

INTRODUCTION

L'augmentation durable de la productivité agricole nécessaire pour atteindre la sécurité alimentaire en Afrique n'est pas possible sans un secteur semencier performant car la semence reste l'intrant agricole le plus essentiel et sa maîtrise ne doit pas échapper aux producteurs au risque de les rendre plus vulnérables (Djamen, 2016). Ainsi, le sorgho a été identifié comme culture stratégique d'avenir pour les besoins alimentaires de l'Afrique en raison de sa capacité à résister à la sécheresse, même dans les zones où la pluviométrie demeure faible (Dembele, 2010).

Le sorgho est la deuxième céréale la plus importante en Afrique avec 22% des surfaces céréalères totales (Macaulay et Ramadjit, 2015). Dans la partie subsaharienne du continent, il se trouve en tête avec le mil dont ils occupent ensemble près de 50-70% des superficies cultivées (AECI et FAO, 2001). Au Sénégal, les superficies emblavées de sorgho sont estimées à près de 221 329 ha avec une production de 225 865 tonnes et un rendement de 1 020 kg ha⁻¹ (ANSD, 2018).

Grâce à sa plasticité et à sa grande diversité de formes, le sorgho peut s'intégrer dans de nombreux systèmes de culture des zones tropicales et tempérées. Il reste néanmoins une culture vivrière essentielle pour les populations des régions subtropicales arides et semi-arides (CIRAD, 2019). Sa capacité à fournir de nombreux services écosystémiques en fait une culture d'avenir (CIRAD, 2019). Malgré ces qualités et potentialités, les rendements en sorgho restent faibles et peinent à dépasser la tonne à l'hectare même si les rendements potentiels des variétés développées sont compris entre 3 à 5 tonnes/ha. La non accès des producteurs aux matériels génétiques de qualité, le déclin de la fertilité du sol, les difficultés d'adoption des bonnes techniques culturales, le dégâts inféodés aux moisissures, les problèmes liés au stress hydrique et au contexte socioéconomique sont les principales causes de la chute des rendements des cultures en Afrique sub-saharienne (Fall et Lo, 2009; Youl *et al.*, 2011). La rareté du matériel génétique de qualité est causée par les faiblesses dans les systèmes d'offre de semences (Dembele, 2010). La faible fertilité du sol est due à l'épuisement des éléments minéraux du sol (Henaou et Baanante, 2006), mais aussi à la non utilisation ou au faible taux d'utilisation d'intrants agricoles (engrais, variétés améliorées...) selon Gerstenmier et Choho (2015).

La nécessité d'améliorer les rendements en grain et la productivité des cultures sur les terres agricoles existantes devient alors un objectif primordial et évident puisque l'augmentation des surfaces cultivées n'est plus une pratique viable à cause de la forte croissance démographique (Fagade, 2000). Ainsi l'utilisation des semences certifiées est considérée comme la première étape du processus d'intensification agricole (Djamen, 2016). Néanmoins l'amélioration des techniques culturales (parmi lesquelles l'apport d'engrais organiques et chimiques) et la

sélection de variétés plus productives ouvrent des perspectives allant dans le sens de l'amélioration de la production agricole (Nyembo *et al.*, 2012).

Pour contribuer à l'intensification de la production en semences de sorgho grain, ce présent travail intitulé « Evaluation des effets de la densité de semis et de la fertilisation minérale sur la croissance, les rendements et la qualité des semences chez une nouvelle variété de sorgho en système irrigué » a été initié en condition irrigué dans la station de recherches agronomiques de Bambey (Bassin arachidier, Sénégal).

L'objectif général de cette étude était de contribuer à l'amélioration de la production de semences de sorgho au Sénégal. Il s'agissait spécifiquement de:

- ✚ évaluer les effets de la densité de semis sur la croissance, le rendement en grain et la qualité des semences de sorgho ;
- ✚ déterminer les effets de la dose de fertilisation minérale sur la croissance, le rendement, et la qualité des semences de sorgho ;
- ✚ évaluer la réponse du sorgho à l'action combinée de la densité de semis et de la fertilisation minérale.

Le présent mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique comprenant des généralités sur la fertilisation minérale, les densités de semis et la culture du sorgho grain. Le deuxième chapitre présente le site expérimental, le matériel végétal et la méthodologie adoptée pour la collecte et l'analyse des données. Les deux derniers chapitres sont consacrés respectivement aux résultats obtenus et à leur discussion générale. Le document est clôturé par une conclusion et quelques perspectives de recherches et la liste des références bibliographiques.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1. Généralités sur la fertilisation

1.1.1 Définition de la fertilité du sol

La fertilité du sol est définie comme étant la capacité du sol à répondre aux besoins physiques, chimiques et biologiques nécessaires à la croissance des plantes, pour leur productivité, leur reproduction et leur qualité, de manière adaptée au type de plante, au type de sol, à l'usage des sols et aux conditions climatiques (Abbott et Murphy, 2003). Ainsi selon le Réca (2010), la fertilité du sol pour un agriculteur, c'est sa capacité à fournir aux plantes cultivées les éléments nutritifs dont elle a besoin pour se développer et donner des graines, des fruits, des tubercules ou des feuilles en quantités importantes.

1.1.2. Lois de la fertilisation

Pour toute culture, la fertilisation doit permettre de couvrir au mieux les besoins des plantes en veillant à ne pas appauvrir les sols, ni à exagérer les apports. Il existe trois grandes lois de fertilisation : loi de compensation, loi du minimum et loi accroissements moins que proportionnels.

