

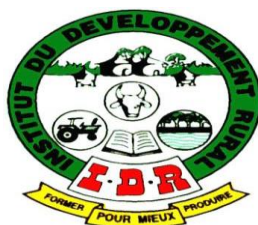
BURKINA FASO

Unité-Progrès-Justice

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE ET DE L'INNOVATION (MESRSI)**

UNIVERSITE NAZI BONI (UNB)

INSTITUT DU DEVELOPPEMENT RURAL (IDR)



MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

En vue de l'obtention du

DIPLOME D'INGENIEUR DU DEVELOPPEMENT RURAL

OPTION : VULGARISATION AGRICOLE

Thème :

**Caractérisation de l'indice foliaire de dix variétés de sorgho
suivant différentes méthodes de mesure en station expérimentale
de Farako-Bâ (BURKINA FASO)**

Présenté par : OUATTARA Oula Zoumana

Maître de stage : Dr Myriam ADAM

Directeur de mémoire : Pr H. Bismarck NACRO

Co-directeur de mémoire : Dr Kalifa COULIBALY

N :2017/VA

Novembre 2017

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	ii
DEDICACE	v
REMERCIEMENT	vi
SIGLES ET ABREVIATIONS	vii
LISTE DE TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES PHOTOS	viii
RESUME	ix
ABSTRACT	x
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Synthèse Bibliographique	4
1.1. Généralités sur le sorgho	5
1.1.1. Origine, diffusion et classification du sorgho	5
1.1.2 Morphologie du sorgho	7
1.1.3. Physiologie du sorgho	9
1.1.4. Besoins environnementaux	9
1.1.5. Quelques contraintes liées à la production du sorgho	10
1.2. Généralité sur le LAI (Leaf Area Index) ou Indice foliaire	11
1.2.1. Définition	11
1.2.2. Interception de la lumière par un couvert.....	11
1.2.3. Rôle fonctionnel du LAI	12
1.2.4. Quelques paramètres influençant le LAI	13
1.2.4.1. Densité foliaire et orientation des feuilles	13
1.2.4.2. Teneur en eau et élément minéraux du sol	14
1.2.4.3. La variété culturale	14
1.2.5 Mesures de LAI	15
1.2.5.1. Les méthodes directes.....	15

1.2.5.1.1. Collecte des feuilles	15
1.2.5.1.2. Détermination de la surface foliaire.....	16
1.2.4.2. Les méthodes indirectes.....	17
Chapitre 2 : Matériel et méthodes	20
2.1. Présentation de la zone d'étude	21
2.1.1. Site d'expérimentation	21
Figure 3 : Carte de Farako-bâ	21
2.1.2. Climat.....	21
2.1.3. Végétation	23
2.1.4. Sols.....	23
2.2. Matériel d'étude.....	23
2.2.1. Matériel végétal.....	23
2.2.2. Matériel de mesures	25
2.2.2.1. LAI-2000	25
2.2.2.2. Sunscan	25
2.2.2.3. Scanneur	26
2.2.2.4. Le ruban métrique.....	27
2.3. Méthode d'étude.....	27
2.3.1. Description du dispositif expérimental	27
2.3.2. Itinéraire culturale	29
2.3.3. Collecte des données	30
2.3.3.1. Paramètres agronomiques mesurés.....	30
2.3.3.2. Mesures de LAI	31
2.4. Traitement et Analyse des données	32
2.4.1. Interaction entre variété et méthode de mesure du LAI au stade Feuille Drapeau	32
2.4.2. Effet des méthodes sur le LAI en cours du cycle de développement.....	33
2.4.3. Corrélation entre méthodes et quelques paramètres simples de mesures.....	33
Chapitre 3 : Résultats et Discussion.....	34
3.1. Résultats.....	35
3.1.1. Interaction entre variété et méthode de mesure du LAI au stade Feuille Drapeau	35
3.1.2. Effet des méthodes sur la mesure du LAI au cours du cycle de développement	37
3.1.3. Corrélation entre le LAI et quelques paramètres simples de mesures	39

3.2. Discussion.....	43
3.2.1. Effet des méthodes sur la mesure du LAI au cours du cycle de développement	43
3.2.2. Interaction entre variété et méthode de mesure du LAI au stade Feuille Drapeau	44
3.2.3. Corrélation entre le LAI et quelques paramètres de croissance de la plante.....	44
Conclusion et perspectives	46
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	47
ANNEXES.....	A
Annexe 1 : Mesure du LAI avec le LAI-2000	A
Annexe 2 : Fiches d'observation agronomique	A
Annexe 3 : Mesure de la longueur et de la largeur des feuilles	B
Annexe 4 : Mesure du LAI avec le Sunscan	B
Annexe 5 : Pied à coulis utilisé pour la mesure du diamètre médian	C

DEDICACE

A

- ❖ *Mes parents OUATTARA SAN ANTOINE et COULIBALY GNINE DJENEBA pour avoir guidé mes premiers pas et pour leur présence pendant le plus mauvais souvenir que je n'ai jamais connu. Qu'Allah les rendent au centuple.*
- ❖ *Toute la famille OUATTARA au secteur n°2 de Bérégadougou et particulièrement aux frères DISSI OMAR et SAN SOULEYMENE pour leur soutiens multiformes et inestimables*

REMERCIEMENT

Il est de notre devoir de remercier celles et ceux grâce à qui ce travail de mémoire a été réalisé. Etant le fruit d'un projet conjoint entre le **CIRAD/ICRISAT** et le programme céréale traditionnelle de l'INERA, le mérite revient aux responsables de ces différentes structures. Le présent mémoire a été le couronnement des efforts d'imminentes personnalités de très bonne volonté à qui il revient de traduire toute notre gratitude. Ainsi donc nous remercions :

- Directeur Régional de l'Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles de l'Ouest le Dr **Ibrahima OUEDRAOGO** pour avoir autorisé notre stage a la station de Farako-Bâ ;
- Dr **Myriam ADAM** notre maître de stage qui nous a assuré un encadrement rapproché et nous a soutenu aussi bien en nature qu'en espèce durant tout le stage jusqu'à la rédaction finale du présent mémoire. Même pendant ses congés, elle est restée ouverte et joignable pour toutes inquiétudes. Nous lui sommes vraiment redevable et lui souhaitons plein succès dans ses activités ;
- Pr **Hassan Bismarck NACRO** notre directeur de mémoire, professeur titulaire à l'Université Nazi Boni (UNB), pour tous les apports à la qualité scientifique du document ;
- Dr **Kalifa COULIBALY** notre co-directeur de mémoire, enseignant chercheur à l'UNB dont la rigueur, les encouragements et les multiples apports ont concouru à améliorer de la qualité de ce document ;
- Dr **Souleymane SANOGO**, enseignant à l'IDR/UNB pour ses encouragements et son soutien sans faille au moment de l'analyse de nos données ;
- Tout le personnel de l'INERA/Farako-Bâ et particulièrement ceux de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) pour nous avoir ouvert leur salle informatique durant tout le stage ;
- Monsieur **SANOUE Daouda**, le technicien et encadreur de terrain ainsi que toute l'équipe avec qui nous avons développé un sens de rigueur professionnel ;
- Tout le corps enseignant de l'IDR pour la qualité de la formation reçue ainsi que tous les camarades de classe pour l'ambiance, la solidarité et l'esprit de famille qui a régné pendant les trois années passées ensemble ;
- Tous mes parents et amis pour leur immense soutien et encouragement. Nous n'oublions pas feux **BARRO Oula Siaka** et **OUATTARA Pié Ardjouma** puisse leur âme reposent en paix.

SIGLES ET ABREVIATIONS

ANOVA : ANalyse Of VAriance

CIRAD : Centre de coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement

DGPER : Direction Générale de la Promotion et de l'Économie Rural

DGESS : Direction Générale des Etudes et des Statistiques Sectorielles

DDL : Degré de Liberté

FAO : Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture)

FAOSTAT: Food and Agricultural Organization Corporate Statistical Database

FD: Feuille Drapeau

ICRISAT: International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics

INERA : Institut de l'Environnement et de Recherche Agricole

IRAM : Institut de recherches agronomiques de Madagascar

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

JAS : Jour Après Semis

LAI : Leaf Area Index (Indice de Surface Foliaire)

MAAH : Ministère de l'Agriculture et des Aménagements l'Hydraulique

UNB : Université Nazi Boni

USDA : Département des Nations Unies pour l'Agriculture

PAR : Photosynthetic Active Radiation

FL : Feuille Ligulée

RLA : Rate of Leaf Appearance

NFA : Nombre de Feuille Apparue

NFL : Nombre de Feuilles Ligulées

NFV : Nombre de Feuille Verte

SWOT: Strengths Weakness Opportunities Threats

LISTE DE TABLEAUX

Tableau I : Production céréalière comparée des campagnes 2014-2015 et 2015-2016 et à la moyenne des cinq dernières années.....	11
Tableau II : Matériel végétal et caractéristique des variétés utilisées pour l'essai.....	24
Tableau III : Effet combiné de la méthode de mesure du LAI et de la variété au stade FD...	35
Tableau IV : Effet des différentes méthodes sur la mesure du LAI suivant différentes dates de mesures.....	36
Tableau V : Comparaison multiple des moyennes entre les méthodes à 30 JAS.....	38
Tableau VI : Comparaison multiple des moyennes entre les méthodes à 51 JAS.....	39
Tableau VII : Relations entre LAI et les paramètres simples de mesure.....	41

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Classification des sorghos selon la forme des panicules.....	6
Figure 2 : Morphologie d'une plante de sorgho.....	8
Figure 3 : Carte de farako-Bâ.....	21
Figure 4 : Précipitation et nombre de jours de pluie des dix dernières années sur la station de Farako-Bâ.....	22
Figure 5 : Pluviométrie insolation et températures moyenne de 2016.....	22
Figure 6 : Dispositif de l'essai.....	28
Figure 7 : Plan d'une parcelle élémentaire.....	29
Figure 8 : Effet des variétés sur le LAI.....	35
Figure 9 : Corrélations entre LAI et les paramètres de croissance.....	40
Figure 10a : LAI simulé par le diamètre et la hauteur.....	42
Figure 10b : LAI simulé par le Nombre de Feuille Ligulée et le Nombre de Feuille Verte..	42
Figure 10c : LAI simulé par Le produit longueur et largeur de la dernière feuille ligulée...	42

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Image du LAI-2000.....	25
Photo 2 : Image du sunscan.....	26
Photo 3 : Image du scanner <i>taotonics</i>	26
Photo 4 : Mesure via LAI-2000	A
Photo 5 : Mesure de la largeur de la feuille.....	B
Photo 6 : Mesure de la longueur de la feuille.....	B
Photo 7 : Mesure via le sunscan.....	B

RESUME

L'indice foliaire est une variable clé pour l'étude du fonctionnement des surfaces végétales car il conditionne les échanges de carbone et d'eau avec l'atmosphère. Il existe au stade actuel plusieurs méthodes pour le calculer ou l'estimer mais le véritable souci est de trouver une méthode fiable à la fois non destructive et moins coûteuse. Dans ce contexte, le travail réalisé s'est fixé comme objectif de comparer quatre méthodes de mesure de LAI afin de proposer une méthode simple, fiable et utilisable en milieu paysan tenant en compte non seulement des contraintes de temps et de main d'œuvre mais aussi des contraintes d'investissement. Les méthodes comparées sont le LAI-2000 (M2), le sunscan (M3), la mesure via la longueur et la largeur de toutes les feuilles ligulées (M1) et enfin la mesure au scanner qui constitue la méthode de référence (M0). Les mesures ont porté sur dix variétés de sorgho des races botaniques *guinea*, et *caudatum*, suivant un dispositif en bloc complètement randomisé. Une série de mesure a été faite au cours du cycle de développement (30, 40, 51, 65, 77, 93 JAS) et une autre à la floraison (stade feuille drapeau). Les résultats au cours du cycle de développement montrent que toutes les quatre méthodes donnent une bonne estimation du LAI. Cependant on remarque qu'en début de saison soit 30 Jours Après Semis (JAS) le LAI-2000 donne une surestimation du LAI par rapport aux autres méthodes. Cette surestimation est de l'ordre de 43,62% ; 34,04% et 46,81% respectivement par rapport à M0, M1 et M3. De plus on remarque une sous-estimation du LAI de l'ordre de 59,57% de la M3 au 51^{ème} JAS par rapport à la méthode de référence. Des corrélations entre LAI et certains paramètres mesurés nous ont permis d'établir des équations pouvant servir à prédire le LAI à partir de ces paramètres mesurés sur le terrain. Une analyse des forces faiblesses opportunités et menaces (SWOT) de toutes les méthodes nous a permis de proposer une méthode de mesure du LAI susceptible d'être utilisée en milieu paysan par le simple comptage du nombre de feuille ligulée et de la hauteur de la plante. Au stade feuille drapeau il ressort que toutes les variétés bien que différentes entre elles n'ont pas de spécificité quant aux méthodes.

Mots clés : LAI, méthode directe (ou destructive), méthode indirecte, prédiction, sorgho, Burkina Faso.

