Landrace
Ai42	<i>Tafsoutbeid</i>	FogEzz-BakadTouil/ Landrace
F01	<i>Lussi</i>	French - CAUSSADE/ <i>commercial hybrid</i>

The study was carried out during 2014, from April to September in sub-humid stage at the experimental station of high national agronomic school (ENSA Algiers, Algeria, 36°43'10.59"N–3°09'01.58"E, altitude: 39m). Nineteen landraces from south Algeria (Aïn Salah) and one hybrid variety from France (i.e. 20 accessions) were grown under rain-fed conditions (irrigations were applied when needed). The environmental conditions at the experiment site are illustrated in Figure 1. The ombrothermic diagram showed that April, July and August was marked by a very low quantities of rainfall contrary to other months particularly before the sowing or in the middle of vegetation cycle. A moderate temperature was recorded during all the cycle. The information related to the description of the studied sorghum accessions including common name, status, and origin were given in Table 1. The accessions were raised in four randomized complete blocks design with four replicates. The experiment site dimension was 30,5m length and 9m width (274.5m<sup>2</sup> in total) with 0.5m spacing

between micro-plots and 1m between blocks. Micro-plot area was 1.575m<sup>2</sup> (1.5m x 1.05m), row and plant spacing were 35 and 30 cm respectively (Figure 2, 3 and 4). Spacing between plants was adopted to accommodate 8 plants per micro-plot surrounded by 16 plants to eliminate edge effects. All micro-plots were tilled to depth of 30cm. A pre-plant NPK fertilizer (15-15-15) was applied at a rate of 400kg.ha<sup>-1</sup> with additional 150kg.ha<sup>-1</sup> of urea (46-0-0) (divided in two intakes). A foliar fertilizer (N) (70-0-0) was applied after planting. Fungicide and insecticide were used when necessary. Sowing was done, on April 17<sup>th</sup> 2014. Uniform crop management practices were applied to all entries during the trial. Materials used in the experiment consisted of a tape measure, decameter, calipers, stapler, hoe, paper bags, plastic bags, twine, reed, backpack fertilizer, gloves, knife, digital camera, labels, cans.



**Figure 1.** Ombrothermic diagram for the experimental site. P: precipitation, T: Temperature. (The study period limited between April and September 2014).



**Figure 2.** Experimental site (A and B) and microplot(C) dimensions.



**Figure 3.** Experimental site 120 days after sowing



**Figure 4.** Landrace Ai19 at right and the hybrid Fr1 at left

#### *Data collection and trait measurements*

The collected data including twelve traits related to vegetative growth and flowering time were presented in Table 2. For each micro-plot, eight selected individual plants were used for estimating different quantitative traits. Data was recorded as per trait descriptors for sorghum (IBPGR/ICRISAT, 1993).

**Table 2.** Codes and description for measured traits.

	<b>Trait</b>	<b>Description</b>
01	Leaf width ( <i>Lwid</i> , cm)	Measured at the widest point of the penultimate leaf;
02	Leaf area ( <i>Larea</i> , cm <sup>2</sup> )	Computed as leaf length x leaf width x 0.747 suggested by Stickler <i>et al.</i> (1961);
03	Leaf dry matter ( <i>DryMatL</i> %)	Calculated as the ratio between dry weight and fresh weight of the second leaf multiplied by 100;
04	Biomass fresh yield ( <i>BioFrY</i> , Tonne)	Estimated by weighing the aboveground biomass fresh yield for three plants and then converting into tons at a density of 95,000 plants per hectare;
05	Biomass dry yield ( <i>BioDryY</i> , Ton)	Estimated by weighing the aboveground biomass dry yield for three plants and then converting into tons at a density of 95,000 plants per hectare;
06	Forage index ( <i>ForInd</i> )	Measured by dividing the rate of the dry matter of the aboveground biomass over the volume of water (precipitation and irrigation - 140.94mm at 80 days date of harvest);
07	Tillers number ( <i>TillNb</i> )	Computing the number of tillers per plant;
08	Stem diameter ( <i>StDiam</i> , mm)	Measured in mm using a caliper between third and fourth nodes of the main stem;
09	Emergence ( <i>Emerg</i> , %)	Percentage of seeds germinated in each microplot at 11 days after sowing;
10	Final plant height ( <i>FHeig</i> , cm)	Measured from soil surface to the tip of the main inflorescence (Rooney <i>et al.</i> , 2013);
11	Growth rate ( <i>GrRate</i> , cm)	Comparing between two measurements of plants height, during growth stage (comparisons heights between 58 and 66 days after sowing);
12	Days to 50% flowering ( <i>Flow</i> )	The date which 50% of heads of the same micro-plot were starting flowering.

#### *Data analysis*

To test the differences significance among twenty genotypes, the data for each trait were subjected to one way ANOVA using Statistica software v 8. The comparison of means was performed using the Duncan's multiple range test at 5%. The correlations coefficients between pairs of traits were

calculated using the Spearman rank correlation option included in XLSTAT software v 14 at 1%. The principal component analysis (PCA) has been used in order to figure out the grouping of genotypes based on twelve traits related to vegetative growth and flowering time. To estimate similarities of individuals, a hierarchical clustering analysis (HCA) was done to describe origin of accessions, based on dissimilarity matrix using Euclidean distances, with the Ward's method included in XLSTAT software v 14, Addinsoft, USA.

## Results

**Table 3.** Means of the studied agro-morphologic measured markers for the 20 accessions studied and Duncan's multiple range test.