- ❖ Loi de compensation : les exportations d'éléments minéraux par les récoltes doivent être compensées par des restitutions pour éviter l'épuisement du sol.
- ❖ Loi du minimum : le rendement d'une culture est fixé par le niveau de l'élément le plus limitant. Pratiquement, c'est souvent l'azote qui a l'action la plus marquée. Les autres éléments nutritifs (potasse, phosphore, soufre... ou oligo-éléments) peuvent cependant aussi devenir limitants (Knoden *et al.*, 2007).
- ❖ Loi des accroissements moins que proportionnels (loi de Mitscherlich) : les augmentations de rendement obtenues par application de doses croissantes d'un élément fertilisant sont de plus en plus faibles au fur et à mesure que les doses apportées augmentent (loi de Mitscherlich). La recherche du rendement maximum n'est pas économiquement justifiée : les coûts occasionnés pour obtenir le dernier kilo d'herbe seront beaucoup plus importants que la valeur de ce kilo d'herbe.

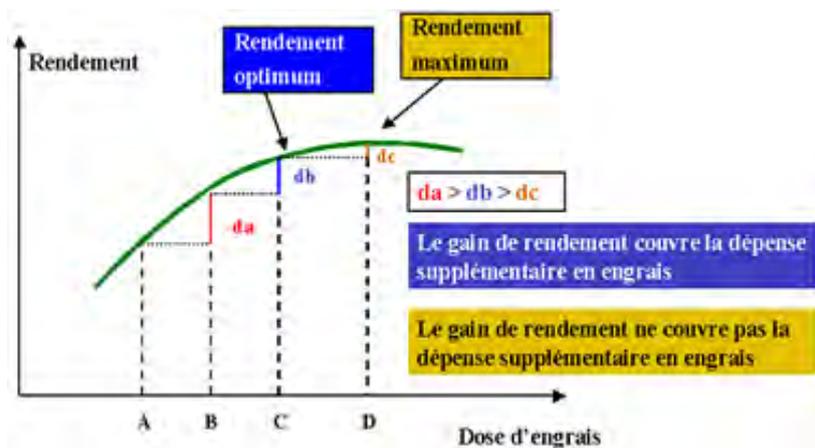


Figure 1 : Représentation de la loi de Mitscherlich
 Source : Knoden *et al.* (2007).

1.1.3. Rôle des engrais minéraux dans la fertilité des sols et le développement des plantes

La fertilisation du sol est l'apport d'éléments minéraux nécessaire pour un bon développement des plantes du sol. Elle peut être sous deux formes : minérale ou organique. Puisque le processus de minéralisation de la matière organique est lent, il est crucial d'utiliser la fumure minérale pour satisfaire aux besoins immédiats des plantes en minéraux.

La fertilisation minérale est très répandue de nos jours, elle est sollicitée pour l'agriculture, le jardinage et dans tous les secteurs d'activités où le rendement est prioritaire ! On peut la nommer engrais. Un engrais minéral désigne tout matériau d'origine naturelle ou synthétique (autre que le matériau de chaulage) qui est ajouté à un sol pour fournir un ou plusieurs éléments nutritifs essentiels à la croissance des plantes (ABGA, 2013). Ces engrais permettent d'apporter en quantité voulue un ou plusieurs éléments fertilisants comme l'azote, le phosphore, le potassium. Ces derniers sont considérés comme constituants fondamentaux de la vie des plantes et des animaux.

Rôle de l'azote

L'azote est un élément essentiel dans la nutrition minérale de la plante. Il entre, avec d'autres éléments (carbone, oxygène, hydrogène...), dans la composition des acides aminés formant les protéines. L'azote est un élément essentiel pour la constitution des cellules et la photosynthèse (chlorophylle). C'est le principal facteur de croissance des plantes et un facteur de qualité qui influe sur le taux de protéines des végétaux (Ziadi *et al.*, 2007). La forme d'engrais sec la plus

riche en azote est l'urée avec 46 % d'azote sous forme ammoniacal, elle est complètement soluble dans l'eau et agit moins rapidement que les nitrates. Aussi son effet dure plus longtemps qu'eux. L'hydrolyse de l'urée dépend de la température du sol. Elle ne nécessite que de trois à cinq jours en sol froid tandis que quelques heures suffisent en sol réchauffé. Son application est recommandée avant une pluie et doit être enfouie pour éviter d'éventuelles pertes par volatilisation (Ziadi *et al.*, 2007). L'azote est considéré comme le pivot de la fumure du sorgho.

Rôle du Phosphore (P)

Le phosphore permet une meilleure croissance racinaire, favorise un tallage plus actif avec des talles fertiles et agit sur le bon développement des grains en élevant leur valeur alimentaire. Il avance l'épiaison et agit positivement sur sa production (Adam, 2000 ; cité par Siri, 2015). Le phosphore a un rôle dans une série de fonctions du métabolisme de la plante et il est l'un des éléments nutritifs essentiels nécessaires pour la croissance et le développement des végétaux.

Rôle du Potassium (K)

Le potassium favorise le tallage et accroît la taille et le poids des grains. Il améliore le régime hydrique de la plante et accroît sa tolérance à la sécheresse, au gel et à la salinité. Il lui donne plus de rigidité pour lutter contre la verse et accroît la résistance de la plante aux maladies cryptogamiques Gros, (1979 ; cité par Siri, (2015). Il régularise la fécondation et favorise la migration des réserves vers les grains. Enfin, il accroît la réponse de la plante au phosphore.

1.1.4. Rôle des engrais minéraux dans l'accroissement des rendements

Une sous-utilisation d'engrais, comme c'est souvent le cas dans de nombreux pays en développement implique le non-remplacement des éléments nutritifs du sol exportés par les récoltes, ce qui conduit à une dégradation du sol et à une baisse des rendements (IFA, 2015). Traore, (2012) soutient que les apports d'azote sous forme de fertilisants sont souvent nécessaires pour permettre un rendement adéquat des légumineuses. Moreau, (1986) avait montré que les rendements sont en relation linéaire avec l'azote total. De même Bertrand et Gigou, (2000) affirment que L'alimentation en azote détermine directement le rendement potentiel. Selon Gros, (1967), il existe une relation étroite entre l'azote et le rendement des cultures.