ABSTRACT

Leaf Area Index is a key variable for the survey of the working of the plant surfaces because it conditions exchanges of carbon and water with the atmosphere. Present several methods exist to calculate or to estimate it. But the real worry is to find a reliable method at a time destructive and less expensive. In this context, the achieved work set like objective to compare four methods of measure to LAI in order to propose a simple, reliable and usable method in peasant environment not only holding in account of the constraints of time and manpower but also of the investment constraints. Methods to compare are LAI-2000, sunscan, measure through length and width of all leaves ligula and measure to the scanner that constitutes our reference method. Measures were about ten varieties of sorghum of the botanicals races *guinea* and *caudatum* by a device in completely randomized block. A set of measure has been made during development cycle and another to flowering. The results during development cycle show that all four methods have well evaluation of the LAI. However one notices that in beginning in season either 30 JAS the LAI-2000 gives an overestimate of the LAI in comparison to the other methods. This overestimate is the order of 43.62%; 34.04% and 46.81% respectively regarding to M0, M1 and M3. Besides one notices a misjudgment of 59.57% to M3 in the 51 JAS in relation to the reference method. Interrelationships between LAI and some parameter measured permitted us to establish some equations to serve to predict the LAI from these parameters simple measured on the land. A SWOT analysis of all methods permitted to finalize one methods simple of measure of LAI in peasant environment by the numbering of the number of leaf ligula and the tallness of the plant. To flowering it comes out again that all varieties although different between them don't have specificity as for the methods.

Keys words: LAI, sorghum, direct methods, indirect methods, predict, Burkina Faso

Introduction générale

L'un des défis majeurs auquel l'humanité doit faire face est celui de la dégradation de l'environnement et ses corollaires, ainsi que les problèmes des changements climatiques. En Afrique, l'agriculture qui est le moteur de la croissance économique demeure le secteur le plus directement menacé par ces changements. La diversité des sols, la variabilité interannuelle du climat et le tarissement de la ressource en eau non renouvelable ou très peu renouvelable, contribuent fortement à l'instabilité des rendements dans le continent, tout particulièrement dans sa région au sud du Sahara où l'agriculture pluviale prédomine encore (Meridja, 2011). L'Afrique est le centre d'origine de production de diverses céréales dont le sorgho (*Sorghum bicolor* (L) Moench) qui représente la deuxième céréale la plus importante après le maïs, avec 22% des surfaces céréalières totales (FAO, 2015). Le sorgho se distingue des autres céréales de par sa rusticité, la stabilité de ses superficies et de son rendement moyen de 1,4 t/ha en 2010 et 1 t/ha en 2011 (Chantereau *et al.*, 2013). Ces céréales seraient des aliments de base pour la majorité de la population et seraient cultivées sur une surface de 98,6 millions ha, produisant 162 millions de tonnes (FAO, 2015).

Selon les chiffres du Département Américain de l'Agriculture (USDA, 2016) pour la période 2015/2016, l'Afrique a consacré 24,09 millions d'hectares au sorgho, soit 56% des superficies mondiales. En Afrique de l'Ouest, le sorgho est cultivé préférentiellement dans des régions distinctes qui forment des bandes grossièrement orientées d'Est en Ouest et plus au sud, à la marge du Sahara, se trouve la région de culture principale du sorgho, dans la zone soudanienne entre les isohyètes 600 et 1100 mm (Clerget, 2004). Ainsi, la plupart des pays y compris le Burkina Faso se trouvant dans cette bande voient le sorgho dominer leurs productions céréalières. Au Burkina Faso, le sorgho fait partie des céréales les plus cultivées. Selon la Direction Générale des Etudes et des Statistiques Sectorielles (DGESS), la production nationale des cultures céréalières (mil, maïs, sorgho, riz et fonio) pour la campagne 2015/2016 était évaluée à 4 189 665 tonnes. La part du sorgho blanc était estimée à 1 073 095 tonnes, soit une hausse de 16,20% par rapport à la campagne passée tandis que celle du sorgho rouge était estimée à 362 545 tonnes, soit une baisse de 15,11% par rapport à l'année dernière (DGESS, 2016).

La production du sorgho est essentiellement autoconsommée et malgré la place qu'il occupe parmi les cultures céréalières du Burkina Faso, sa productivité reste instable d'année en année contribuant ainsi à renforcer l'insécurité alimentaire et nutritionnelle dans le pays (Clerget,

2004). Malgré les progrès réalisés dans l'amélioration variétale notamment la résistance aux insectes, à la verse, au striga, les variétés locales constituent la base des systèmes de production.

Ainsi la bonne maîtrise de la physiologie de ces variétés, la compréhension de certains paramètres clés de leur croissance afin de prédire et d'accroître les rendements sont autant d'éléments qui échappent encore à nos producteurs. En effet, les surfaces végétales sont souvent caractérisées par des paramètres biophysiques comme l'indice de surface foliaire (LAI), la fraction de couverture végétale ou la concentration en chlorophylle. Ces variables contrôlent et sont contrôlées par les processus principaux impliqués dans le fonctionnement de la plante. Parmi ces variables, le LAI, défini comme étant la surface totale de feuillage par m² de sol (Chen et Black, 1992), est une variable clé car il intervient dans de nombreux processus tels que l'interception du rayonnement, la photosynthèse, l'évapotranspiration. Le LAI conditionne donc les échanges des flux de carbone et d'eau avec l'atmosphère. Avoir accès à des estimations précises du LAI sur de nombreux types de couverts végétaux est donc primordial pour une grande partie de la communauté scientifique (Morissette *et al.*, 2006), et constitue donc une problématique majeure. De nombreuses méthodes de mesures directes et indirectes du LAI ont été développées (Ross, 1981 ; Gower *et al.*, 1999 ; Kussner et Mosandl, 2000 ; Jonckere *et al.*, 2004 ; Weiss *et al.*, 2004). Les méthodes directes, basées sur des mesures destructives, sont coûteuses en temps et fastidieuses sur le terrain. Néanmoins, elles demeurent indispensables pour l'évaluation des méthodes indirectes qui sont souvent coûteuses (demandant un investissement dans un appareil de mesure spécifique). Ces méthodes indirectes qui utilisent des capteurs optiques sont non destructives et plus rapides. C'est dans cette optique qu'a été initié notre étude qui a pour thème « ***Caractérisation de l'indice foliaire de dix variétés de sorgho suivant différentes méthodes de mesure en station expérimentale de Farako-Bâ (BURKINA FASO)*** ». Cette étude vise à contribuer à une meilleure caractérisation du LAI pour ensuite pouvoir proposer une méthodologie de mesure facilement utilisable en milieu paysan, qui tienne compte non seulement des contraintes de terrain mais aussi des contraintes d'investissement.

Cette étude s'inscrit dans un programme de recherche, fruit d'une collaboration entre l'INERA, le CIRAD et l'ICRISAT. L'objectif global de ce programme est de déterminer, parmi les dix variétés de sorgho, celles qui s'adaptent le mieux à différentes zones agro-écologiques de l'Afrique de l'Ouest, et qui répondent aux attentes des différentes populations.

Cela n'est possible que par la recherche des traits communs entre les variétés tels que l'indice de surface foliaire (LAI).

Les objectifs suivants seront spécifiquement déroulés tout au long de cette étude :

- Déterminer la méthode qui a la meilleure estimation du LAI pour la plupart des génotypes et aussi pour chacun des génotypes ;
- Déterminer les différences fondamentales entre quatre méthodes de mesure de LAI ;
- Mettre au point et proposer une méthode simple de mesure de LAI susceptible d'être utilisée au champ.

Afin d'atteindre ces objectifs, un certain nombre d'hypothèses ont été émises stipulant que :

- Parmi les méthodes étudiées il y en a une qui est fiable et utilisable en milieu paysan;
- Les variétés utilisées n'auraient pas la même capacité de capter le rayonnement lumineux;
- Il existerait une méthode bien spécifique d'une variété à une autre;
- Il existerait un moyen simple de déterminer le LAI à travers quelques paramètres de croissances

Le présent mémoire comporte trois chapitres. Le premier chapitre, intitulé synthèse bibliographique, traite des généralités sur le sorgho et le LAI. Le deuxième présente la zone d'étude et la méthodologie adoptée. Le troisième montre les résultats obtenus suivi d'une discussion et enfin une conclusion assortie de perspectives marquera la fin du document.

Chapitre 1 : Synthèse Bibliographique

1.1.Généralités sur le sorgho

1.1.1. Origine, diffusion et classification du sorgho

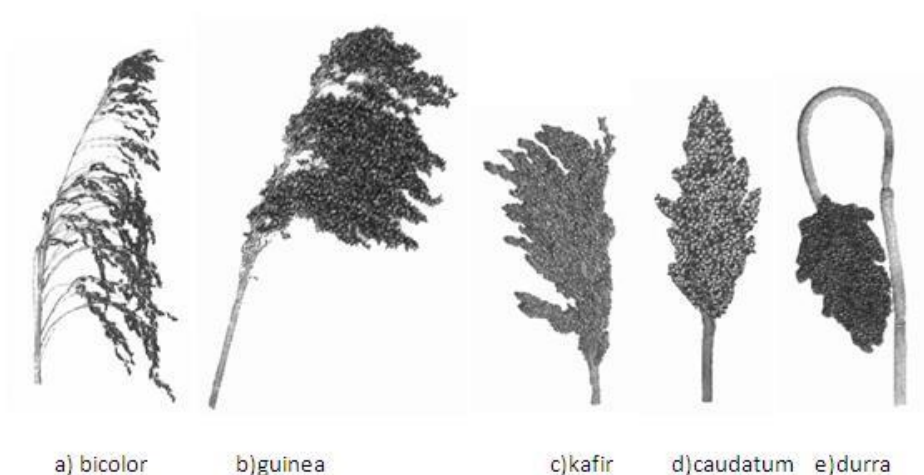
Le sorgho fait partie du groupe des plantes les plus anciennement cultivées dans le monde. Les avis sont partagés quant à son origine et à l'époque de sa domestication. Ainsi les peuplades Mandées qui vivent aux alentours du Niger peuvent avoir domestiqué le sorgho selon Murdock (1959). Doggett (1965) signale des faits archéologiques laissant à penser que la pratique de la domestication des céréales a été introduite en Egypte à partir de l'Ethiopie, pays d'origine vraisemblable du sorgho, environ 3000 ans avant Jésus Christ. De nombreuses données archéologiques et botaniques désignent la zone soudano-sahélienne au sud-est du Sahara comme l'aire de la domestication du sorgho (Chantereau *et al.*, 2013). Les études relatives à l'introggression montrent que les sorghos cultivés sont probablement apparus à la faveur d'une sélection disruptive (Dogget, 1988). Ils dériveraient de la sous espèce *Arundinaceum* et la race *Verticilliflorum*. Lorsque l'homme a commencé à sélectionner, il y a eu un important écoulement de gènes entre types améliorés et types non améliorés (House, 1987). C'est ainsi que le sorgho cultivé serait arrivé dans la péninsule arabique aux environs de 2500 ans avant J.C, en Inde autour de 2000 ans avant J.C et en Chine au troisième millénaire avant J.C (Chantereau *et al.*, 2013). Le sorgho serait arrivé en Europe au premier siècle avant J.C, et en Amérique à l'époque du commerce triangulaire (Chantereau *et al.*, 2013). La stérilité male cytoplasmique du sorgho découverte au XX^{ème} siècle a permis le développement des sorghos hybrides en 1950, d'où l'extension du sorgho dans les pays comme l'Argentine, le Brésil, la France et l'Australie.

Le sorgho (*Sorghum bicolor* L. Moench), est une herbacée annuelle de la famille des poaceae (ex-Graminées), sous famille des *Panicoïdeae*, tribu des *Andropogoneae* et du genre *Sorghum* (Dogget, 1988). C'est une espèce monoïque préférentiellement autogame. La taxonomie moderne ne reprend le nom qu'à partir de Linné qui fut le premier à décrire le sorgho en 1753. Celui-ci désigne le sorgho sous le nom de *Holcus*, et décrit sept (07) espèces, dont trois (03) font toujours partie du genre *Sorghum* : *Holcussaccaratus*, *Holcussorghum* et *Holcusbicolor*. Toutefois, la systématique actuelle s'inspire des bases données par Moench qui fut le premier à définir le genre *Sorghum* et l'espèce *bicolor* (L.) Moench.

Harlan et De Wet (1972) ont proposé une classification simplifiée des sorghos cultivés. Pour ces auteurs, le sorgho cultivé présente une très grande diversité de formes décrites par différentes classifications botaniques. La plus simple étant basée sur la structure de l'épillet sessile (forme du grain) et du type de l'inflorescence (Figure 1). Cinq (05) races principales sont distinguées :

- La race bicolor, répartie dans l'ensemble des zones de culture du sorgho en Afrique et en Asie.
- La race caudatum bien représentée en Afrique Centrale (Soudan, Tchad et Nigéria) et en Afrique de l'Est (Ouganda)
- La race durra, majoritaire en Inde et au Moyen-Orient et très présente en Afrique de l'Est. Elle est associée au monde musulman.
- La race guinea est typique de l'Afrique de l'Ouest mais également présente en Afrique de l'Est et du Sud
- La race kafir est essentiellement présente en Afrique du Sud et de l'Est (au sud de la Tanzanie).

Des races intermédiaires sont des hybrides biraciaux aux caractères intermédiaires de ceux des races principales, pris deux à deux à savoir *Guinea-Caudatum* ; *Guinea-Durra* ; *Guinea-Bicolor* ; *Guinea-Kafir* ; *Caudatum-Bicolor* ; *Caudatum-Durra* ; *Kafir-Caudatum* ; *Durra-Kafir* ; *Durra-Bicolor* ; *Kafir-Bicolor* (Chantereau, 1994).