Gen	Lwid (cm)	Larea (cm <sup>2</sup> )	DryMatL (%)	BioFrY (t/ha)	BioDryY (t/ha)	ForInd	TillNb	StDiam (mm)	Emerg (%)	FHeig (cm)	GrRate	Flow (day)
Ai8	9,43 <sup>bcd</sup>	514,17 <sup>de</sup>	36,2 <sup>cde</sup>	76,85 <sup>ef</sup>	13,65 <sup>fghi</sup>	0,39 <sup>cdef</sup>	2b <sup>c</sup>	13,38 <sup>cdef</sup>	96,88 <sup>ab</sup>	166 <sup>efg</sup>	4,32 <sup>bcdef</sup>	85,5 <sup>efgh</sup>
Ai9	12,18 <sup>a</sup>	909 <sup>a</sup>	34,61 <sup>cde</sup>	188,43 <sup>b</sup>	30,49 <sup>b</sup>	0,35 <sup>fg</sup>	1,25 <sup>c</sup>	16,9 <sup>bcd</sup>	83,33 <sup>bc</sup>	218,5 <sup>c</sup>	2,19 <sup>fgh</sup>	113,5 <sup>abc</sup>
Ai10	6,6 <sup>hi</sup>	283,29 <sup>ij</sup>	36,26 <sup>cde</sup>	51,58 <sup>fg</sup>	10,63 <sup>ghi</sup>	0,45 <sup>bc</sup>	2,75 <sup>bc</sup>	9,42 <sup>f</sup>	78,13 <sup>c</sup>	149,5 <sup>fgh</sup>	4,06 <sup>bcdefg</sup>	78,5 <sup>ghi</sup>
Ai12	7,6 <sup>fghi</sup>	414,61 <sup>efgh</sup>	38,95 <sup>cde</sup>	68,44 <sup>efg</sup>	12,94 <sup>fghi</sup>	0,42 <sup>cde</sup>	3,25 <sup>b</sup>	11,97 <sup>def</sup>	94,79 <sup>ab</sup>	161,75 <sup>efg</sup>	6,59 <sup>a</sup>	77 <sup>hi</sup>
Ai13	6,18 <sup>i</sup>	267,37 <sup>i</sup>	42,59 <sup>bcd</sup>	34,27 <sup>g</sup>	8,8 <sup>hi</sup>	0,56 <sup>a</sup>	2,25 <sup>bc</sup>	9,98 <sup>f</sup>	94,79 <sup>ab</sup>	146,75 <sup>fgh</sup>	5,41 <sup>abcd</sup>	75 <sup>i</sup>
Ai14	8,25 <sup>defg</sup>	433,84 <sup>defg</sup>	43,25 <sup>bcd</sup>	73,86 <sup>efg</sup>	12,4 <sup>fghi</sup>	0,37 <sup>defg</sup>	2,75 <sup>bc</sup>	12,32 <sup>def</sup>	95,83 <sup>ab</sup>	172,5 <sup>def</sup>	5,16 <sup>abcde</sup>	85 <sup>efgh</sup>
Ai16	8,2 <sup>defg</sup>	447,47 <sup>defg</sup>	46,52 <sup>abc</sup>	73,15 <sup>efg</sup>	15,83 <sup>efg</sup>	0,46 <sup>bc</sup>	2 <sup>bc</sup>	12,34 <sup>def</sup>	91,67 <sup>ab</sup>	190,25 <sup>cdef</sup>	5,5 <sup>abc</sup>	85,75 <sup>efgh</sup>
Ai18	7,75 <sup>efgh</sup>	387,96 <sup>efghij</sup>	42,2 <sup>bcd</sup>	49,82 <sup>g</sup>	10,38 <sup>ghi</sup>	0,46 <sup>bc</sup>	1,75 <sup>bc</sup>	13,84 <sup>cdef</sup>	86,46 <sup>abc</sup>	166,25 <sup>efg</sup>	3,81 <sup>bcd</sup>	79,25 <sup>ghi</sup>
Ai19	10,15 <sup>bc</sup>	877,94 <sup>ab</sup>	31,05 <sup>e</sup>	260,61 <sup>a</sup>	38,38 <sup>a</sup>	0,31 <sup>g</sup>	1,5 <sup>bc</sup>	24,17 <sup>a</sup>	96,88 <sup>ab</sup>	317 <sup>a</sup>	1,88 <sup>gh</sup>	120,5 <sup>a</sup>
Ai24	7,1 <sup>ghi</sup>	396,73 <sup>efghi</sup>	43,03 <sup>bcd</sup>	85,69 <sup>ef</sup>	14,63 <sup>fgh</sup>	0,37 <sup>defg</sup>	2,33 <sup>bc</sup>	12,77 <sup>cdef</sup>	91,67 <sup>ab</sup>	191,33 <sup>cdef</sup>	5,5 <sup>abc</sup>	81 <sup>ghi</sup>
Ai29	9,08 <sup>cde</sup>	552,20 <sup>d</sup>	36,36 <sup>cde</sup>	166,58 <sup>b</sup>	27,38 <sup>b</sup>	0,36 <sup>efg</sup>	1,5 <sup>bc</sup>	16,35 <sup>bcd</sup>	90,63 <sup>abc</sup>	259 <sup>b</sup>	3,09 <sup>defgh</sup>	115,75 <sup>ab</sup>
Ai30	10,73 <sup>b</sup>	755,33 <sup>c</sup>	39,32 <sup>cde</sup>	161,27 <sup>bc</sup>	26,8 <sup>bc</sup>	0,36 <sup>efg</sup>	1 <sup>c</sup>	19,03 <sup>b</sup>	51,04 <sup>d</sup>	180,25 <sup>cdef</sup>	1,63 <sup>h</sup>	109,75 <sup>bc</sup>
Ai33	8,3 <sup>defg</sup>	462,98 <sup>def</sup>	44,32 <sup>bcd</sup>	50,23 <sup>g</sup>	8,45 <sup>i</sup>	0,37 <sup>defg</sup>	2,5 <sup>bc</sup>	13,8 <sup>cdef</sup>	91,67 <sup>ab</sup>	115,5 <sup>h</sup>	2,72 <sup>fgh</sup>	82,75 <sup>fghi</sup>
Ai34	8,58 <sup>def</sup>	417,32 <sup>efgh</sup>	37,30 <sup>bcd</sup>	62,36 <sup>fg</sup>	12,43 <sup>fghi</sup>	0,44 <sup>bcd</sup>	2,5 <sup>bc</sup>	14,25 <sup>cdef</sup>	91,67 <sup>ab</sup>	123 <sup>gh</sup>	3,66 <sup>bcdefgh</sup>	87,25 <sup>defg</sup>
Ai35	7,13 <sup>fghi</sup>	299,11 <sup>hij</sup>	41,60 <sup>bcd</sup>	89,46 <sup>ef</sup>	15,07 <sup>efg</sup>	0,36 <sup>defg</sup>	1,67 <sup>bc</sup>	12,16 <sup>def</sup>	94,44 <sup>ab</sup>	190,33 <sup>cdef</sup>	3,13 <sup>bcdefgh</sup>	93,33 <sup>de</sup>
Ai36	7,33 <sup>fghi</sup>	367,13 <sup>ghij</sup>	56,51 <sup>a</sup>	75,04 <sup>ef</sup>	14,08 <sup>fghi</sup>	0,41 <sup>cdef</sup>	2,75 <sup>bc</sup>	12,85 <sup>cdef</sup>	88,54 <sup>abc</sup>	204 <sup>cde</sup>	3,78 <sup>bcdefgh</sup>	89,75 <sup>def</sup>
Ai39	9,15 <sup>cde</sup>	511,02 <sup>de</sup>	40,99 <sup>bcd</sup>	105,87 <sup>de</sup>	20,23 <sup>de</sup>	0,41 <sup>cdef</sup>	2 <sup>bc</sup>	11,92 <sup>ef</sup>	97,92 <sup>a</sup>	217 <sup>cd</sup>	2,88 <sup>efgh</sup>	94,25 <sup>d</sup>
Ai40	12,03 <sup>a</sup>	778,27 <sup>bd</sup>	33,97 <sup>de</sup>	127,85 <sup>cd</sup>	24,41 <sup>cd</sup>	0,41 <sup>cdef</sup>	1,5 <sup>bc</sup>	17,56 <sup>bc</sup>	94,79 <sup>ab</sup>	164,25 <sup>efg</sup>	1,78 <sup>gh</sup>	106 <sup>c</sup>
Ai42	6,5 <sup>hi</sup>	321,14 <sup>ghij</sup>	46,16 <sup>abcd</sup>	60,94 <sup>fg</sup>	11,69 <sup>fghi</sup>	0,41 <sup>cdef</sup>	3,25 <sup>b</sup>	11,48 <sup>ef</sup>	85,42 <sup>abc</sup>	184,5 <sup>cdef</sup>	3,19 <sup>bcdefgh</sup>	87 <sup>defg</sup>
Fr1	6,33 <sup>hi</sup>	303,72 <sup>hij</sup>	51,5 <sup>ab</sup>	73,06 <sup>efg</sup>	17,12 <sup>ef</sup>	0,5 <sup>ab</sup>	5,5 <sup>a</sup>	11,3 <sup>f</sup>	92,72 <sup>ab</sup>	292 <sup>ab</sup>	7,28 <sup>a</sup>	78,5 <sup>ghi</sup>
Means	8,43	485,08	41,13	96,77	17,29	0,41	2,30	13,89	89,46	190,48	3,88	91,27