1.1.5. Fertilisation minérale du sorgho

Pour produire 2 tonnes de grain à l'hectare, on estime qu'il faut apporter suivant les situations 35 à 45 kg/ha de N., mais les besoins instantanés en azote sont en général supérieurs chez les variétés améliorées à ceux des écotypes traditionnels. Cet azote n'est complètement valorisé que si les quantités de phosphore disponibles pour la plante sont suffisantes et cela dépend de la richesse du sol en cet élément. Pour le même niveau de production de 2 tonnes/ha de grain, une fumure d'entretien correcte se situe entre 20 et 30 kg/ha de P₂O₅ (Chantereau et Nicou, 1991).

1.1.6. Limites de la fertilisation minérale

L'utilisation des engrais minéraux à long terme favorise la dégradation de la structure du sol, limite sa capacité à retenir l'eau et les substances nutritives mais aussi augmente l'acidité du sol (Schöl, 1998; Bado, 2002). L'emploi irrationnel des engrais minéraux peut à la longue avoir des effets indésirables sur le milieu naturel, en plus de ses inconvénients agronomiques. De nos jours, il n'est plus utile de tester l'efficacité agronomique des engrais minéraux utilisés seuls car de nombreuses études ont montré leur effet positif à court terme, mais également leur effet négatif à long terme sur la dégradation chimique des sols (baisse du pH et augmentation d'aluminium échangeable notamment) entraînant de ce fait une baisse de rendement (Bado, 2002 ; Zeinabou *et al.*, 2014).

En ce qui est des inconvénients environnementaux, l'emploi intensif d'engrais, couplé à un mauvais drainage, risque la salinisation des zones trop arrosées, provoquant ainsi la stérilisation des sols et leur désertification (Ria *et al.*, 2016). Ainsi lorsque les terres agricoles sont saturées en engrais, l'eau emporte les NKP (azote, potassium et phosphate), qui polluent donc les réserves en eau (nappe), la rendant impropre à la consommation. Les fleuves et rivières, étant alimentés par les nappes phréatiques, peuvent aussi être pollués. Les nitrates et les phosphates provoquent la prolifération des végétaux aquatiques. Lorsque ceux-ci meurent, leur décomposition consomme le dioxygène contenu dans l'eau, entraînant la mort de la plupart des animaux: c'est le phénomène d'eutrophisation. Cette pollution touche au final plusieurs écosystèmes : les mers, les océans, les fleuves, les forêts (Marcus et Simon, 2015). La couche d'ozone est aussi affectée par ce problème, car les phénomènes de dénitrification et de volatilisation de l'ammoniac contenu dans les engrais azotés génèrent des gaz à effet de serre environ 150 fois plus actifs que le CO₂ (Ria *et al.*, 2016).

1.2. Densité de semis chez les céréales

1.2.1. Effet de la densité de semis sur les rendements des céréales à paille

Les résultats de Nasraoui (2005) sur l'orge ont montré que les fortes densités de semis favorisent le développement des maladies fongiques, entraînent un tallage et une épiaison (par plante) relativement faibles et ne permettent pas d'obtenir nécessairement une meilleure production quantitativement et qualitativement. En effet l'augmentation de la densité de semis augmente le nombre de plants/m² et le nombre d'épis/m² mais diminue le poids de mille grains, quoique dans une moindre mesure. L'augmentation de la densité de semis mènerait aussi à une diminution de la solidité de la tige et, dans certaines circonstances, pourrait augmenter la sensibilité à la verse des cultures (Beres *et al.* 2012). Le rendement, chez les céréales à paille a plusieurs composantes qui sont le nombre d'épis/m², le nombre de grains/épi et le poids des grains habituellement mesuré en poids de mille grains. D'une manière générale, ces composantes entrent en concurrence entre elles, mais l'intensité de cette concurrence va dépendre des conditions de croissance (rayonnement, eau, azote) et de la variété (Arvalis, 2018).

1.2.2. Densité de semis du sorgho

En situation irriguée ou dans les milieux à forte réserve en eau, les densités de peuplements plus élevées sont valorisées et permettent de maximiser le rendement. De même, en semis tardif, le nombre de grains par panicule est toujours plus faible et la densité de semis doit par conséquent être augmentée. La densité de semis doit prendre en compte plusieurs facteurs. Plus une variété est précoce, plus faible est l'indice foliaire et le nombre de grains sur sa panicule. De ce fait, les variétés les plus précoces requièrent des densités de peuplement plus élevées que des variétés plus tardives (Arvalis, 2019). La densité de semis doit également être adaptée à la réserve utile du sol. En conditions sèches, les peuplements trop élevés favorisent une forte production de biomasse, ce qui accentue les phénomènes de concurrence précoce entre les plantes et accélèrent l'épuisement de la réserve en eau.

En cas de stress hydrique précoce, les difficultés d'épiaison sont accentuées. Si, au contraire, le stress hydrique intervient pendant la phase de formation et de remplissage des grains, les risques de verse physiologique et de maladies de bas de tiges (*Macrophomina* spp. *Fusarium* spp.) sont accrus. La répartition spatiale des plantes est aussi un facteur d'optimisation et de gestion de la compétition des plantes sur les rangs. Même si ce sont les équipements en semoir qui

conditionnent cet aspect, pour les fortes densités, il est recommandé de resserrer les inter-rangs qui varient en sorgho grain de 30 à 75 cm. Enfin, dans tous les cas il faut tenir compte du taux de perte à la levée. En bonnes conditions, il se situe autour de 20%. Il peut être plus élevé si les conditions d'implantation sont défavorables (mauvaise qualité de semis, sol froid...) (Arvalis, 2019).