Source : CLERGET, 2004

Figure 1 : Classification des sorghos selon la forme des panicules

1.1.2 Morphologie du sorgho

La morphologie générale du sorgho est donnée par la figure 2. Comme la plupart des végétaux supérieurs, le sorgho dispose d'organes lui permettant d'absorber l'eau et les sels minéraux, d'assurer les fonctions photosynthétiques pour une croissance et un développement satisfaisant (Sene, 1995).

✓ Racine

Le système racinaire du sorgho est très développé et est muni de nombreux poils radiculaires (presque 2 fois plus que le maïs) (Sene, 1995). A la germination, apparaît une racine séminale qui s'enfonce dans le sol et produit un grand nombre de ramifications secondaires. Par la suite, naissent les racines nodales en remplacement des racines séminales qui finissent par disparaître. Suivant les variétés et les conditions physiques du sol, le système racinaire du sorgho peut atteindre 110 à 130 cm de profondeur et la vitesse de croissance peut aller de 1,4 à 2 cm/jour une semaine après le semis (Sene, 1995).

✓ Tige et feuille

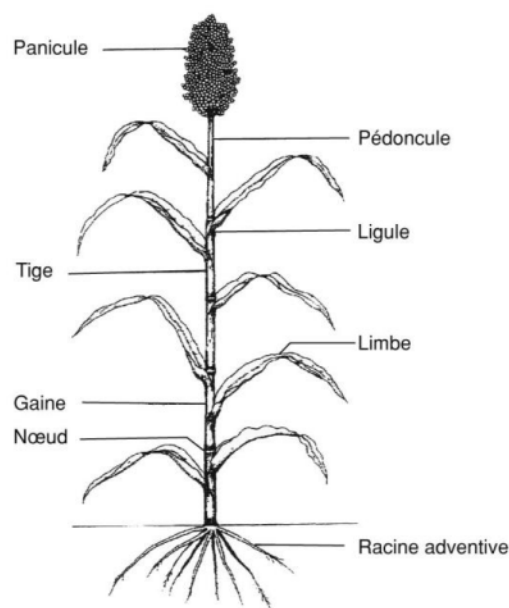
La tige est constituée de séries de nœuds alternant avec des entre-nœuds. La tige est glabre et robuste, mesurant de 0,5 à 5 cm de diamètre près de la base, s'amenuisant vers l'extrémité terminale et ayant une longueur de 0,5 à 4 m. Elle est solide avec un cortex ou une écorce dure et une moelle plus molle. 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). Le sorgho peut présenter à la base de la tige principale des tilles additionnelles dites talles basales. L'importance du tallage varie suivant les races et les variétés. Dans les conditions d'une bonne alimentation hydrique, le nombre de talles peut aller jusqu'à 6. Ainsi certains cultivars tallent beaucoup, alors que d'autres sont pratiquement monocauls. De même les variétés non sénescentes ont généralement plus de talles que les variétés sénescentes.

Les feuilles naissent le long de la tige en alternant sur deux lignes et se composent d'une gaine, d'un limbe et d'une courte ligule membraneuse (1 à 3 mm) à la jonction du limbe avec la gaine. La nervure médiane est saillante, verdâtre ou blanchâtre, aplatie ou légèrement concave sur la face supérieure et convexe sur la face inférieure. Suivant le cycle des variétés, le nombre de feuilles portées par la tige varie de quelques unités à plus de trente. Leur

longueur varie de 30 à 135 cm et leur largeur de 1,5 à 13 cm au niveau le plus large (Memento, 2002). Les feuilles sont insérées au niveau des nœuds de la tige à raison d'une par entre-nœud. Selon Chantereau et Nicou (1991), certaines variétés de sorgho ont des poils de taille microscopique sur la face inférieure des feuilles. Ce sont des trichomes. Leur présence est intéressante car elle est associée à la résistance des jeunes plantes, à la mouche du pied : *Atherigona soccata*.

✓ Grain

Le grain de sorgho est un caryopse composé de trois parties principales : l'enveloppe qui constitue le péricarpe, le tissu de réserve ou albumen et, l'embryon (Memento, 2002). Entre le péricarpe et l'endosperme peut se trouver une couche hautement pigmentée, de couleur rouge foncée ou brun foncé appelé testa (House, 1987). L'épaisseur des grains est fortement influencée par les conditions environnementales (stress hydrique ou trophique égal à diminution de la taille, température nocturne fraîche égal à augmentation de la taille) et variétales (Chantereau *et al.*, 2013).



Source : Trouche (2009)

Figure 2 : Morphologie d'une plante de sorgho

1.1.3. Physiologie du sorgho

La croissance et le développement du sorgho passent par trois phases successives :

✓ **Phase végétative : de la germination à l'initiation de la panicule**

Les grains de sorgho cultivé n'ont habituellement pas de dormance. Lorsqu'un grain est enfoui dans un sol humide, il s'imbibe d'eau, se gonfle et commence à germer. C'est le début de la phase végétative. La germination se produit rapidement et dans les sols chauds tandis qu'elle peut aller jusqu'à dix jours dans des sols plus froids -13 -20° C. Les nœuds basaux de la tige principale donnent naissance à des tiges secondaires ou talles marquée par l'apparition de la 4^{ème} feuille et qui apparaissent par paire (I.R.A.M, 2014).

✓ **Phase reproductive : de l'initiation paniculaire à la floraison**

Les ébauches florales initiales apparaissent 30 à 40 jours après la germination (mais la formation de la fleur peut demander de 19 à 70 jours ou plus). Les variétés non photospériques atteignent leur montaison après la mise en place de la vingtième feuille, par contre celles qui sont photopériodiques la montaison a lieu pendant la phase végétative suite à un ralentissement du phyllochrone (Clerget, 2004).

✓ **Phase de remplissage et de maturation : de la floraison à la maturité physiologique**

La maturation débute avec la fécondation des fleurs. La durée de remplissage complet varie de 30 à 35 jours environ, en passant du stade laiteux au stade pâteux puis au stade dur (David, 1987).

1.1.4. Besoins environnementaux

L'optimum de température pour la croissance du sorgho est d'environ 30°C. La plupart des variétés locales, notamment africaines, sont photopériodiques de jours courts. Quelle que soit la date de semis, celles-ci y fleuriront à une date relativement fixe qui permet un calage de la maturation des grains sur le début de la saison sèche.

Les besoins en eau du sorgho sont inférieurs à ceux du maïs. La sensibilité du sorgho à la sécheresse est maximale de la fin de la montaison au début de la floraison (Mémento de l'agronome, version 2002). En Afrique, le sorgho est cultivé seul ou en association avec

d'autres plantes comme le niébé dans des types de sols variés, généralement plus argileux que ceux réservés aux mils avec cependant une teneur minimale de 6% en argile et un pH voisin de 6-7. Enfin, le sorgho est plus tolérant aux sols acides et salés que le maïs (Granes et Caron, 1993).

1.1.5. Quelques contraintes liées à la production du sorgho

Les contraintes sont essentiellement liées aux insectes ravageurs, aux maladies, aux mauvaises herbes (surtout le *Striga*) et aux oiseaux.

Les insectes posent un sérieux problème pour la culture du sorgho. La mouche des pousses du sorgho (*Atherigona soccata*) peut causer des dégâts sévères à la culture à certaines époques de l'année. Les punaises des panicules peuvent causer des dégâts importants lorsque les populations sont nombreuses sur les panicules. Une petite mouche, la cécidomyie (*Stenodiplosis sorghicola*) est signalée comme le ravageur le plus important de la culture du sorgho dans le monde. Il constitue l'ennemi majeur de cette culture surtout dans les zones sud, centre-ouest et Est du Burkina Faso avec des pertes en rendement pouvant atteindre 33 %. Au Burkina Faso, la solution aux problèmes posés par cet insecte ravageur a d'abord reposé sur l'utilisation des variétés résistantes mises au point par l'ICRISAT. Malheureusement, celles-ci se sont avérées inadaptées aux conditions du pays, en raison de leur sensibilité à d'autres contraintes biotiques (maladies foliaires, moisissures des grains et punaises des panicules).

Les maladies les plus importantes du sorgho sont les moisissures des grains, le mildiou (*Peronosclerospora sorghi*), la pourriture charbonneuse (*Macrophornina phaseolina*) et l'anthracnose (*Colletotrichum graminicola*).

Appelé *ségé* en jula, *zeeme* ou *waongo* en moré, le striga (*Striga hermonthica*) est la mauvaise herbe qui parasite le sorgho surtout au Burkina Faso. Il est même un facteur limitant à la production du sorgho dans certaines régions du pays. Le striga lève pendant la montaison du sorgho et fleurit pendant sa maturation. Le quelea à bec rouge (*Quelea quelea*) est considéré comme l'un des principaux et dangereux prédateurs aviaires du monde (Bruggers et Jaeger, 1982). Cet oiseau se nourrit normalement des grains de graminées sauvages, mais peut provoquer d'importants dégâts dans les cultures de sorgho en cours de maturation.

1.2. Généralité sur le LAI (Leaf Area Index) ou Indice foliaire

1.2.1. Définition

L'indice foliaire (LAI, Leaf Area Index) est une grandeur sans dimension, qui exprime la surface foliaire d'une plante, d'un peuplement végétal, d'un écosystème ou d'un biome par unité de surface de sol. Le LAI a tout d'abord été défini comme la surface totale d'une face des feuilles par unité de surface du sol (Watson, 1947). Cette définition ne convient plus dès lors que les feuilles ne sont pas plates comme les aiguilles de conifères par exemple. De nombreuses études définissent alors le LAI comme la projection de surface foliaire au sol (Bolstad et Gower, 1990 ; Smith, 1991). Ces deux définitions peuvent amener à des résultats différents selon la forme des feuilles (sphères, cylindres). Si l'on considère les autres éléments du couvert (tiges, troncs, fleurs etc.), on parlera plutôt de Plant Area Index (PAI).

Les valeurs de LAI sont très variables d'un couvert à l'autre, de 0 pour un sol nu, pouvant dépasser 15 pour des forêts tropicales très fermées ou des forêts de conifères (Schulze, 1982) Elle varie de 2 à 4 pour des cultures annuelles (Beadle, 1993). Selon l'échelle à laquelle on s'intéresse, l'unité de surface de sol peut être le m², le km², l'hectare.

1.2.2. Interception de la lumière par un couvert

Le rayonnement solaire global représente la somme des rayonnements direct et diffus dans la gamme de longueur d'onde 300-3000 nm. Toutes les radiations du spectre solaire ne peuvent être utilisées par les organes chlorophylliens. La conversion de l'énergie des photons incidents en énergie chimique par l'appareil photosynthétique d'une feuille n'est réalisée que pour les rayonnements ayant une longueur d'onde comprise entre 350 et 750 nm environ, et avec une efficacité très variable dans cet intervalle. Ainsi de nombreux auteurs (Gabrielsen, 1940 ; Gaastra, 1959 ; Nichiporovich, 1960 ; Mccree, 1966) ont posé le problème de la définition du rayonnement utile pour la photosynthèse.

Depuis les travaux de Mccree (1972 ; 1973), la gamme 400-700 nm est communément admise pour définir le rayonnement utile à la photosynthèse, même si les spectres d'action peuvent présenter quelques divergences entre espèces, notamment entre plantes ligneuses et herbacées (Clark et Lister, 1975 ; Inada, 1978). Le sigle PAR (Photosynthetically Active

Radiation) est actuellement le plus répandu pour désigner le rayonnement utile à la photosynthèse (RPA : Rayonnement Photo synthétiquement Actif ou RUP : Rayonnement Utile à la Photosynthèse). Les travaux de McCree (1972 ; 1973) ont montré aussi une meilleure proportionnalité entre l'intensité de la photosynthèse et le PAR lorsque celui-ci est caractérisé en nombre de photons plutôt que par son énergie.

Le couvert végétal n'absorbe pas tout le rayonnement solaire qu'il reçoit : une partie est réfléchi vers l'atmosphère et une autre est transmise au sol qui à son tour en renvoie une part vers la végétation.

Tous les rayonnements sont donc mesurés ou estimés (dans le cadre de modèle d'interception par exemple) sur un plan horizontal. Selon (Varlet-Grancher et Bonhomme, 1974 ; Hodge et Kanemasu, 1977), le rayonnement absorbé par la végétation (R_{g_a}) est déterminé par le bilan entre les rayonnements reçus : rayonnement incident (R_{g_o}) et rayonnement réfléchi par le sol ($R_{g'}$), et les rayonnements « perdus » : rayonnement réfléchi par l'ensemble sol-culture (R_{g_r}) et rayonnement transmis au sol (R_{g_t}).

Depuis longtemps, différents auteurs ont essayé d'analyser la croissance en matière sèche d'un couvert végétal par rapport au rayonnement solaire (Kamel, 1958 ; Shibles et Weber, 1965 ; Monteith, 1972). L'utilisation de cette méthode s'est généralisée et de nombreux auteurs (Bonhomme *et al.*, 1982 ; Gosse *et al.*, 1984 ; Howell et Musick, 1984 ; Martin, 1986) présentent des relations entre la production de matière sèche et la quantité de rayonnement solaire absorbée ou interceptée par une culture.