Trait and accession abbreviations as given in tables 1 and 2. Lwid: Leaf width, Larea: Leaf area, DryMatL: Leaf dry matter, BioFrY: Biomass fresh yield, BioDryY: Biomass dry yield, ForInd: Forage index, TillNb: Tillers number, StDiam: Stem diameter, Emerg: Emergence, FHeig: Final plant height, GrRate: Growth rate, Flow: Days to 50% flowering.

The results of the ANOVA showed highly significant differences for all studied markers. Ai19 showed very high scores of biomass fresh yield (*BioFrY*) by more than 260 tons, biomass dry yield (*BioDryY*) with more than 38 tons, stem diameter (*StDiam*) with approximately 24 mm and final height (*FHeig*) with 317 cm. However, low values of dry matter of leaves (*DryMatL*, 31%), biomass accumulation (*ForInd*, 0.31) and growth rate (*GrRate*, 1.88) were recorded. Ai9 have also presented very wide leaves (*Lwid*) and leaf area (*Larea*) with Ai19, Ai40 and Ai30 but with low scores of tillers number (*TillNb*). The hybrid variety Fr1 showed high scores of growth rate (*GrRate*) with 7.28 cm per one day and *TillNb* by 5.5 tillers with good *FHeig* and *ForInd* against low scores of *Lwid*, *Larea*, *StDiam* and *Flow*. Ai13 landrace showed the highest *ForInd* with 0.56 and the shortest cycle with 75 days to *Flow* (Table 3).