1.3. Généralité sur le sorgho

1.3.1. Importance et utilisation du Sorgho

Le sorgho est cultivé dans plusieurs régions tropicales et tempérées du monde où il entre dans la consommation humaine, animale et comme matière première dans l'industrie. Il est la cinquième céréale mondiale après le blé, le riz, le maïs et l'orge (Barnaud, 2007). L'Afrique détient plus de la moitié (55%) de la production mondiale dont elle utilise plus de 95% pour l'alimentation humaine, le reste étant consacré au bétail. Par contre, les pays industrialisés s'en servent prioritairement pour nourrir le bétail (Tovignan, 2011). Au Sénégal, le sorgho est après le mil, la deuxième céréale pluviale cultivée. Le grain peut être consommé entier. Il peut aussi être décortiqué et transformé en farine pour faire des bouillies et pâtes comme le « tô » en Afrique de l'Ouest, le couscous, les beignets ou les galettes. Le grain peut également être fermenté pour donner des boissons alcoolisées comme la bière traditionnelle d'Afrique de l'Ouest ou le vin de sorgho en Chine (CIRAD, 2002). La paille de ces sorghos est un sous-produit intéressant utilisée pour l'alimentation des animaux ou pour servir de combustible ou de matériau de construction.

1.3.2. Origine et diffusion du Sorgho

Le centre d'origine du sorgho a été pendant plusieurs années un sujet de contradiction entre les chercheurs. Pour certains, le sorgho proviendrait d'Afrique de l'ouest et pour d'autres du cadran nord-est de l'Afrique (Sahara). De nos jours, les chercheurs sont unanimes et donnent raison à Dogget (1965) qui considère que le sorgho a été domestiqué en Ethiopie ayant la plus grande diversité de sorgho à partir des formes sauvages il y a 5000 ans. Il se propagea en Afrique de l'ouest en passant par le Soudan, le Mali et la haute vallée du Niger qui sont devenus des centres de diversification secondaires du sorgho cultivé. Par voie maritime, le sorgho a atteint l'Asie avant l'ère chrétienne, l'Inde d'abord puis la Chine où l'on rencontre les sorghos « kaoling ». L'arrivée des sorghos en Europe date de l'époque romaine. Il s'est ensuite diffusé aux États-

Unis vers la moitié du XIX siècle par l'intermédiaire de la traite des noirs. Aujourd'hui, la plante originaire d'Afrique se trouve dans tous les continents.

1.3. 3. Systématique et classification

Le sorgho appartient à l'embranchement des Angiospermes, à la classe des Monocotylédones, à l'ordre des Glumales, à la famille des Poacées ou Graminées, dans la sous-famille des *Andropogoneae* au genre *Sorghum* (Chantereau et Nicou, 1991).

Le genre *Sorghum* se divise en cinq sections parmi lesquelles se trouve la section *Sorghum* composée de 3 espèces: 2 espèces sauvages et pérennes (*S. halepense* et *S. propinquum*) et une espèce annuelle (*S. bicolor*). Cette dernière comprend les sorghos cultivés (subsp. *bicolor*), les sorghos adventices et les sorghos sauvages (subsp. *arundinaceum*) (Doggett, 1988; Grenier, 2000). Cinq races de base sont distinguées (Figure 2) d'après la classification de Harlan et de Wet (1972) qui est la plus récente et la plus fonctionnelle : la race *Bicolor*, la race *Guinea*, la race *Caudatum*, la race *Kafir*, la race *Durra*.

- la race ***Bicolor*** comprend les sorghos aux caractères les plus primitifs. La panicule est lâche avec un grain petit, régulier, elliptique, entièrement enveloppé dans des glumes adhérentes.

- la race ***Guinea*** comprend les sorghos typiques des zones tropicales humides. La panicule est lâche. Elle porte des épillets dont les glumes sont baillants, longues et renferment un grain elliptique et aplati sur les faces dorsales et ventrales. Le grain subit une rotation à maturité par rapport au plan des glumes.

- la race ***Caudatum*** comprend des sorghos caractérisés par un grain dissymétrique, aplati sur la face ventrale, bombé sur la face dorsale et inséré dans des glumes courtes. La forme de la panicule peut être variable.

- la race ***Kafir*** comprend des sorghos à grains réguliers et sphériques. Leurs glumes de taille variable restent généralement inférieures au grain. Ils ont une panicule relativement compacte.

- la race ***Durra*** comprend des sorghos à panicules compactes, souvent portées par un pédoncule crossé. Leurs grains sont gros, globuleux, pris dans des glumes peu couvrantes et larges.