La détermination du LAI d'un couvert permet donc de connaître la vitesse de fermeture dudit couvert, et la croissance d'une culture peut être ainsi facilement quantifiée.

1.2.3. Rôle fonctionnel du LAI

La relation entre le LAI et la productivité de matière sèche est évidente. En effet, l'indice foliaire représente la surface par laquelle les flux de carbone (échanges photosynthétiques) et d'eau (transpiration) transitent (Bréda, 1996). Plusieurs travaux ont montré la corrélation entre la surface foliaire et le rendement des cultures (Ledent *et al.*, 1995 ; Sridhara et Prasad 2002 ; Beed *et al.*, 2007). En effet, la surface foliaire verte est celle qui fixe la lumière et le CO₂ atmosphérique, utile à la photosynthèse.

La dynamique du développement foliaire se fonde sur des relations mathématiques qui prennent en compte les caractéristiques génotypiques, l'importance de chaque feuille, le nombre et la température, pour différents scénarios environnementaux (Lafarge *et al.*, 2002).

La production de biomasse chez les cultures est fonction de la quantité de rayonnement interceptée par le couvert, en relation à l'importance et à la répartition de la surface foliaire (position et orientation des feuilles), et de l'efficacité de conversion de ce rayonnement en matière sèche (Norman et Arkebauer, 1991 ; Van Oosterom et *al.*, 2002 ; Lindquist et *al.*, 2005). On modélise cette interception, en se référant par analogie à la loi de Beer LAMBERT (Flenet et *al.*, 1996 ; Denoroy et *al.*, 2002). Cette loi fait appel à un coefficient empirique dit coefficient d'extinction de la lumière (K_{df}) qui détermine la fraction du rayonnement incident intercepté par le couvert, pour un indice de surface foliaire donné (Van Oosterom et *al.*, 2002 ; Ayaz et *al.*, 2004 ; Anda et Loke, 2005).

1.2.4. Quelques paramètres influençant le LAI

1.2.4.1. Densité foliaire et orientation des feuilles

La densité foliaire correspond à l'indice foliaire par unité de volume végétal considéré. Sinoquet et Bonhomme (1989), ont observé que pour un couvert de maïs, suivant le stade considéré, le maximum de densité foliaire se situe à une hauteur de 40 à 70% de la hauteur totale des pieds. Les variations de LAI dans le plan horizontal peuvent aussi être importantes. Pour (Ross, 1981 ; Myneni *et al.*, 1986 ; Sinoquet *et al.* 1991), ces variations sont principalement dues à l'agencement des feuilles autour des tiges qui entraîne une densité foliaire plus importante au niveau des rangs que des inters rangs.

L'orientation des feuilles détermine en grande partie la surface réellement réceptrice du rayonnement, c'est donc un paramètre de structure primordial. Les feuilles d'un couvert peuvent avoir des inclinaisons variables selon l'espèce et les contraintes du milieu (lumière disponible, stress hydrique.). Six distributions standard couramment nommées Leaf Angle Distribution (LAD) (de Witt, 1965) ont été définies :

- Planophile : les feuilles horizontales y sont les plus fréquentes (couvert de soja par exemple),
- Erectophile : les feuilles dressées sont les plus fréquentes (céréales),
- Plagiophile : les feuilles inclinées à 45° sont les plus fréquentes (vigne),
- Extremophile : les feuilles ont deux orientations possibles : horizontale et verticale,
- Uniforme : la probabilité d'inclinaison des feuilles est la même, quel que soit l'angle d'inclinaison considéré,

- Sphérique : la fréquence d'occurrence des angles foliaires est celle qu'auraient des feuilles placées à la surface d'une sphère.

1.2.4.2. Teneur en eau et élément minéraux du sol

Une étude de Landsberg (1986) a montré que les variations interannuelles de longueur d'aiguilles de *Pinus radiata* sont corrélées à la pluviométrie de la saison de croissance. Même sur les sites pauvres et non fertilisés qu'il étudiait, l'irrigation permettait dans tous les cas d'augmenter l'indice foliaire. Ce qui pourrait aussi être le cas pour le sorgho.

La teneur en éléments minéraux du sol est aussi susceptible de limiter le développement de l'indice foliaire sur les stations pauvres. Ainsi, une fertilisation azotée a permis d'augmenter l'indice foliaire de peuplements de *Pinus taeda* de plus de 60% par rapport aux peuplements non traités sur des sites très déficients, alors que l'apport de phosphore était sans effet sur l'indice foliaire (Vose et Allen, 1988). De tels résultats pourraient être vérifiés chez les cultures annuelles.

1.2.4.3. La variété culturale

L'indice foliaire est de toute évidence un paramètre très influencé par la variété culturale. Wilhelm (1995) a défini le phyllochrone comme le temps écoulé entre l'apparition visuelle des pointes de feuilles de deux phytomères successifs et le plastochrone comme l'intervalle de temps entre la formation par l'apex de deux phytomères successifs.

La détermination précise du phyllochrone est en effet une variable d'entrée importante pour la simulation de l'expansion de la surface foliaire mise en place par les plantes. En ce qui concerne le sorgho, des phyllochrones constants pendant toute la phase de développement ont été souvent rapportés (Alagarswamy *et al.*, 1986 ; Muchow *et Carberry*, 1990 ; Craufurd *et al.*, 1993). Vaksman *et al.*, (1998) ont trouvé des taux constants au cours du cycle végétatif du phyllochrone et du plastochrone lors d'une étude sur un écotype de sorgho malien.

Une expérience conduite à Bambey, au Sénégal sur deux variétés de sorgho a montré que les valeurs moyennes des phyllochrones initiaux (avant l'inflexion) étaient identiques pour les variétés ; ce qui se traduit nécessairement par des valeurs de LAI identique pour ces variétés. En revanche les valeurs moyennes des phyllochrones secondaires (après inflexion) ont été fonction de la variété d'où une variation considérable des LAI. De nombreux modèles ont été

développés pour la simulation de la croissance du sorgho que Medeiros (1997) a inventorié dans une revue bibliographique. Ces modèles ont été calibrés sur des variétés non ou peu photopériodiques et sont incapables de simuler le comportement des sorghos très photopériodiques d'Afrique de l'Ouest. Toujours dans l'expérience de Bambey, au Sénégal (Clerget, 1999) a montré que jusqu'à 8 talles ont été produites, qui ont en grande partie disparu au cours de la montaison pour finir à une moyenne d'une demi-talle par plante. Associée au grand nombre de feuilles, ce tallage a conduit à un LAI supérieur à 8 à son maximum.

En plus l'architecture d'un certain nombre de variétés de sorgho n'est pas sans conséquence sur l'estimation de leur LAI. En effet la forme de la tige et des feuilles (fine ou grosse) peut être un facteur important pour la pénétration de la lumière dans le couvert ; ce qui conduira éventuellement à un faible LAI. La taille est aussi une caractéristique importante pour estimer le LAI ; en général les variétés de grande taille ont une structure plus fine laissant passer plus de lumière dans le couvert et donc un LAI plus faible. Quant aux variétés de taille réduite généralement " trapu ", la structure (feuillage et tige) est beaucoup plus large ce qui permet une bonne interception de la lumière et donc un LAI plus élevé.

1.2.5 Mesures de LAI

Les méthodes de détermination de l'indice foliaire peuvent être classées en deux catégories : les méthodes utilisant une mesure directe de surface foliaire et les méthodes optiques ou indirectes.

1.2.5.1. Les méthodes directes

1.2.5.1.1. Collecte des feuilles

❖ Méthode non destructive : le recueil de litière

Elle consiste à recueillir la litière pendant la chute des feuilles avec des « pièges à litière » de surface donnée, placés sous le peuplement à mesurer. Son principal inconvénient est de ne fournir qu'une estimation de l'indice foliaire maximum atteint par la végétation, elle ne permet donc qu'un suivi temporel à l'échelle interannuelle (Bréda, 1994).

❖ Méthode destructive : collecte sur pieds

Les feuilles sont directement prélevées sur le couvert à mesurer. Si la densité du peuplement est connue (forêt ou culture par exemple), toutes les feuilles d'un (ou plusieurs)

individu(s) peuvent être recueillies afin d'obtenir une surface moyenne par individu et d'en déduire le LAI du peuplement (m^2 feuilles/ m^2 de sol).

Cette méthode permet non seulement un suivi temporel intra-annuel du LAI si des mesures sont répétées au cours d'une même saison de végétation, mais d'avoir un LAI réel. Elle a été choisie comme méthode de référence pour notre étude.

1.2.5.1.2. Détermination de la surface foliaire

Chez les graminées, la feuille est constituée d'un limbe et d'une gaine qui entoure la tige et recouvre parfois partiellement celle de la feuille suivante. La ligule marque la séparation entre le limbe et la gaine. Le limbe est la partie qui assure l'essentiel de l'interception du rayonnement et de la photosynthèse. Les feuilles ont fini leur croissance lorsque leur ligule est apparue. La mesure directe non destructive de la surface des feuilles ligulées est possible à l'aide de planimètre de terrain, mais leur emploi cause souvent des dommages à la culture. Celle des feuilles en croissance n'est pas possible, en raison de leur disposition en cornet et de leur emboîtement. Chez le sorgho la forme des feuilles est lancéolée et la plus grande partie de la surface foliaire est glabre avec parfois un dépôt cireux assez prononcé qui jouerait un rôle protecteur contre l'excès de rayonnement solaire. Estimer l'évolution de la surface des feuilles à partir de comptage de feuilles pendant leur apparition et de mesures à la fin de leur croissance évite de toucher les feuilles pendant leur croissance donc minimise les stress liés à la manipulation des plantes ou des feuilles, tels que les ont mis en évidence Beardsell (1977) sur le maïs : des mesures quotidiennes de feuilles réduisaient significativement les poids de tige et les hauteurs de plante.

Après la collecte des feuilles, la surface foliaire est le plus souvent déterminée par planimétrie ou gravimétrie.

❖ *Planimétrie*

La surface de chaque feuille est déterminée directement après passage au planimètre. Pour ce qui concerne notre étude nous avons utilisé un scanner *Taotronics* (Photo 3) en lieu et place du planimètre afin de déterminer nos surfaces foliaires. Il faut signaler que la méthode du planimètre n'est appliquée que si le volume d'échantillon à planimétrer n'est pas trop important.

❖ *Gravimétrie*

La méthode de gravimétrie consiste à relier la surface foliaire d'une espèce à son poids sec par détermination de la surface spécifique des feuilles (SSF en cm^2/g). Seule une partie de

l'échantillon collecté est passée au planimètre, puis placée dans une étuve (pendant environ 48h à 70°C) et pesée avec une balance de précision.

Cette méthode est très utilisée lorsque le LAI doit être estimé à partir d'un nombre important d'échantillons. Une autre méthode de mesure directe que nous avons utilisée est celle du calcul de LAI à travers la détermination de la surface foliaire par la mesure des dimensions de la feuille. La forme des feuilles a été décrite par des expressions analytiques reliant longueur et largeur (arcs de parabole : Bonhomme et Varlet-Grancher, 1978 ; Prévot *et al.*, 1991 ; arcs de sinusoides : Edmeades et Daynard, 1979 ; Sanderson *et al.*, 1981), qui, par intégration, permettent de calculer leur surface. Au contraire, l'estimation de la surface des feuilles en croissance est rarement abordée séparément (Dwyer et Stewart, 1986 ; Muchow et Carberry, 1989) car elle nécessite des mesures supplémentaires.

Ces méthodes directes d'estimation du LAI sont coûteuses en temps et en main d'œuvre car, pour être précises, elles nécessitent la collecte d'un grand nombre d'échantillons. Elles ne sont donc pas très appropriées si on veut effectuer un échantillonnage spatial très étendu ou un suivi des variations temporelles de LAI. Elles sont néanmoins indispensables pour la validation et la calibration des méthodes de mesure indirectes.

1.2.4.2. Les méthodes indirectes

Chen et Black (1992) suggèrent d'utiliser le terme de « LAI effectif » pour décrire le LAI estimé à partir de mesures optiques de la fraction de trou ou transmittance.

Il existe à l'heure actuelle différentes techniques de mesure de la fraction de trou ; une revue détaillée de l'ensemble des techniques est disponible dans (Weiss *et al.*, 2004).

❖ *LAI-2000 Canopy Analyzer*

Le LAI-2000 (Li-Cor, Nebraska, USA ; Welles, 1990) permet de calculer la fraction de trou à partir de mesures de rayonnement diffus au-dessus et en-dessous du couvert simultanément dans cinq angles de visée centrés sur 7, 23, 38, 53 et 68°. Entre une mesure au-dessus et une mesure en-dessous du couvert, la quantité de rayonnement incident doit varier le moins possible pendant les mesures. Les conditions optimales de mesure se rencontrent au lever et coucher du soleil lorsque le ciel est complètement dégagé et que le rayonnement est diffus. Une des principales difficultés de cette méthode est d'effectuer des mesures au-dessus des couverts. L'estimation du LAI à partir de ces mesures de la fraction de trou avec le LAI-

2000 est basée sur la loi de Poisson. Cette méthode a attiré notre attention et a, de ce fait été retenue parmi celles que nous avons choisies dans le cadre de notre étude.