A long vegetative cycle was observed in some landraces such as Ai9, Ai19, Ai29, Ai30 and Ai40 corresponding of 113, 120, 115, 109 and 106 days, a moderate vegetative cycle was found in many landraces namely Ai24, Ai33, Ai14, Ai8, Ai16, Ai42, Ai34 and Ai36 with an interval between 81 and 87 days. Fr1 the hybrid variety with Ai12, Ai13, Ai18 have presented the short vegetative cycles (*Flow*) with values less than 80 days after sowing.

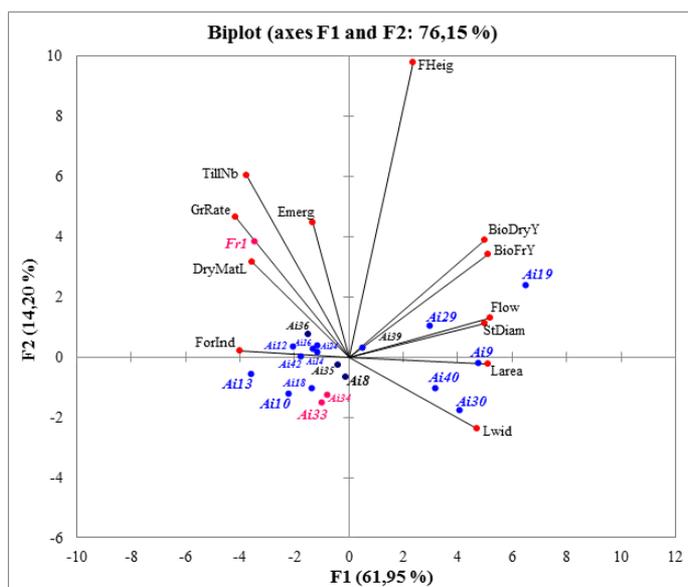
All phenotypic markers were much correlated between them ( $r > 0.1$ ,  $P < 0.0001$ ). Among 66 correlations found between quantitative traits, 52 correlations were significant and 24 of them were positives (Table 4). *Flow* was highly and positively correlated with *BioFrY*, *BioDryY*, *Larea*, *Lwid*, *StDiam* and negatively with *GrRate* and *ForInd*. *StDiam* was also highly and positively correlated with *Larea*, *BioFrY* and *BioDryY*. *FHeig* was highly correlated with *BioFrY* and *BioDryY*.

**Table 4.** Pairwisecorrelation analysis among measured traits (*Pearson*)

	Lwid	Larea	DryMatL	BioFrY	BioDryY	ForInd	TillNb	StDiam	Emerg	FHeig	GrRate
<b>Larea</b>	<b>0,92</b>										
<b>DryMatL</b>	<b>-0,47</b>	<b>-0,47</b>									
<b>BioFrY</b>	<b>0,65</b>	<b>0,81</b>	<b>-0,35</b>								
<b>BioDryY</b>	<b>0,67</b>	<b>0,80</b>	<b>-0,33</b>	<b>0,97</b>							
<b>ForInd</b>	<b>-0,47</b>	<b>-0,53</b>	<b>0,18</b>	<b>-0,63</b>	<b>-0,49</b>						
<b>TillNb</b>	<b>-0,43</b>	<b>-0,41</b>	<b>0,37</b>	<b>-0,36</b>	<b>-0,32</b>	<b>0,34</b>					
<b>StDiam</b>	<b>0,58</b>	<b>0,69</b>	<b>-0,32</b>	<b>0,64</b>	<b>0,61</b>	<b>-0,45</b>	<b>-0,35</b>				
<b>Emerg</b>	-0,17	-0,21	0,09	-0,12	-0,11	0,14	0,19	<b>-0,24</b>			
<b>FHeig</b>	0,13	<b>0,32</b>	0,00	<b>0,64</b>	<b>0,66</b>	<b>-0,26</b>	0,01	<b>0,31</b>	0,14		
<b>GrRate</b>	<b>-0,45</b>	<b>-0,46</b>	<b>0,25</b>	<b>-0,40</b>	<b>-0,35</b>	<b>0,39</b>	<b>0,38</b>	<b>-0,38</b>	0,17	0,06	
<b>Flow</b>	<b>0,67</b>	<b>0,77</b>	<b>-0,33</b>	<b>0,84</b>	<b>0,83</b>	<b>-0,57</b>	<b>-0,45</b>	<b>0,61</b>	-0,14	<b>0,46</b>	<b>-0,61</b>

**In bold:** moderate significance; **In blue:** high significance; \*Significant at  $\alpha = 0.01$ ; Trait abbreviations as given in tables 2. Lwid: Leaf width, Larea: Leaf area, DryMatL: Leaf dry matter, BioFrY: Biomass fresh yield, BioDryY: Biomass dry yield, ForInd: Forage index, TillNb: Tillers number, StDiam: Stem diameter, Emerg: Emergence, FHeig: Final plant height, GrRate: Growth rate, Flow: Days to 50% flowering

A principal component analysis was performed from 12 traits; the first two components had better summarize the information provided by all variables, and they showed together over than 76% of the information contained in the data set. The first principal component alone explained more than 61% of the variation, mainly due to variation positively in *Flow*, *StDiam*, *BioFrY*, *Larea*, *BioDryY*, *Lwid*, and negatively in *GrRate*. Both *Flow-StDiam* and *BioFrY-BioDryY* were strongly and positively correlated. Markers that contributed more to the second principal component explained up to 14% of the total variation and were mainly dominated by *FHeig* (Figure 5, Table 5).



**Figure 5.** Genotype by marker biplot illustrating the relationship between PC1 and PC2 for 20 accessions and 12 traits of sorghum. PC (F): principal component.