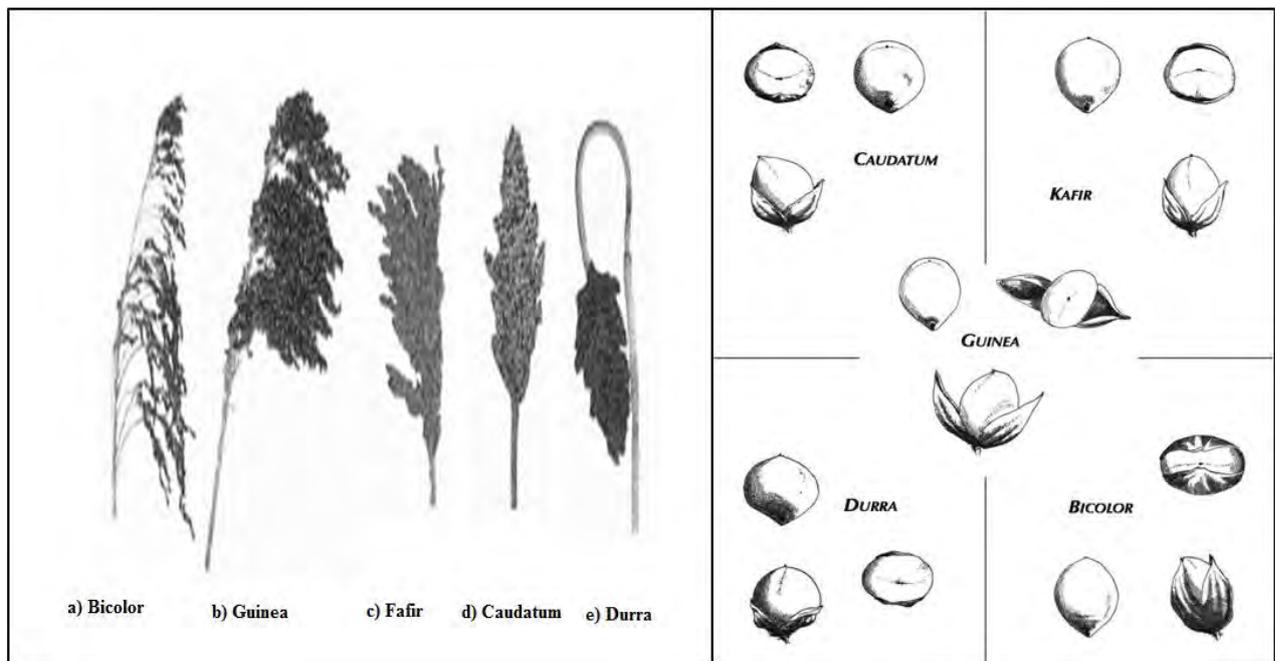


Figure 2: Structure des panicules et des grains des principales races de sorgho

Source : Clerget (2004) ; Vom Brocke *et al.* (2008)

1.3.4. Morphologie

L'ensemble des espèces du genre *Sorghum* sont des plantes herbacées comme la majorité des graminées. Elles possèdent un système racinaire puissant et sont composées de tiges robustes, dressées, garnies de feuilles plates et se terminant par une grande inflorescence rameuse qui, dans le cas du sorgho, est une panicule (Dehaynin, 2007). La description morphologique ci-dessous est inspirée des travaux de Chantereau et Nicou (1991) et de Balole et Legwaila (2006).

Le système racinaire

Le système racinaire est très développé. Il est concentré dans les 90 premiers centimètres du sol. La racine s'étale latéralement jusqu'à 1,5 m. A la germination, apparaît la racine primaire. Les racines secondaires se forment à partir du premier nœud de la racine primaire qui par la suite meurt. Les racines adventives apparaissent sur les nœuds inférieurs de la tige et s'enfoncent jusqu'à 2 m dans le sol. Les ramifications qu'elles émettent donnent les racines latérales qui explorent le sol dans toutes les directions. Le sorgho cultivé est une plante annuelle mais, ses racines peuvent demeurer dans le sol et permettre le développement des rejets à partir de bourgeons adventifs situés à la base de la tige mère.

La tige (chaume)

La plante de sorgho comprend une tige principale accompagnée de talles issues du développement de bourgeons adventifs sur le collet du maître brin. Le nombre de talles par pied varie tant en fonction des caractéristiques variétales que des conditions de culture (Chantereau et Nicou, 1991). Elle peut être de talle unique ou multiple, grêle et robuste. Elle est constituée de nœuds alternant avec les entre-nœuds. Les dimensions de la tige de sorgho sont 0,5 – 5 cm x 0,4 - 4 m (Balole et Legwaila, 2006).

La feuille et le pédoncule

La distribution des feuilles est variable le long de la tige. Les feuilles peuvent être concentrées à la base chez certains types. Elles peuvent être uniformément réparties le long de la tige chez d'autres. Les feuilles sont alternes, simples, de gaines de longueurs comprises entre 15 et 35 cm, d'une ligule courte d'environ 2 mm, d'un limbe lancéolé mesurant entre 30 et 135 cm de long sur 1,5 à 13 cm de large (Balole et Legwaila, 2006).

Le pédoncule est l'entre-noeud terminal qui porte l'inflorescence. Sa croissance est indépendante des autres parties de la tige. Il est généralement droit sauf chez de nombreuses variétés *durra* où il est croisé. Sa longueur est indépendante de celle des autres entre-noeuds en raison d'un déterminisme génétique différent (Chantereau *et al.*, 2013).

L'inflorescence et le grain

L'inflorescence est une panicule qui peut être courte et compacte ou bien lâche et ouverte : de 4 à plus de 25 cm de long sur 2 à plus de 20 cm de large. 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. 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. La panicule croît ordinairement de manière verticale au sommet de la tige, mais peut aussi se recourber. C'est une caractéristique de certaines races de sorgho. La ramification ultime des branches secondaires ou tertiaires, est un racème qui consiste toujours en un ou plusieurs épillets. Un épillet est toujours sessile et l'autre pédicellé à l'exception de l'épillet terminal qui est sessile et flanqué de deux épillets pédicellés. Chaque épillet est constitué d'une paire de glumes et de glumelles. L'épillet a deux pistils et trois étamines. Les fleurs de sorgho s'ouvrent pendant la nuit ou commencent le matin.

Ceux au sommet de la panicule s'ouvrent en premier et il prend approximativement 6 à 9 jours pour que la panicule entière fleurisse (Ouédraogo, 2014).

La graine de sorgho est un caryopse sphérique à un peu aplati composé de trois parties principales : l'enveloppe qui constitue le péricarpe, le tissu de réserve ou albumen et l'embryon. Entre le péricarpe et l'albumen peut se trouver une couche hautement pigmentée, la couche brune encore appelée testa (Chantereau et Nicou, 1991). Sa présence ou son absence constitue une caractéristique variétale. Riche en composés taniques, elle paraît conférer des qualités de résistance aux moisissures des graines qui en sont pourvues. Par contre, elle colore les préparations culinaires, leur donne de l'amertume et diminue leur digestibilité. Ces sorghos à couche brune sont peu appréciés par les oiseaux.