❖ *Demon*

Le DEMON (Canberra, Australie) est un instrument de mesure de la transmission directe du rayonnement. L'acquisition des données repose sur la mesure du rayonnement direct en dessous et au-dessus de la végétation pour différentes positions du soleil. Pour chaque position, la fraction de trou est donnée par le rapport entre le rayonnement transmis et le rayonnement incident direct. Pour obtenir une valeur de LAI effectif moyenne, il est recommandé d'effectuer la mesure sur le même transect à différentes heures de la journée, c'est à dire pour différents angles solaires et sous un ciel complètement dégagé (rayons directs du soleil).

❖ *La photographie hémisphérique*

Une photographie hémisphérique est une photographie réalisée avec un objectif « fish-eye » dont le champ de vue est de 180° en zénith et de 360° en azimut. La fraction de trou est calculée à partir d'une image binaire où chaque pixel est classé en trou ou végétation. Les photos peuvent être réalisées par-dessus ou par-dessous le couvert, ce qui permet de caractériser aussi les couverts peu développés comme les cultures annuelles. La photographie hémisphérique a été tout d'abord utilisée en écologie pour caractériser le régime radiatif en-dessous des canopées (Anderson, 1964, 1971) ; les travaux concernant l'étude de la géométrie des couverts végétaux sont postérieurs (Bonhomme, 1976 ; Leong *et al.*, 1982).

❖ *Sunscan*

Le PAR est la portion du spectre lumineux, comprise entre 400 et 700 nm, qui est utilisée par les plantes pour la photosynthèse. Il existe une relation directe entre les radiations solaires reçues par une plante et la quantité de biomasse créée par celle-ci.

Le PAR est mesuré à l'aide d'un ceptomètre. Le modèle utilisé dans notre expérience est le modèle SunScan. Ce modèle permet la détermination du bilan radiatif d'un couvert végétal : mesure des rayonnements incidents et transmis dans la fraction PAR, calcul de l'Indice Foliaire (LAI) et du coefficient de transmission. En option, un capteur d'analyse des fractions des rayonnements directs et diffus est proposé. De plus, des capteurs externes type "quantum" permettent d'établir les références de niveau de rayonnement en dehors de la canopée. Cette méthodologie nouvelle a aussi été retenue dans le cadre de notre étude.

A la fin de cette partie, il ressort que le sorgho, du fait de sa résistance à la sécheresse même dans les conditions les plus rudes est une plante stratégique pour le développement économique et durable de la plupart des pays du sud et plus particulièrement celui du Burkina Faso. Cependant bon nombre de facteurs affectent sérieusement sa production d'où la nécessité de la maîtrise absolue de certains de ses paramètres structuraux dont le LAI.

En effet plusieurs méthodologies existent pour la détermination ou l'estimation de ce LAI, parmi lesquelles des méthodes directes et des méthodes indirectes. Toutes ces méthodes sont applicables plus ou moins à différents types de végétation mais la question fondamentale est de savoir quelle est la ou les méthodes spécifiques à telle ou telle espèce ou variété.

Chapitre 2 : Matériel et méthodes

2.1. Présentation de la zone d'étude

2.1.1. Site d'expérimentation

Notre étude a été conduite à la station expérimentale de recherche environnementale et agricole de Farako-Bâ à une dizaine de kilomètre de Bobo-Dioulasso sur la route nationale n°7, axe Bobo-Banfora (Figure 3). Cette station couvre une superficie de 475 ha dont 375 ha aménagés en parcelles expérimentales. Les coordonnées géographiques de la station sont 04°20' de Longitude Ouest, et 11°60' de Latitude Nord avec une altitude de 405 m.

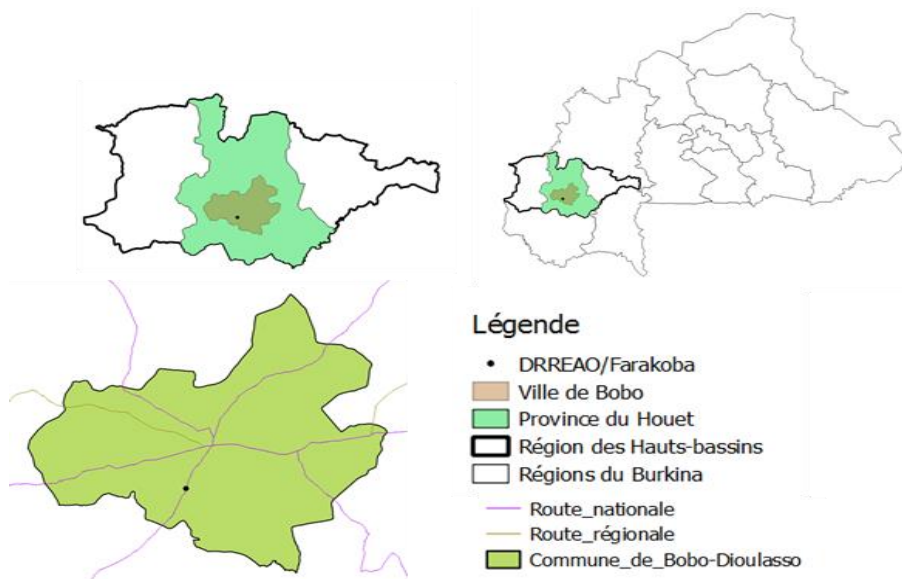
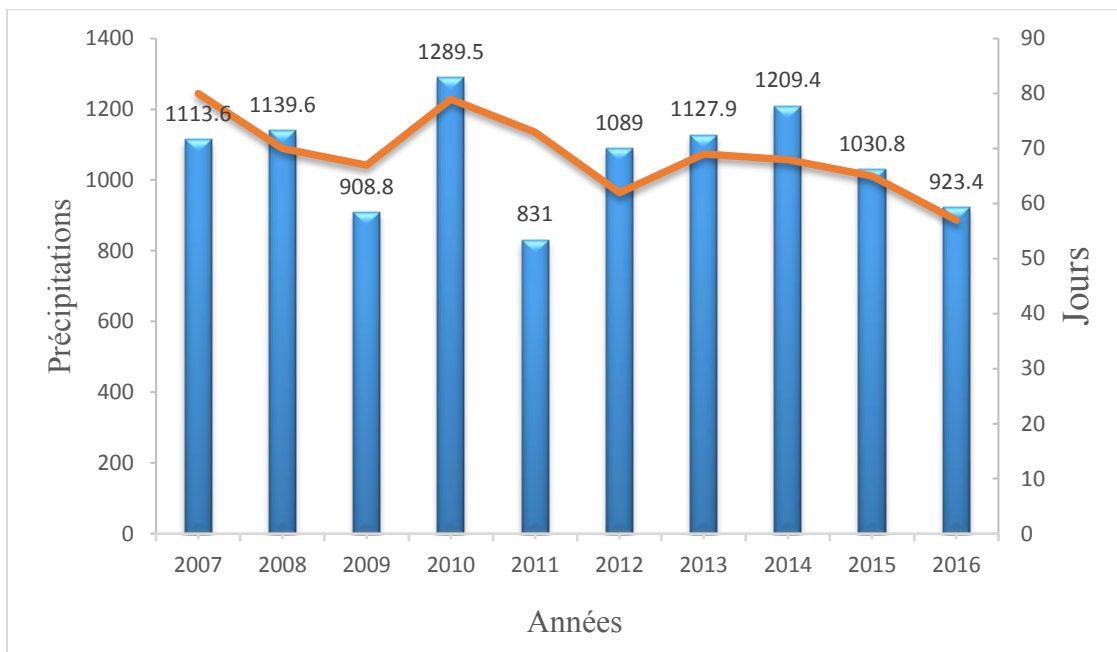


Figure 3 : Carte de Farako-bâ

2.1.2. Climat

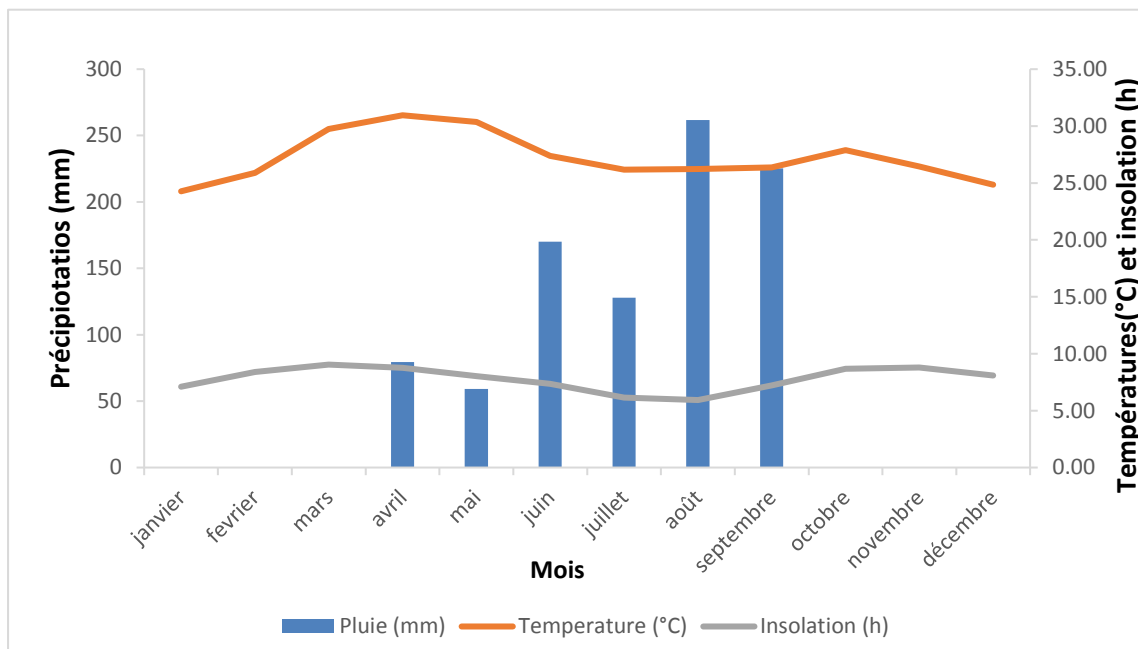
La station de Farako-Bâ est située dans la zone climatique de type sud-soudanien entre les isohyètes 1000 et 1200 mm (Guinko, 1984) avec un régime pluviométrique caractérisé par une variation spatio-temporelle. Ce climat comprend deux saisons : une saison sèche de novembre à mai et une saison pluvieuse de mai à octobre. La pluviométrie annuelle varie généralement entre 800 et 1000 mm répartis sur 75 à 85 jours et reste instable d'une année à l'autre et au cours d'une même année. Au cours de l'année 2016 la saison pluvieuse s'est étalée d'Avril à Octobre avec une quantité d'eau enregistrée de 923,4 mm étalée sur 57 jours et des températures moyennes variant de 24,27 à 30,95°C (figure 5) avec une insolation moyenne de 7,78 h

Comparer aux dix dernières années, l'année 2016 a enregistré la troisième plus faible précipitation après 2011 et 2009 qui ont respectivement 831 mm et 908,8 mm (figure 4).



Source : Météo station de Farako-Bâ

Figure 4 : Précipitation et nombre de jours de pluie des dix dernières années sur la station de Farako-Bâ



Source : Météo station de Farako-Bâ

Figure 5 : Pluviométrie insolation et températures moyenne de 2016

Au regard de la figure 4, le mois de mars a enregistré le maximum de l'insolation (9,05) viennent ensuite les mois d'avril et de novembre qui ont respectivement enregistrés 8,77 et 8,79. Le minimum de l'insolation a été enregistré au mois d'août avec une valeur de 5,93.

Nos observations ont eu lieu durant les mois d'août à octobre avec des insolutions croissante et respective de 5,93 ; 7,21 et 8,67. Ce qui pourrait influencer les LAI étant donné que la lumière interceptée par un couvert végétal est liée d'une part à la structure dudit couvert et d'autre part à la durée de l'insolation.

2.1.3. Végétation

Selon la description de la végétation de l'ouest du Burkina Faso par Guinko (1984) cité par Adam-Yeboua (2000), Farako-Bâ a une végétation naturelle de type savane arbustive et arborée. Les forêts claires sont rencontrées aux abords des bas-fonds.

La strate ligneuse se compose essentiellement de *Parkia biglobosa*, *Detarium microcarpum*, *Sclerocarya birrea*, *Vittelaria paradoxa* et *Tamarindus indica*. Le tapis herbacé se compose essentiellement d'*Andropogon spp*, *Pennisetum pedicelatum* et *Eragrostis tremula* Guinko (1984).

2.1.4. Sols

Les sols de Farako-Bâ sont des sols rouges faiblement ferrallitiques. Ils ont une faible teneur en argiles et en matière organique, ce qui fait que leur capacité d'échange cationique est faible. Ce sont des sols très sableux, légèrement acides et pauvres en azote et en phosphore. Ils ont un complexe absorbant désaturé et sont très sensibles au lessivage et à l'érosion (Bado, 2002).

2.2. Matériel d'étude

2.2.1. Matériel végétal

Pour notre essai le matériel végétal a été constitué par dix (10) génotypes de sorgho, (cinq de la race *guinea* et cinq de la race *caudatum*) dont trois de race hybride représenté dans le tableau II.