**In bold:** significant at  $\alpha = 0,01$ . Lwid: Leaf width, Larea: Leaf area, DryMatL: Leaf dry matter, BioFrY: Biomass fresh yield, BioDryY: Biomass dry yield, ForInd: Forage index, TillNb: Tillers number, StDiam: Stem diameter, Emerg: Emergence, FHeig: Final plant height, GrRate: Growth rate, Flow: Days to 50% flowering

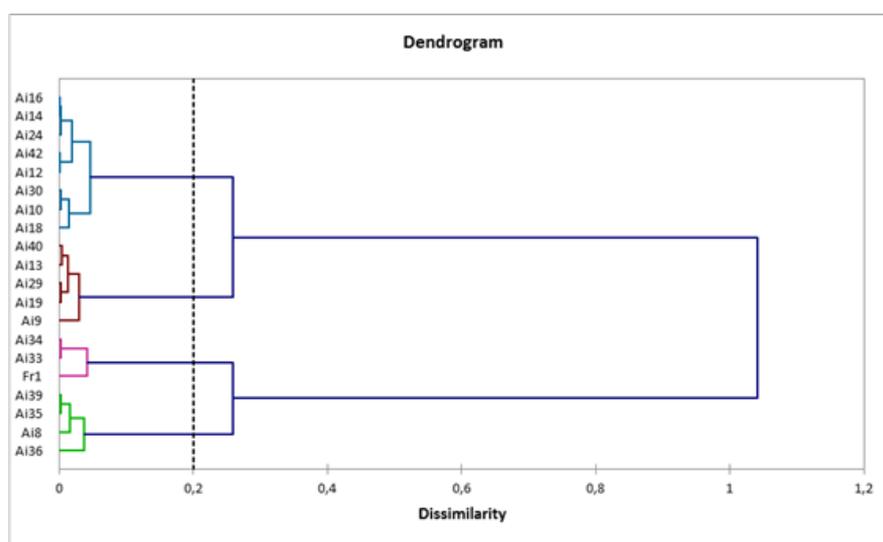
The distribution of the studied varieties according to the parameters analyzed in the present work indicated that the studied accessions were grouped over four quadrants showing a large genetic variability. On the positive side of PC1, the genotypes Ai19, Ai9, Ai30, Ai40 and Ai29 characterized by an excellent fodder yielding (*BioFrY* and *BioDryY*), a high score of leaf traits and *StDiam*. The same axis but on the negative side, the accessions Ai13 and Fr1 characterized by a high values of *ForInd*, *TillNb* and *GrRate* (Figure 5).

**Table 5.** Projection of the different traits studied on the three axes of the principal components analysis

Markers	Components		
	PC1	PC2	PC3
Lwid	<b>0,754</b>	0,044	0,017
Larea	<b>0,886</b>	0,000	0,002
DryMatL	<b>0,426</b>	0,078	0,217
BioFrY	<b>0,889</b>	0,091	0,001
BioDryY	<b>0,849</b>	0,117	0,003
HarvInd	<b>0,539</b>	0,000	0,000
TillNb	<b>0,483</b>	0,284	0,014
StDiam	<b>0,845</b>	0,010	0,001
Emerg	0,062	0,154	<b>0,694</b>
FHeig	0,189	<b>0,746</b>	0,016
GrRate	<b>0,593</b>	0,166	0,012
Flow	<b>0,919</b>	0,013	0,007

*Lwid*: Leaf width, *Larea*: Leaf area, *DryMatL*: Leaf dry matter, *BioFrY*: Biomass fresh yield, *BioDryY*: Biomass dry yield, *ForInd*: Forage index, *TillNb*: Tillers number, *StDiam*: Stem diameter, *Emerg*: Emergence, *FHeig*: Final plant height, *GrRate*: Growth rate, *Flow*: Days to 50% flowering.

Based on the 12 quantitative markers, the relationship among accessions was assessed using hierarchical clustering analysis (Figure 6). At a genetic distance of 0.2, the dendrogram showed that the 20 accessions were easily discriminated and clustered into four groups. The first group assembled Ai19, Ai9, Ai29, Ai13 and Ai40. Cluster I was characterized by the widest leaf, highest leaf area, most productive of fresh and dry forage and longest days to 50% of flowering. The second group constituted Ai30, Ai12, Ai42, Ai14, Ai16, Ai24, Ai10 and Ai18. These accessions had the smallest leaves width and area, highest leaf dry matter, least productive of fresh and dry forage, most productive of tillers, thickest stem and shortest days to 50% of flowering. The third group assembled the hybrid variety Fr1 with Ai33 and Ai34. This cluster grouped the accessions with smallest leaves width and area, least productive of fresh and dry forage, most productive of tillers, shortest days to 50% of flowering. Fr1 was separated within the third cluster indicating the highest Growth rate and tallest plant. Ai8, Ai35, Ai36 and Ai39 which form the last group characterized by the highest leaf dry matter and a medium values for all others traits.