L'albumen du sorgho présente à l'extérieur une couche périphérique de cellules riches en vitamines, protéines et huile: la couche d'aleurone. Sous cette première se trouve l'albumen corné, vitreux, caractérisé par l'existence de granules d'amidon pris dans une matrice protéique dense. Vient ensuite l'albumen interne, farineux, où les granules d'amidon sont insérés dans une matrice protéique peu importante avec de nombreuses lacunes. L'évaluation du poids du caryopse est souvent réalisée avec des échantillons de mille graines, ce qui rend compte à la fois de données culturales et variétales de la plante.

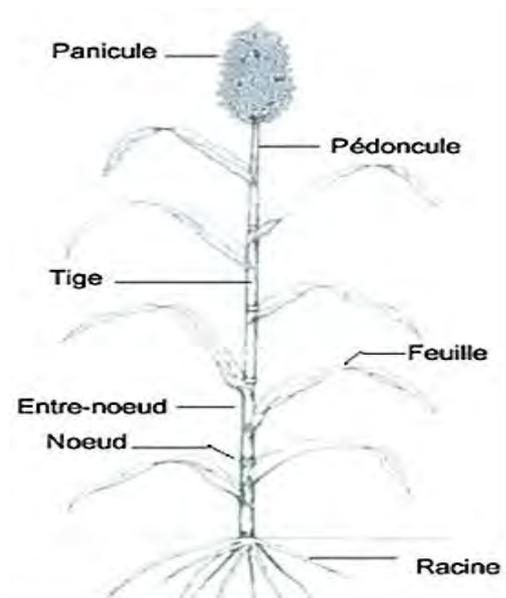


Figure 3: Les différentes parties d'un plant de sorgho
Source: Clerget (2004)

1.3.5. Cycle de développement et phénologie

Les différentes phases de croissance d'un sorgho de 110 jours sont résumées dans la figure 4.

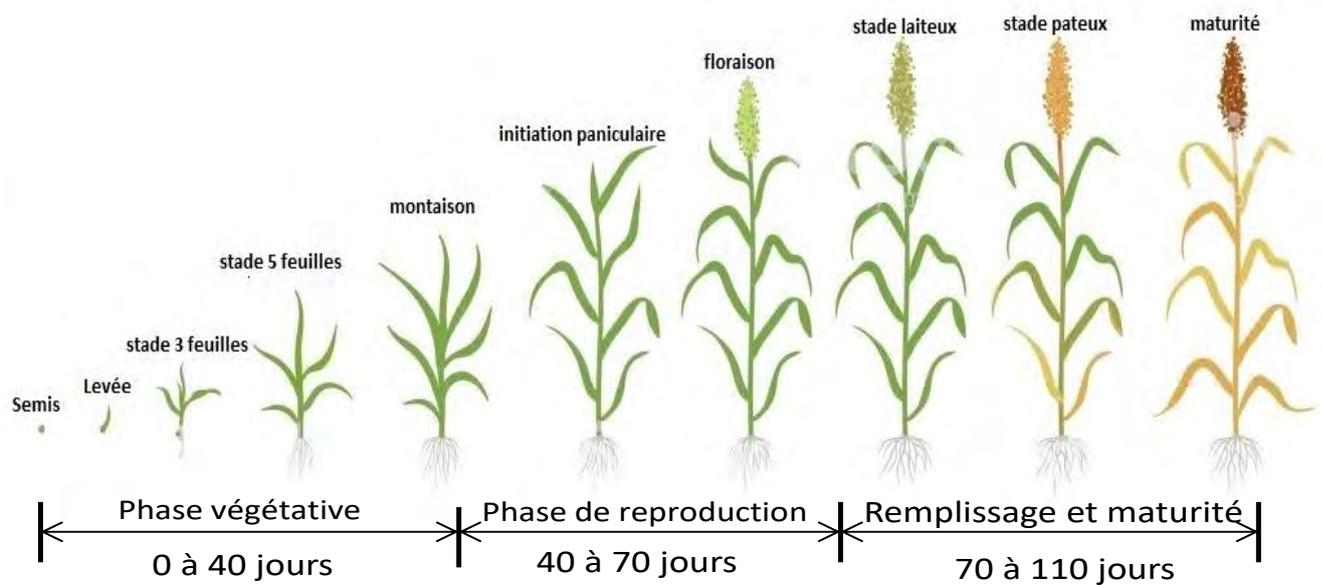


Figure 4 : Stades de développement du sorgho
 Source : www.dreamstime.com (modifiée par Coumba THIAW et Moustapha GUEYE)

Germination et émergence

Les conditions idéales pour faire démarrer le semis du sorgho sont un sol chaud et humide, ameubli en profondeur et finement préparé en surface Chantereau et Nicou (1991). Au Sahel, en saison des pluies, la germination survient à 3 ou 4 jours après un semis réalisé dans un sol humide et avec des températures journalières moyennes d'environ 27°C selon Chantereau et ses collaborateurs (2013). Lorsqu'une graine est enfouie dans un sol humide, elle s'imbibe d'eau et se gonfle. Si la Température du sol est supérieure ou égale à 20°C, après une bonne pluie de 20 mm, la germination se fait rapidement. Le coléoptile émerge du sol avec l'apparition d'une première feuille en 3 ou 4 jours après semis.