Tableau II : Matériel végétal et caractéristique des variétés utilisées pour l'essai

Génotypes	Race/type	Région cible	Usage	Cycle (jours)	Qualité tige	Couleur grain	Taille plante
Fadda	hybride	Bobo/Bamako	Grain	110	Haut	Brun	Intermédiaire
Nieleni	Hybride	Nioro/bambey	Grain	100	Haut	Brun	Intermédiaire
IS15401	Guinea	Bobo	Biomasse	120	Pauvre	Bon	Grand
Pablo	Guinea	Sinthiou	Biomasse	110	Pauvre	Bon	Grand
CSM63E	Guinea	Bambey	Biomasse	90	Pauvre	Bon	Grand
SK5912	Caudatum	Bobo	Grain/Biomasse	110	Haut	Moisie	Grand
Grinkan	Caudatum	Bamako	Grain/Biomasse	110	Haut	Moisie	Court
Soumba	Caudatum	Sinthiou	Grain/Biomasse	100	Haut	Moisie	Intermédiaire
621-B	Caudatum	Bambey	Grain/Biomasse	90	Haut	Moisie	Court
WoroPoni	Local	Dédougou	Grain	110	Pauvre	Bon	Grand

Source: ICRISAT, CGIAR Research Program on Dryland Cereals and Dryland Systems

Le choix de ces variétés s'explique par leurs aspects architecturaux (hauteur, diamètre de tige notamment), structuraux (lignine, cellulose), la qualité de leur production grain ou biomasse et leur origine diverse.

Il est à signaler qu'aucun traitement chimique n'a été appliqué sur les cultures une fois mise en place.

2.2.2. Matériel de mesures

2.2.2.1. LAI-2000

Le LAI-2000 (Li-Cor, Nebraska, USA ; Welles, 1990) est un instrument permettant d'avoir une estimation de LAI. Il est composé d'un capteur optique relié à une petite centrale d'acquisition de données. Le capteur comporte une lentille « *fish-eye* » recevant le rayonnement dans un angle total de 148°, un miroir et un filtre optique transmettant la partie diffuse de celui-ci sur cinq détecteurs en silicone (photo 1).



Photo 1 : Image du LAI-2000

2.2.2.2. Sunscan

Le Sunscan est un appareil qui permet de déterminer le bilan radiatif d'un couvert végétal (photo 2). Cet appareil comprend deux parties : une sonde SS1 de longueur 100 cm dans laquelle sont noyés 64 capteurs photo-diodes linéairement répartis et une poignée de préhension ergonomique. La poignée comporte le bouton de déclenchement de la mesure. L'acquisition des données des capteurs se fait via l'interface série par un PC de poche type Personal Digital Assistant (PDA) recommandé pour sa facilité d'utilisation sur le terrain ou un PC portable. L'ensemble du système Sunscan comprend : une sonde SS1, un PC de poche avec logiciel intégré (Sundata) pour la collecte des données, en option un capteur externe type BF5 avec tripode et un système de liaison radio.



Photo 2 : Image du Sunscan

2.2.2.3. Scanneur

Pour un peu moins de 210 grammes, le scanneur de poche *Taotronics*, très discret de par sa petite taille 24 cm pour 5 cm est un instrument qui fonctionne avec deux piles LR6 (photo 3). Il s'agit d'un Scanner Portable qui en toutes circonstances, lieux ou moments de la journée, permet de numériser des documents, photos, articles de presse ou encore des feuilles d'une plante disposée sur un support A4 selon les cas.



Photo 3 : Image du scanner *taotronics*

2.2.2.4. Le ruban métrique

Nous avons utilisé aussi un ruban métrique pour mesurer la longueur et la largeur des feuilles ligulées (Photo 5 et 6 en annexe). Ce qui a permis par intégration du coefficient de 0,687 (Lafarge *et al.*, 2002), représentant la forme de la feuille de calculer la surface desdites feuilles et d'en estimer le LAI

2.3. Méthode d'étude

2.3.1. Description du dispositif expérimental

Le dispositif mis en place pour cette étude est un bloc complètement randomisé (Figure 5) comprenant dix (10) variétés de sorgho répartis dans des parcelles élémentaires. Pour cette expérimentation le facteur est la méthode. Ainsi chaque méthode est considérée comme un traitement appliqué sur les dix variétés (10 répétitions). En outre au sein de chaque parcelle élémentaire sont implantées des placettes de 0,8 m² comportant cinq plantes dont deux ont été échantillonnées pour effectuer les mesures au cours du cycle de développement (figure 6). Les méthodes à comparer sont les suivantes :

- Méthode de mesure de la longueur et de la largeur de toutes les feuilles ligulées
- Méthode de mesure de la surface réelle à l'aide du scanner
- Méthode de mesure avec le LAI-2000
- Méthode de mesure avec le Sunscan

Chaque parcelle élémentaire a les dimensions de 5 m de long sur 4 m de large à l'intérieur de laquelle se trouvent cinq lignes espacées de 80 cm avec des poquets tous les 20 cm, donc environ 26 poquets par ligne. La surface de chaque parcelle élémentaire est de 20 m² et donc 200 m² pour les dix variétés. Avec une allée de 1 m cela équivaut à 11 m x 20 m = 220 m² pour tout l'essai (figure 5).

Enfin, pour tester si une méthode est spécifique pour une variété donnée, nous avons effectué des mesures au moment de l'apparition de la feuille drapeau, considérant alors chaque plante de la placette comme une répétition (Placette en bleue sur la figure 6). Ce qui équivaut à 5 plantes par traitement soit un total de 50 plantes pour tout l'essai.

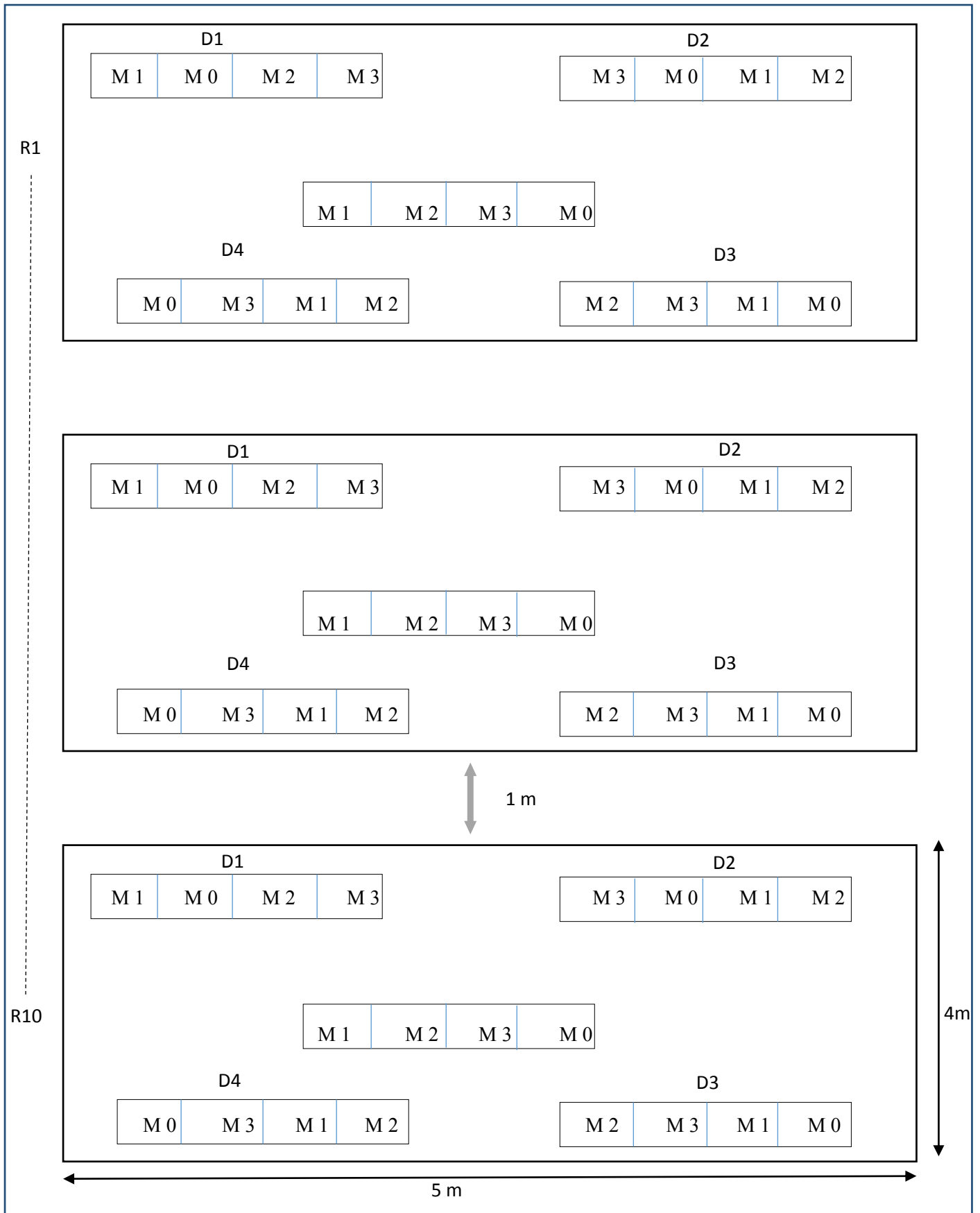
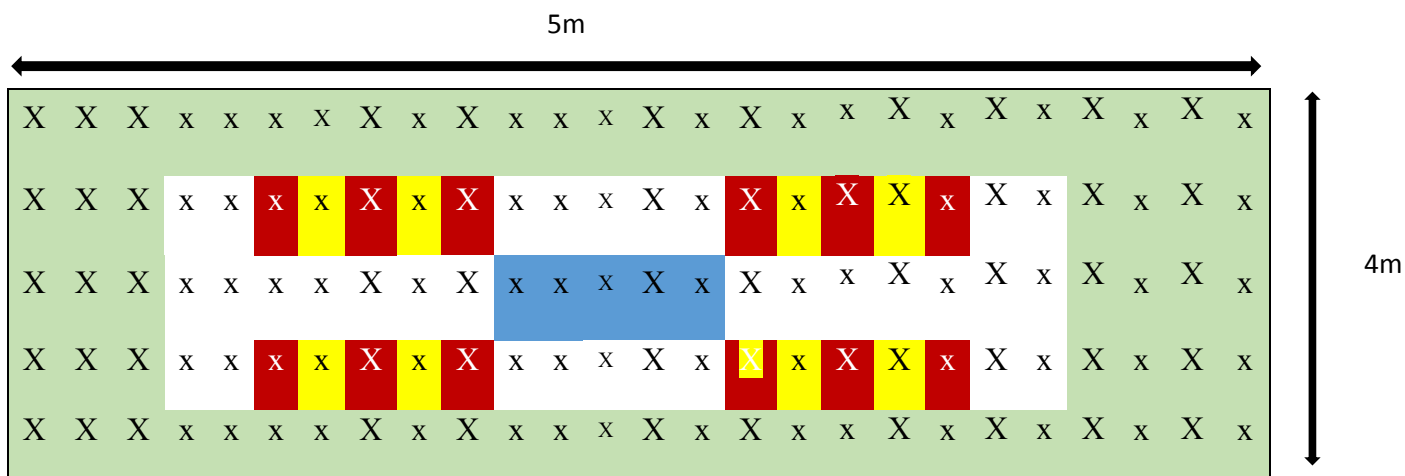


Figure 6 : Dispositif de l'essai



Legende

- x : Bordure
- x : plante à mesurer et comptage des feuilles
- x x X x x Placette pour mesure LAI-2000 et Sunscan (plante en jaune mesure de longueur largeur et mesure avec le scanner)
- x x X x x Placette feuille drapeau pour mesure finale des longueurs, LAI-2000, Sunscan

Figure 7 : Plan d'une parcelle élémentaire

2.3.2. Itinéraire culturel

Les travaux de préparation de sol ont consisté d'abord à un amendement de fumure organique à la dose de 1 t/ha. Le labour est intervenu trois jours après l'application de la fumure organique à l'aide d'un tracteur à disque. S'en est suivi le planage ainsi que le piquetage de la parcelle afin de délimiter les répétitions.

Le semis a été effectué manuellement à la date du 04 juillet 2016 après une pluie intervenue la veille. Pour s'assurer d'une bonne germination, une pincée de quelques grains ont été placés dans des poquets aux écartements de 20 cm avec un interligne de 80 cm.

Les travaux d'entretien de la culture ont consisté essentiellement aux sarclages survenues les 12 et 27 juillet soit respectivement 08 et 23 jours après semis (JAS). Le ré-semis

pour la variété IS15401 a eu lieu le 16 juillet soit 12 JAS suite à un très faible taux de germination. Au 15^{ème} JAS soit le 19 juillet nous avons effectué l'épandage de NPK 14-23-14 suivi du démariage à une plante par poquet. La technique de *side dressing* est celle que nous avons utilisée lors de l'épandage du NPK. Elle consiste à faire des sillons parallèles aux lignes de semis et distant de 7 à 10 cm des lignes, destinés à contenir le NPK. Ainsi donc à l'aide d'un bidon "lafi" coupé à la base, 835 kg/ha de NPK ont été apporté de la façon suivante : 0,334kg dans chaque sillon soit 1,670 kg pour les cinq lignes ; ce qui fait un total de 16,7 kg pour nos 10 géotypes. Le même jour nous avons procédé à l'identification d'au moins 4 placettes de 0,8m² au sein de chaque parcelle élémentaire. Ensuite deux plantes ont été identifiées au sein de chaque placette et marqués à l'aide de ficelles pour les mesures.