**Figure 6.** Dendrogram of 20 accessions revealed by cluster analysis of genetic distance based on agronomical traits.

## Discussion

Characterization of accessions on the basis of their morphological characters will aid to identify and choose the best parents for hybridization (Souza and Sorrells, 1991). According to the morphological aspect, landraces belong to Durra, Caudatum or intermediate races, while the hybrid variety from French seems like Guinea race (Harlan and De Wet, 1972; Stemler et al., 1977; Reddy and Patil, 2015). Stemler et al. (1975) and Doggett (1988) pointed out that Caudatum and Durra are races with great agronomic values and better adaptation to harsh conditions. In sorghum, flowering was considered as a crucial event because of its key role in the adaptation and geographical distribution (EL Mannai et al., 2011). Gebrekidan (1981) reported that early flowering and short plant height sorghum types are suitable for regions with limited amount of rainfall and short growing season. In other hand, the earliest accessions would provide breeders with a simple tool to escape water stress (Upadhiaya et al., 2016). Many accessions as the hybrid Fr1, Ai13, Ai12 and Ai10 could be selected for their earliness with a cap of 80 days. Other accessions like Ai9, Ai19, Ai29 and Ai30 characterized by their tardiness reaching 130 days. By average of all accessions, the mean value of the number of days to 50% flowering was 91.27, Our results were in agreement to those reported by Upadhiaya et al. (2009) who found 82 days of flowering among 242 accessions from India, but less than to that reported by Bello et al. (2007) and Dossou-Aminon et al. (2015) who recorded 113 and 138 days, respectively. The obtained results are higher when compared to those reported by Abu Assar et al. (2009) who recorded 75 days among 40 sorghum accessions from Sudan.

The final plant height (*FHeig*) among the studied accessions showed a significant variation. Accessions as Ai19, Ai29 and Fr1 were the tallest plants, which exceeded 259 cm, could contribute significantly to increase the fresh and dry fodder yield; these kinds of genotypes are recommended to cover energy demand by livestock farming. On the other hand, accessions like Ai8, Ai12, Ai18, Ai10, Ai13 and Ai40 with a maximum of 166 cm were the shortest plants had the possibility to accumulate genes for the dwarf trait suitable in dry environmental conditions. The mean value of the final plant height was 190.48 cm which is approximately similar to that found by Grenier et al. (2004) and Abu Assar et al. (2009) with a mean value of 180 cm. Tariq et al. (2012) who recorded approximately 145 cm among 25 genotypes. Many studies reported that landraces were shorter than European or US varieties. In fact, farmers are looking for accessions with shorter plant height because the latter had sturdier stems, easier to harvest mechanically, and prevent damage and loss caused by wind or other environment conditions (Lin et al., 1995; Mutava et al., 2011). The number of tillers also revealed a significant variation ranging between 1 to 5.5 tillers per plant. Accessions with low tiller production capacity like the tallest ones require less water resources and are recommended in dry regions; by contrast, genotypes with high tiller production capacity as shortest ones are suitable in potential regions.

Fodder yield is crucial in crop improvement programs for the benefit of livestock farming, Ayubet al. (2012) found that landraces presented valuable leaf area, leaf fresh weight, leaf dry weight, and stem diameter and plant height that should be preferred over the tested varieties for green fodder purpose. In the present work, the accessions Ai9, Ai19 and Ai29 seem to be a good source of fresh or dry forage reaching 260t and 38t respectively, these genotypes had the highest values of leaf and stem characteristics. Leaf width presented a mean value of 8.43 cm in our study, and these results were similar to that recorded by Adugna (2014) and Dossou-Aminon et al. (2015) i.e. 8.2 cm and 7.52 cm, respectively.

The positive correlation between plant height and days to 50% flowering was reported previously (Zongo et al., 1993; Kebede et al. 2001). Leaf area was significantly and positively correlated with leaf length and width (Shegro et al., 2013). More than 75% of correlations were significant and we suggest that *BioFrY*, *BioDryY*, *Larea*, *Flow* and *StDiam* were strongly and positively correlated. They were worth exploiting directly for biomass production and/or integrating into breeding programmes (Habyarimana et al., 2004).

The present study showed an important contribution of the first principal component in total variability. This is in quite agreement to other previous studies (Mujaju and Chakuya, 2008; Jain and Patel, 2016). Moreover, Jain and Patel (2016) and Mulimaet al.(2018) recorded, like our study, that days to 50% flowering was the major character in first principal component while leaf traits were found among characters contributing to the first principal component. From Figure 5 and Table 6, the markers *Flow*, *Larea*, *StDiam*, *BioFrY*, *BioDryY* and *Lwid* showed a great influence on the distribution of data on the first two main components. However, some landraces such as Ai19, Ai9, Ai29, Ai30 and Ai40 had a positive factor loading value on the first major component. The hybrid Fr1, known by its high height, had a negative factor loading to the left of the first component but on the positive part of the second component, which represented more than 14% of the information. These results confirm the importance of certain Algerian local varieties compared to the hybrid for the markers mentioned. These results are in agreement with Kavithamani et al. (2019) who found that the important morphological traits of PC1 are due to variations between accessions and confirm that the Algerian landraces presented some good characters at the future breeding programs.

The dendrogram clearly defined differences in the distribution of the quantitative characters, which was reflected in the separation of the accessions. According to Dudhe et al. (2018) the genotypes within the same clusters may have originated from similar genetic backgrounds.

## Conclusion

Landraces selections should be a good source of genetic diversity since they had high levels of variability for important agronomic traits of primary interest in sorghum breeding, such as days to 50% flowering, plant height, number of tillers, fresh or dry biomass yield. Results of particular interest from this present study were those concerning the short vegetative cycle for Ai13, Ai12 and Ai10 accessions. Highest values of biomass fresh and dry yield, leaf area and number of tillers for Ai19, Ai9, Ai29 and Ai30 landraces, which explain some fodder abilities. These accessions must be considered as sources of important genes/traits that plant breeders need to exploit in Algeria and should allow development of new genotypes of desired traits through characterization, evaluation, selection and crossing programs.

## Acknowledgements

Authors wish to thank oases from southern Algeria region for willing to share with us some precious information and for providing the seed samples used in this study.