Tallage

La plante de sorgho n'a généralement qu'une seule tige. Certains sorghos tallent abondamment en particulier les sorghos fourragers. Les sorghos-grains ont une capacité de tallage variable mais en général ils ne tallent que si l'humidité du sol est convenable ou que si le peuplement est clair. Chez les variétés qui tallent normalement, les talles prennent naissance à partir de bourgeons adventifs au nœud basal aussitôt après la sortie des racines secondaires. En bonnes conditions, le tallage commence quinze jours environ après le semis. Il est limité dans le temps par un mécanisme physiologique interne. Il peut reprendre lors de circonstances exceptionnelles: cassure de tiges par accidents, aléas climatiques ou attaques parasitaires. Si de tels événements se produisent à un stade avancé du cycle végétatif, la reprise du tallage ne sera pas basale mais se situera au niveau d'entre nœud placés plus haut sur les tiges (Chantereau et

Nicou, 1991). L'aptitude au tallage dépend aussi bien 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 ; cité par Ouédraogo, 2014).

Montaison et floraison

L'apparition de l'inflorescence est précédée par un gonflement de la gaine de la dernière feuille. Il s'en suit une élongation cellulaire du bourgeon floral initial qui marque la montaison. En 6 ou 10 jours par croissance du pédoncule, la panicule se dégage. C'est la phase d'épiaison

Normalement la floraison intervient lorsque la panicule s'est entièrement déployée. La panicule de sorgho commence à fleurir à partir du sommet et la floraison se poursuit par étage successif en allant vers le bas durant une période de 4 à 5 jours. Etant 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. Au moment de la floraison, les glumes s'ouvrent et les trois anthères pendent librement tandis que les deux stigmates sortent, chacun d'entre eux est porté par un style rigide. La floraison commence souvent juste avant ou juste après le lever du soleil, mais peut être retardée les matinées où le temps est humide et nuageux. Les anthères effectuent leur déhiscence lorsqu'elles sont sèches, mais pas en condition de forte rosée ou de pluie et le pollen est entraîné dans l'air (House, 1987).

Remplissage et maturité

Le remplissage des grains commence juste après la pollinisation. La durée de remplissage complet varie de 30 à 50 jours environ selon le cycle des variétés et les facteurs climatiques. Ce sont essentiellement les feuilles supérieures de la plante qui, par leur activité photosynthétique, assurent l'accumulation de réserves. La maturité débute à la fécondation des fleurs. Les glumes se ferment et les graines commencent leur croissance en gonflant lentement. Le contenu des graines prend une consistance laiteuse puis pâteuse et enfin dure. En passant du stade laiteux au stade pâteux, elles changent de couleur, en virant du vert à leur teinte définitive. En zone tropicale, les graines ont besoin de 30 à 35 jours pour arriver à la maturité physiologique qui correspond à l'apparition d'un point noir à leur base dans la région du hile. Pour le voir, il faut extraire les graines de leurs glumes. Le poids des graines est alors

maximal et le taux d'humidité d'environ 30 % (Chantereau *et al.*, 2013).

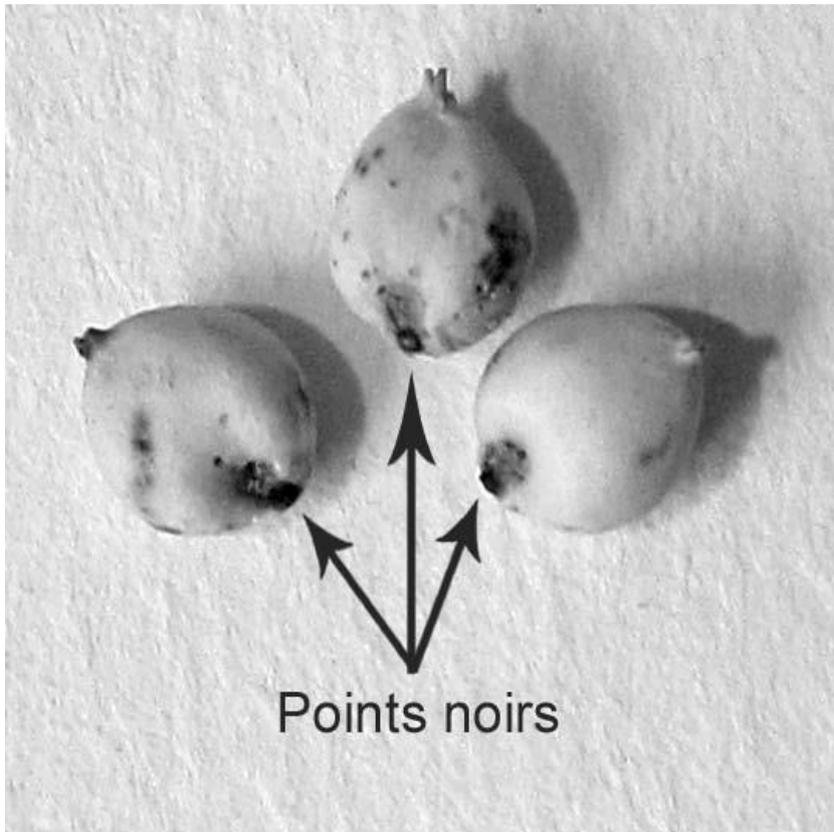


Figure 5: Grains de sorgho matures

Source : Chantereau (2013)

1.3.6. Ecologie

Température

La température agit sur la croissance du sorgho. Pour germer, la graine de sorgho demande un sol humide et des températures moyennes journalières supérieures à 12°C. Si les conditions sont bonnes ($T > 20^{\circ}\text{C}$), les semences lèvent en trois ou quatre jours. Selon Chantereau *et al* (2013), la température optimum pour la croissance du sorgho est de 30 °C, cependant lorsque les températures descendent en dessous de 11 °C (zéro de germination) ou dépassent 42 °C, la croissance des sorghos s'arrête.

Photopériode

La floraison et de nombreuses réactions physiologiques étaient accélérés soit par les jours longs soit par les jours courts, en fonction des variétés considérées Garner et Allard (1920) cités par (Clerget, 2004). Chez les céréales comme le sorgho la variation de la durée du cycle concerne principalement la phase photosensible. En raison de son origine tropicale, le sorgho est une

plante photopériodique de jours courts. La floraison est retardée d'autant plus que la phase végétative s'opère en jours plus longs. Cependant, l'adaptation du sorgho aux zones subtropicales puis tempérées a été possible par perte de photosensibilité, ceci explique qu'aujourd'hui, il existe des variétés peu ou pas photopériodiques (Chantereau et al, 2013).