L'application de l'urée suivie du battage est intervenue le 17 Août soit 44 JAS. En effet 112,5 kg/ha d'urée ont été apporté comme suit : 0,045 kg par ligne soit 0,225 kg par géotype, et donc 2,250 kg pour les 10 variétés. Le buttage est fait aussi tôt non seulement pour recouvrir l'urée épandu mais surtout pour permette une plus grande résistance des plantes à la verse. Toutes ces opérations ont été effectuées à la main.

2.3.3. Collecte des données

2.3.3.1. Paramètres agronomiques mesurés

Les mesures ont été faites sur 2 des 5 plantes de chaque placette d'où un échantillon de 20 plantes pour chaque date de mesure. Les mesures ont été effectuées chaque dix jours à partir du 30^{ème} JAS jusqu'à l'apparition de la feuille drapeau de chaque variété. Ainsi le nombre de feuilles apparues (FA), ligulées (FL), vertes (FV) et le nombre de talle ont été comptés et noté soigneusement sur des fiches (annexe 2) pour chaque plante afin de suivre leur croissance. La longueur ainsi que la largeur de chaque FL ont été mesuré (brin et talles) à l'aide du ruban métrique. La hauteur des plantes a aussi été mesurée du sol jusqu'à la dernière FL ainsi que leur diamètre à l'aide d'un pied à coulisse (annexe 5). Le numéro de la dernière feuille ligulée était toujours noté au marqueur sur la plante.

2.3.3.2. Mesures de LAI

✓ **Mesure via LAI-2000**

Sur la placette contenant les deux plantes préalablement marquées à la ficelle et en jaune sur le dispositif, des mesures ont été effectuées afin de déterminer la fraction de trou et estimer ainsi le LAI. En effet 5 mesures ont été effectuées dont une première au-dessus de la plante et 4 autres en dessous de chaque côté de la plante (annexe 1). Les données sont aussi tôt transmises à la centrale d'acquisition reliée à la baguette par un câble et qui intègre un logiciel effectuant les calculs et affiche directement la valeur du LAI sur l'écran.

✓ **Mesure via longueur et largeur du limbe**

Pour chaque placette les dimensions des feuilles vertes et totalement déployées (ligulée) des deux plantes marquées préalablement sont enregistrées suivant leur rang sur la tige. Le LAI sera calculé à partir des mesures de longueur et de largeur des feuilles mesurées (annexe 3).

- La longueur de la feuille (L en cm) de la ligule à la pointe de la feuille ;
- La largeur (l en cm) entre les deux bords du limbe à environ 1/3 de la longueur

La surface du limbe est calculée par le produit de la longueur et le maximum de la largeur et un coefficient de 0,687 (Lafarge *et al.*, 2002), représentant la forme de la feuille. Pour obtenir le LAI, la surface du limbe est divisée par la surface du sol (surface au sol par plante : 0,2*0,8)

$$\text{LAI} = \frac{\sum L * l * 0,687}{0,2 * 0,8}$$

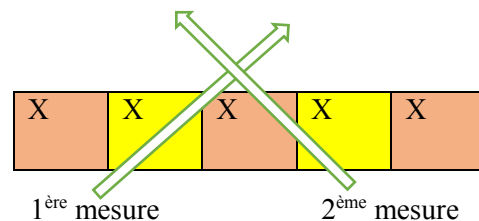
✓ **Mesure via le scanner (mesure de référence)**

Cette mesure consiste à prélever les deux plantes (en jaune sur le dispositif) sur la placette de mesure. Une fois la plante prélevée on coupe chaque FL suivant son rang sur la tige et on la positionne sur un support A4 muni d'un étalon de 4 cm². Avec une vitre, on recouvre ensuite le support contenant les feuilles qui peuvent être découpé en morceaux. Avec le scanner *Traotronics* qui allie vitesse, qualité et praticité, on procède au scannage des feuilles dans un

silence absolu. Il suffit tout simplement d'appuyer sur le bouton Scan, et de faire glisser le scanner sur la vitre à une vitesse régulière pour que ce dernier scanne la feuille et stocke l'image sur une carte mémoire micro SD dans l'appareil. Cela permettra d'avoir des images des feuilles qui seront traitées par un logiciel (*Image J*) afin de déterminer leur surface. Les feuilles scannées sont groupées dans une enveloppe, pesées et mises à sécher dans une étuve à 70°C pendant 72 h afin de déterminer leur poids sec puis leur surface massique. Une fois les surfaces foliaires calculées, le LAI est obtenu en divisant la surface déterminée par les 0,2*0,8 qui représentent la surface au sol par plante.

✓ **Mesure via Sunscan**

La mesure du LAI via le sunscan est basée sur le calcul de l'efficacité d'interception (ϵ_i) de l'énergie lumineuse par un couvert végétal à partir des mesures du rayonnement incident et transmis par ce couvert. Tout d'abord la sonde sunscan est reliée à un PDA par un câble. On la positionne sur la diagonale entre la deuxième et la troisième plante de la placette et l'on effectue une première mesure (annexe 4). Ensuite on la repositionne entre la troisième et la quatrième plante de la même placette toujours sur la diagonale et on effectue une seconde mesure et on fait la moyenne. Les mesures sont effectuées entre 10h et 14h où le ciel est bien ensoleillé. La valeur du LAI s'affiche ainsi sur l'écran du PDA. Tout cela se présente comme suit :



2.4. Traitement et Analyse des données

2.4.1. Interaction entre variété et méthode de mesure du LAI au stade Feuille Drapeau

Pour déterminer non seulement la méthode qui donne la meilleure estimation du LAI chez la plupart des variétés mais aussi chez chaque variété, les mesures du LAI au stade FD ont été soumises à une Analyse de variance (ANOVA) avec le logiciel RStudio. Les moyennes ont été séparées au seuil de 5% selon le test de Tukey.

2.4.2. Effet des méthodes sur le LAI en cours du cycle de développement

Afin de percevoir objectivement l'effet des différentes méthodes sur le LAI, les données brutes (mesures) recueillies sur le terrain ont été digitalisées puis organisées sur un tableur Excel 2013. L'interface RStudio (version 1.0.44.0) du logiciel R a été utilisée pour faire l'ANOVA avec comme facteur la méthode. La séparation des moyennes a été faite au seuil de 5% selon le test de Tukey.

2.4.3. Corrélation entre méthodes et quelques paramètres simples de mesures

L'intérêt de notre étude étant de mettre au point et de proposer une méthode pratique, fiable, simple et susceptible d'être utilisée en milieu paysan pour une meilleure caractérisation du LAI, il est plus que nécessaire de trouver une corrélation entre le LAI et quelques paramètres simples de mesure notamment la hauteur, le diamètre, le NFL et le NFV. Pour ce faire nous avons utilisé toujours le logiciel RStudio (version 1.0.44.0) afin d'y parvenir.

Chapitre 3 : Résultats et Discussion

3.1. Résultats

3.1.1. Interaction entre variété et méthode de mesure du LAI au stade Feuille Drapeau

Les LAI mesurés au stade feuille drapeau c'est-à-dire la dernière feuille avant l'inflorescence ont variés considérablement d'une variété à une autre. Ainsi ces variations sont de l'ordre de 1,5 à 2,2 pour la variété CSM63E. Elles sont de 1,7 à 2,3 pour Woroponi et 1,7 à 4,6 pour Pablo. Quant aux variétés Grinkan, Fadda, Nieleni et SK5912, le LAI a varié respectivement de 2,9 à 6,2 ; 3 à 4,5 ; 2,3 à 6,4 ; 2,8 à 4,8. Enfin les variétés Soumba, IS15401 et 621B ont enregistré des variations de LAI respectives de 2,5 à 3,3 ; 1,4 à 5,4 et 2,9 à 4,2 (figure 7).

L'Analyse de variance montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les méthodes quant à la mesure du LAI au stade FD. Cependant entre les variétés elle montre une différence très hautement significative ($p=3.88e-05$) au seuil de 5% selon le test de Tukey (tableau III).

Ainsi la séparation des moyennes montre que certains couples de variété ont un LAI significativement différent entre eux. C'est le cas des couples Woroponi~SK5912, Woroponi~Grinkan, Soumba~Grinkan, Pablo~Grinkan, Woroponi~Fadda, SK5912~CSM63E, Grinkan~CSM63E, CSM63E~621B, Woroponi~621B et Fadda~CSM63E (figure 8).

Les variétés ont ainsi pu être classées en trois groupes selon leur LAI. Le groupe A représenté par 612B, Fadda, SK5912, Grinkan et Nieleni est groupe des caudatum excepté Fadda et Nieleni et, ayant le plus fort LAI (compris entre 3,45 et 4,70). Ce qui fait de ces variétés celles qui ont une plus grande capacité d'interception de la lumière et donc de production de matières sèches. Les variétés du groupe B ont un LAI compris entre 2,08 et 3,45 ; donc un pouvoir d'interception de la lumière moyen. Ce groupe est composé de Nieleni, Woroponi, Soumba, Pablo et IS15401. Le groupe C est essentiellement composé des variétés de la race guinea (CSM63E et Woroponi). Ce groupe a un pouvoir d'interception de la lumière très faible compris entre 1,93 et 2,08.

Etant donné qu'il n'y a pas eu de différence significative sur l'interaction variété*méthode, nous pouvons donc considérer la variété comme répétition.

Tableau III : Effet combiné de la méthode de mesure du LAI et de la variété au stade Feuille Drapeau

Sources	Ddl	Somme des carrés	Carré moyen	F value	Pr (>F)	Signification
Méthodes	3	4,72	1,572	1,628	0,198	NS
Variétés	9	50,87	5,652	5,854	3,88e-05	***
Méthode*Variété	26	18,30	0,704	0,729	0,800	NS

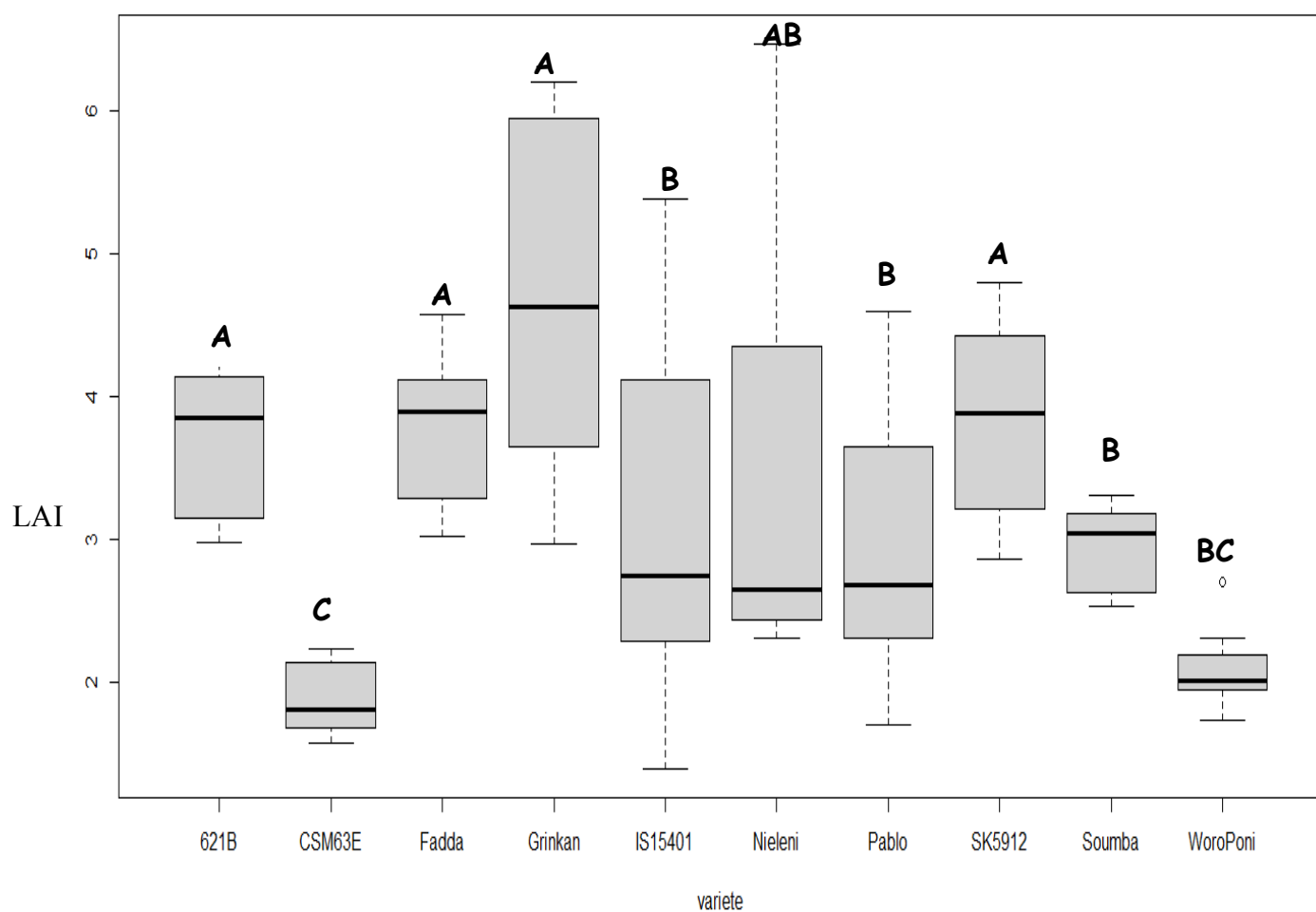


Figure 8 : Effet des variétés sur le LAI

3.1.2. Effet des méthodes sur la mesure du LAI au cours du cycle de développement

Le tableau IV montre les résultats de l'effet des différentes méthodes de mesure sur le LAI suivant différentes dates de mesure. Les LAI mesurés 30 JAS ont varié entre 0,32 (M1) et 0,94 (M2). Au 40^{ème}JAS, les LAI mesurés ont varié entre les valeurs 1,12 pour la M1 et 1,22 pour la M0 et à 51 JAS, ils ont varié entre 1,67 pour la M3 et 2,82 pour la M0.