## Compliance with Ethical Standards Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest in this study.

## References

- Abu Assar AH. Uptmoor R. Abdelmula AA. Wagner C. Salih M. Ali AM. Ordon F. Friedt W. 2009.** Assessment of sorghum genetic resources for genetic diversity and drought tolerance using molecular markers and agro-morphological traits. *U. K. J. Agric. Sci.*, 17, 1-22.
- Adugna A. 2014.** Analysis of in situ diversity and population structure in Ethiopian cultivated *Sorghum bicolor* (L.) landraces using phenotypic traits and SSR markers. *SpringerPlus*, 3(212), 2-14.
- Almodares A. Hotjatabady RH. Mirniam E. 2013.** Effects of drought stress on biomass and carbohydrate contents of two sweet sorghum cultivars. *J. Environ. Biol.*, 34, 585-589.
- Al-Naggar AMM. Shafik MM. Musa RYM. Younis ASM. Anany AH. 2020.** Genetic Variability of Maize Hybrids and Populations and Interrelationships among Grain Yield and Its Related Traits under Drought and Low N Using Multivariate Analysis. *AJBGMB* 4(2), 26-44.
- Ayana A. Bekele E. 2000.** Geographical patterns of morphological variation in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) germplasm from Ethiopia and Eritrea : Quantitative characters. *Euphytica*, 115, 91-104.
- Ayub M. Khalid M. Tariq M. Elahi M. Nadeem MA. 2012.** Comparison of sorghum genotypes for forage production and quality. *J. Anim. Plant Sci.*, 22, 733-737.

- Bantilan M. Deb U. Gowda C. Reddy B. Obilana A. Evenson R. 2004.** *Sorghum genetic enhancement: research process, dissemination and impacts*. Ed. ICRISAT (Patancheru 502 324, Andhra Pradesh). ISBN 92-9066-470-3, 320p.
- Belhadi B. Djabali D. Souilah R. Yousfi M. Nadjemi B. 2013.** Three small-scale laboratory steeping and wet-milling procedures for isolation of starch from sorghum grains cultivated in Sahara of Algeria. *Food Bioprod. Process.*, 91, 225-232.
- Bello D. Kadams AM. Simon SY. Mashhi DS. 2007.** Studies on genetic variability in cultivated sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) cultivars of adamawa state Nigeria. *Am. J. Agric. Environ. Sci.*, 2, 297-302.
- Boudries N. Belhaneche N. Nadjemi B. Deroanne C. Mathlouthi M. Roger B. Sindic MP. 2009.** Physicochemical and functional properties of starches from sorghum cultivated in the Sahara of Algeria. *Carbohydr. Polym.*, 78, 475-480.
- Dahlberg J. Berenji J. Sikora V. Latkovic D. 2011.** Assessing sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) germplasm for new traits: food, fuels and unique uses. *Maydica*, 56, 85-92.
- Doggett H. 1988.** *Sorghum*. Tropical agricultural series. Longman Scientific, Essex, 2<sup>ed</sup> éd. UK.
- Dossou-Aminon I. Loko LY. Adjatin A. Ewédjè EEBK. Dansi A. Rakshit S. Cissé Patil NJV. Agbangla C. Sanni A. Akoègninou A. Akpagana K. 2015.** Genetic divergence in northern benin sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) landraces as revealed by agromorphological traits and selection of candidate genotypes. *Sci. World J.*, 2015, 1-10.
- Dudhe MY. Rajguru AB. Bhoite KD. Kadam SM. Ranganatha ARG. Sujatha M. Reddy AV. 2018.** Characterization, evaluation and multivariate analysis of sunflower germplasm under semi-arid environments of three locations in two sunflower growing states in India. *J. Environ. Biol.*, 39, 990-996.
- El Mannai Y. Shehzad T. Okuno K. 2011.** Variation in flowering time in sorghum core collection and mapping of QTLs controlling flowering time by association analysis. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 58, 983-989.
- Gebrekidan B. 1981.** Salient features of the sorghum breeding strategies used in Ethiopia. *Eth. J. Agri. Sci.* 3, 97-104.
- Gerrano AS. Labuschagne MT. van Biljon A. Shargie NG. 2014.** Genetic diversity assessment in sorghum accessions using qualitative morphological and amplified fragment length polymorphism markers. *Sci. Agri.*, 71, 394-401.
- Grenier C. Bramel PJ. Dahlberg JA. EL-Ahmadi A. Mahmoud M. Peterson GC. Rosenow DT. Ejeta G. 2004.** Sorghums of the Sudan: analysis of regional diversity and distribution. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 51, 489-500.
- Hadbaoui Z. Djeridane A. Yousfi M. Saidi M. Nadjemi B. 2010.** Fatty acid, tocopherol composition and the antioxidant activity of the lipid extract from the sorghum grains growing in Algeria. *Med. J. Nutrition Metab.*, 3, 215-220.
- Hadebe ST. Mabhaudhi T. Modi AT. 2019.** Water Productivity of Selected Sorghum Genotypes Under Rainfed Conditions. *International Journal of Plant Production*, <https://doi.org/10.1007/s42106-019-00082-4>.
- Harlan JR. De Wet JMJA. 1972.** simplified classification of cultivated sorghum. *Crop Sci.*, 12, 172-176.
- Habyarimana E. Laureti D., De Ninno M. Lorenzoni C. 2004.** Performances of biomass sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] under different water regimes in Mediterranean region. *Ind. Crops Prod.*, 20, 23-28.
- House LRA. 1985.** *Guide to Sorghum Breeding*. Tropics, ICRISAT, 2<sup>ed</sup> Ed., Andhra Pradesh 502 324, India.
- IBPGR/ICRISAT. 1993.** *Descriptor for Sorghum (Sorghum bicolor (L.) Moench)*, 44p.
- Jain SK. Patel PR. 2016.** Principal component and Cluster analysis in sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). *Forage Res.*, 42(2), 90-95.
- Kavithamani D. Yuvaraja A. Selvi B. 2019.** Principal component analysis and grouping of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) gene pool for genetic diversity. *Electronic Journal of Plant Breeding*, 10 (4), 1426-1434.
- Kebede H. Subudhi PK. Rosenow DT. Nguyen HT. 2001.** Quantitative trait loci influencing drought tolerance in grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Theor. Appl. Genet.* 103, 266-276.