Besoin en eau

Le sorgho est une des plantes cultivées les moins exigeantes en eau. Ses besoins totaux sont de l'ordre de 400 à 500 mm (Arvalis, 2017). En outre, grâce à son système racinaire performant, il est capable d'extraire et d'utiliser avec plus d'efficacité l'eau du sol. Cependant, la capacité d'adaptation du sorgho au stress hydrique a des limites lors de sécheresses estivales très marquées. Des différences de l'ordre de 40 q/ha ont été mesurées entre des cultures irriguées et des conduites en sec. L'irrigation est donc nécessaire pour régulariser les rendements et atteindre le potentiel des variétés. La période la plus sensible au manque d'eau se situe à partir du gonflement jusqu'à la floraison. En cas de stress pendant cette période, la fertilité des panicules est systématiquement affectée. Avant cette période, c'est-à-dire du stade 8 feuilles jusqu'au gonflement, un besoin en eau non satisfait risque de perturber l'épiaison de certaines variétés et affectera la fertilité des panicules. La période de remplissage des grains est peu sensible (Arvalis, 2017).

Type de sol

Le sorgho est bien adapté sur les vertisols lourds que l'on trouve couramment dans les tropiques, où sa tolérance à l'asphyxie racinaire est souvent nécessaire, mais les sols sableux légers lui conviennent tout autant. C'est toutefois sur les limons et les limons sableux que sa culture réussit le mieux. La fourchette de pH du sol supportée par le sorgho est de 5,0-8,5, et il tolère davantage la salinité que le maïs. Il est adapté aux sols pauvres et peut produire du grain sur des sols où beaucoup d'autres cultures échoueraient (Ouedraogo, 2014).

1.3.7. Contraintes liées à la culture du sorgho

Les maladies fongiques

Le sorgho peut héberger de nombreux champignons qui sont la cause de certaines maladies.

L'antracnose est l'une des plus importantes maladies du sorgho (Chantereau et al, 2013). Elle est observée parfois sur des plantules et affecte le plus souvent, le limbe des feuilles mais peut aussi se porter sur les autres parties aériennes de la plante comme les gaines, les tiges, les panicules.

Les moisissures des grains du sorgho sont maintenant bien reconnues comme le premier problème pathologique de cette plante dans le monde et en particulier au Sénégal (Louvel, 1984). En effet, cette maladie affecte le rendement et la qualité des grains (Thakur *et al*, 2006). Elles sont causées par un complexe fongique (*Fusarium*, *Curvularia*, *Alternaria* et *Helminthosporium*) et sont favorisées par l'association de l'humidité et de la chaleur.

Le mildiou (*Peronosclerospora sorghi*) affecte les plantes à presque tous les stades de croissance en laissant des rayures vertes et blanches très vives sur les feuilles et elle peut entraîner alors stérilité partielle ou complète. Des cultures denses et une pluie abondante après l'ensemencement favorisent le développement de la maladie.

Les insectes ravageurs

Selon (Benaz1, 2013), les insectes nuisibles au sorgho les plus fréquents dans la zone sahélienne sont : la cécidomyie, les chenilles foreuses, la mouche des semis et la punaise des panicules.

-la cecidomyie (*Stenodiplosis sorghicola*) qui est une petite mouche phytophage ou zoophage, les dégâts causés par les larves peuvent être très importants et peuvent atteindre dans certains cas 70% de la production ;

-les chenilles foreuses de tige du sorgho (*Chilo partellus*), elles causent souvent des dégâts considérables qui se traduisent en généralement par ‘‘ le cœur mort’’ ;

-la mouche des semis (*Altherigoma soccota*), c'est une mouche de la famille des Muscidae, les œufs sont déposés à la place inférieure des feuilles des jeunes pousses et plantules. Après l'éclosion, la larve creuse vers la base de la jeune plante une galerie en passant derrière ou à travers la gaine foliaire pour traverser finalement le point végétatif, détruisant le cœur de la plante ;

-les punaises des panicules qui sont phytophages ont parmi leurs plantes-hôtes des céréales tropicales et en particulier le sorgho. Les punaises des panicules du sorgho sont surtout présentes sur les parcelles semées en contre-saison.

Les adventices (mauvaises herbes)

En premier lieu, les mauvaises herbes peuvent avoir un effet négatif direct par compétition avec la culture vis-à-vis des éléments nécessaires à la croissance (eau, nutriments, lumière, espace de développement) (CIRAD, 2001). Cette compétition est d'autant plus importante en début de cycle, qu'aux premiers stades de développement les mauvaises herbes absorbent plus vite les nutriments que la culture (CIRAD, 2001). Le striga (*Striga hermonthica*) est la mauvaise herbe qui parasite le plus souvent le sorgho. Il est même un facteur limitant de la production du sorgho. Le striga lève pendant la montaison du sorgho et fleurit pendant sa maturation. Il est associé aux conditions de faible fertilité des sols (Ouédraogo, 2014).

Les oiseaux

Les pertes dues à l'attaque des oiseaux lorsqu'ils se nourrissent des grains représentent un fléau bien répandu. Ces pertes augmentent lorsque la culture est une introduction ou une variété qui arrive à maturité beaucoup plus tôt ou plus tard que le type local. Les principales espèces ravageuses en Afrique sont le travailleur à bec rouge (*Quelea quelea*), le gendarme (*Ploceus cucullatus*), le moineau doré (*Passer luteus*) et le travailleur à tête rouge (*Quelea erytrops*) selon Appert et Deuse (1982).