- Lin YR. Schertz KF. Paterson AH. 1995.** Comparative analysis of QTLs affecting plant height and maturity across the poacea, in reference to an interspecific sorghum population. *Genetics*, 141, 391-411.
- Mohammed R. Are AK. Bhavanasi R. Munghate RS. Kavi Kishor PB. Sharma HC. 2015.** Quantitative genetic analysis of agronomic and morphological traits in sorghum, *Sorghum bicolor*. *Front. Plant Sci.*, 6, 1-17.
- Mokrane H. Lagrain B. Gebruers K. Courtin CM. Brijs K. Proost P. Delcour JA. 2010.** Assessment of Algerian sorghum protein quality. *Food chem.*, 121, 719-723.
- Mokrane H. Amoura H. Belhaneche-Bensemra N. Christophe M. Delcour JA. Nadjemi B. 2009.** Characterization of kafirins in Algerian sorghum cultivars. *Cereal Chem.*, 86, 487-491.
- Mujaju C. Chakauya E. 2008.** Morphological variation of sorghum landrace accessions on-farm in semi-arid areas of Zimbabwe. *Int. J. Bot.*, 4, 376-382.
- Mulima E. Sibiyi J. Musvosvi C. Nhamucho E. 2018.** Identification of important morphological traits in Mozambican sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] germplasm using multivariate analysis. *Afr. J. Agric. Res.*, 13(34), 1796-1810.
- Mutava RN. Prasad PVV. Tuinstra MR. Kofoid KD. Yu J. 2011.** Characterization of sorghum genotypes for traits related to drought tolerance. *F. Crop. Res.*, 123, 10-18.
- Rakshit S. Hariprasanna K. Gomashe S. Ganapathy KN. Das IK. Ramana OV. Dhandapani A. Patil JV. 2014.** Changes in area, yield gains, and yield stability of sorghum in major sorghum-producing countries, 1970 to 2009. *Crop Sci.*, 54, 1571-1584.
- Rao PS. Kumar CG. Reddy BVS. 2013.** *Characterization of improved sweet sorghum cultivars*. ISSN 2211-808X, 133p.
- Reddy PS. Patil JV. 2015.** *Genetic enhancement of rabi sorghum – adapting the Indian durras*. Elsevier, AP, 249p.
- Shergo A. Labuschagne MT. Geleta N. Van Biljon A. 2013.** Assessment of Genetic Diversity in Sorghum Using Phenotypic Markers. *Cereal Res Comm.* 41(4), 509-518.
- Souilah R. Djabali D. Belhadi B. Mokrane H. Boudries N. Nadjemi B. 2014.** In vitro starch digestion in sorghum flour from Algerian cultivars. *Food Sci. Nutrition*, 2(3), 251-259.
- Souza E. Sorrells ME. 1991.** Relationships among 70 American oat germplasms. I. Cluster analysis using quantitative characters. *Crop Sci.*, 31, 599-605.
- Stemler A. Harlan J. De Wet J. 1977.** The sorghums of ethiopia. *Econ. Bot.*, 31, 446-460.
- Stemler A. Harlan J. De Wet J. 1975.** Caudatum sorghums and speakers of chari-nile languages in Africa. *J. Afr. Hist.*, 16, 161-183.
- Tariq AS. Akram Z. Shabbir G. Gulfraz M. Khan KS. Iqbal MS. Mahmood T. 2012.** Character association and inheritance studies of different sorghum genotypes for fodder yield and quality under irrigated and rainfed conditions. *African J. Biotechnol.*, 11, 9189-9195.
- Teshome A. Patterson D. Asfaw Z. Dalle S. Torrance JK. 2015.** Changes of sorghum bicolor landrace diversity and farmers' selection criteria over space and time, Ethiopia. *Genet. Resour. Crop Evol.*, 63, 55-77.
- Tonapi VA. Patil JV. Dayakar RAO B. Elangovan M. Venkatesh Bhat B. Raghavendra Rao KV. 2011.** *Sorghum: Vision 2030*. Directorate of sorghum research, Rajendranagar, Hyderabad 500 030 (AP), India, 38 pp.
- Upadhyaya HD. Pundir RPS. Dwivedi SL. Gowda CLL. Reddy VG. Singh S. 2009.** Developing a mini core collection of sorghum for diversified utilization of germplasm. *Crop Sci.*, 49, 1769-1780.
- Upadhyaya HD. Dwivedi SL. Vetriventhan M. Krishnamurthy L. Singh SK. 2016.** Post-flowering drought tolerance using managed stress trials, adjustment to flowering, and mini core collection in sorghum. *Crop Sci.* 57, 1-12.
- Zongo JD. Gouyon PH. Sandmeier M. 1993.** Genetic variability among sorghum accessions from the Sahelian agro-ecological region of Burkina Faso. *Biod. Cons.* 2, 627-636.