Au 65^{ème}JAS, les LAI ont varié entre 3,12 pour la M2 et 3,74 pour la M0. Dix jours après soit 77 JAS il a varié entre 2,92 pour la M3 et 4,79 pour la M0. Au 93^{ème} JAS le LAI mesuré a varié entre 2,96 pour la M2 et 4,77 pour la M0.

L'ANOVA montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les méthodes à 40, 65, 77 et 93 JAS (tableau IV). Cependant il y a une différence significative entre les méthodes à 30 et 51 JAS (tableau 5 et 6). La séparation des moyennes par le test de Tukey à 95% a permis de voir la différence fondamentale entre les méthodes.

Tableau IV : Effet des différentes méthodes sur le LAI suivant différentes dates de mesures

Traitements	Dates de mesure					
	30 JAS	40 JAS	51 JAS	65 JAS	77 JAS	93 JAS
Scanneur (M0)	0,41b	1,22 a	2,82 a	3,74 a	4,79 a	4,77 a
Mesure (L*1) (M1)	0,32 b	1,12 a	2,47 ab	3,50 a	4,49 a	4,49 a
LAI-2000 (M2)	0,94 a	1,23 a	2,29 ab	3,12 a	2,96 a	2,96 a
Sunscan (M3)	0,44 b	1,12 a	1,68 b	3,21a	2,92 a	3,25 a
Pr > F	0,000	0,836	0,046	0,615	0,127	0,180
Significatif	THS	NS	S	NS	NS	NS

Légende : Les valeurs portant les mêmes lettres dans la même colonne ne sont pas statistiquement différentes au seuil de 5 % (test LSD de tukey) pour le paramètre considéré

M0 : méthode de mesure au scanner (méthode de référence)

M1 : méthode de mesure allométrique de toutes les feuilles ligulées

M2 : méthode de mesure avec le LAI-2000

M3 : méthode de mesure avec le sunscan

THS : Très Hautement Significative

S : Significative

NS : Non Significative

Les tableaux V et VI présentent les différences fondamentales entre les méthodes. Ainsi au 30^{ème} JAS, il n'y a pas de différence significative entre les méthodes M0, M1 et M3. Par contre le LAI-2000 (M2) est significativement différent des autres méthodes avec une valeur du LAI plus élevée (tableau V).

Au 51^{ème} JAS les méthodes M1 M2 et M3 n'ont pas montré de différences significatives entre elles alors que le sunscan (M3) est significativement différent ($p=0.0311640$) du scanner (M0) avec cependant une valeur du LAI plus faible (tableau VI).

Tableau V : Comparaison multiple des moyennes entre les méthodes de mesure du LAI à 30 JAS

	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr (>F)	Sens
M1-M2	-0,61676566	-0,9063826	-0,3271488	0,0000091	***
M0-M2	-0,53290295	-0,8225199	-0,2432860	0,0000980	***
M3-M2	-0,49140000	-0,7810169	-0,2017831	0,0003120	***
M0-M1	0,08386271	-0,2057542	0,3734796	0,8630587	NS
M3-M1	0,12536566	-0,1642512	0,4149826	0,6518521	NS
M3-M0	0,04150295	-0,2481140	0,3311199	0,9801522	NS

Tableau VI : Comparaison multiple des moyennes entre les méthodes de mesure du LAI à 51 JAS

	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr (>F)	Sens
M1-M2	0,1771446	-0,8879455	1,24223466	0,9696031	NS
M0-M2	0,5292624	-0,5358277	1,59435245	0,5452652	NS
M3-M2	-0,6153000	-1,6803901	0,44979010	0,4159876	NS
M0-M1	0,3521178	-0,7129723	1,41720788	0,8098436	NS
M3-M1	-0,7924446	-1,8575347	0,27264553	0,2055110	NS
M3-M0	-1,1445624	-2,2096524	-0,07947226	0,0311640	**

Légende :

M0 : méthode de mesure au scanneur (méthode de référence)

M1 : méthode de mesure avec la longueur et la largeur de toutes les feuilles ligulées

M2 : méthode de mesure avec le LAI-2000

M3 : méthode de mesure avec le sunscan

**** : Très hautement significatif*

*** : Hautement significatif*

3.1.3. Corrélation entre le LAI et quelques paramètres simples de mesures

L'analyse des paramètres de croissances montre qu'il existe une très forte corrélation entre le LAI et le NFL (0,83) ainsi qu'entre le LAI et la hauteur (0,78). De même il existe une forte corrélation entre le LAI et le NFV (0,70), le LAI et le diamètre (0,63) et enfin entre le LAI et la longueur de la dernière feuille ligulée (0,64). La corrélation entre le LAI et la largeur de la dernière feuille ligulée est moyenne (0,54). Cependant une très faible corrélation entre LAI et le nombre de talles a été observée (0,21) tandis qu'entre le LAI et le produit longueur*largeur de la dernière feuille ligulée on a trouvé une corrélation de 0,61. En d'autres termes c'est dire que le LAI et le NFL augmentent dans les mêmes proportions. Il en est de même pour le

NFV, la hauteur et le diamètre (Figure 9). Il est donc possible de prédire le LAI à travers ces paramètres simples de mesure via des équations les reliant (Tableau VII).

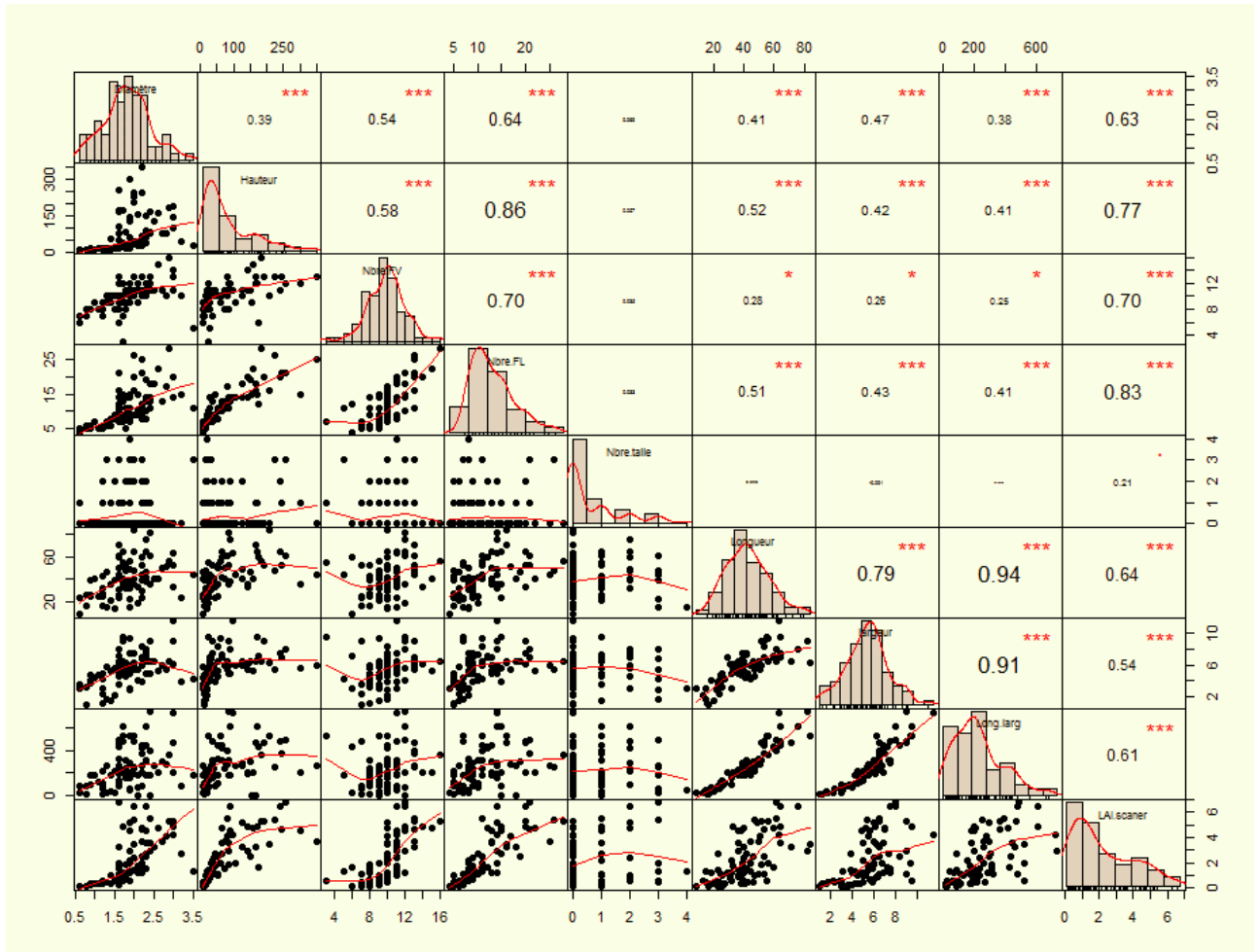


Figure 9 : Corrélations entre LAI et les paramètres de croissances

Légende :

Nbre FL : Nombre de feuille Ligulée

Nbre FV : Nombre de Feuille Verte

Nbre.taille : Nombre de talle

*Lon*larg : Produit de la longueur et de la largeur de la dernière FL*

**** : Degré de significativité ; tous les points sont concentrés autours de la droite 1 :1*

*** : Les points sont peu concentrés autours de la droite 1 :1*

** : Les points sont éparpillés de part et d'autre de la droite 1 :1*

Les corrélations établies permettent de déterminer des équations pouvant servir à obtenir de façon approximative le LAI à travers les paramètres mesurés. Il ressort que les relations liant le LAI et le diamètre ainsi que le LAI et le produit longueur*largeur sont régies par des fonctions puissances. Les relations entre LAI et NFV, LAI et NFL sont représentées par des fonctions linéaires avec des coefficients de détermination respectives de 0,4868 et 0,684. Enfin la relation entre LAI et hauteur est représentée par une fonction logarithme avec pour coefficient $R^2 = 0,7321$ (Tableau VII). En effet, la simulation du LAI à travers les différents paramètres est d'autant plus fiable que le coefficient de détermination tend vers la valeur 1. Nous pouvons donc dire que dans notre cas précis les simulations les plus fiables sont celles obtenues à travers le diamètre médian ($R^2 = 0,6934$), la hauteur ($R^2 = 0,7321$) et le NFL ($R^2 = 0,684$). La simulation obtenue à travers le produit de la longueur et la largeur de la dernière feuille ligulée n'est pas trop représentative vu le coefficient de détermination ($R^2 = 0,4752$).

Tableau VII : Relations entre LAI et les paramètres de croissance

Paramètres mesurés	Relations	
Diamètre	$y = 0,3347x^{2,5125}$	$R^2 = 0,6934$
Hauteur	$y = 1,549\ln(x) - 3,7112$	$R^2 = 0,7321$
NFV	$y = 0,5961x - 3,7248$	$R^2 = 0,4868$
NFL	$y = 0,2807x - 0,9563$	$R^2 = 0,684$
Longueur*largeur	$y = 0,0128x^{0,8892}$	$R^2 = 0,4752$

Légende :

y = Equation du LAI simulé

x = Valeur du LAI de référence (M0)

R^2 = Coefficient de détermination

La figure 10a présente les LAI simulés par le diamètre médian ainsi que la hauteur de la plante contre les LAI observés (M1). On remarque que les points représentant les LAI simulés à travers le diamètre et la hauteur sont plus ou moins groupés autour de la droite de référence pour un LAI observé allant jusqu'à 3 pour le diamètre et 5 pour la hauteur. Au-delà de ces

valeurs, on remarque que les LAI simulés sont beaucoup plus en dessous de la droite de référence. C'est donc dire que de 0 à 3 et 0 à 5 les LAI simulés respectivement par le diamètre et la hauteur sont acceptables mais au-delà de ces valeurs il y a sous-estimation du LAI.

Les points représentant les LAI simulés par le NFL (figure 10b) sont pratiquement sur la droite de référence entre 0 à 4. Ce qui traduit une bonne estimation du LAI par le NFL. Au-delà de la valeur 4 les points sont plus sous la droite de référence traduisant une sous-estimation du LAI. Quant aux NFV on remarque aussi une sous-estimation du LAI à partir de la valeur 3

Concernant le produit de la longueur et la largeur de la dernière feuille ligulée on remarque une répartition plus ou moins groupée des points autour de la droite de référence entre 0 et 2,5. Au-delà de cette valeur tous les points sont éparpillés de part et d'autre de la droite de référence (figure 10c) conséquence d'une mauvaise estimation du LAI.

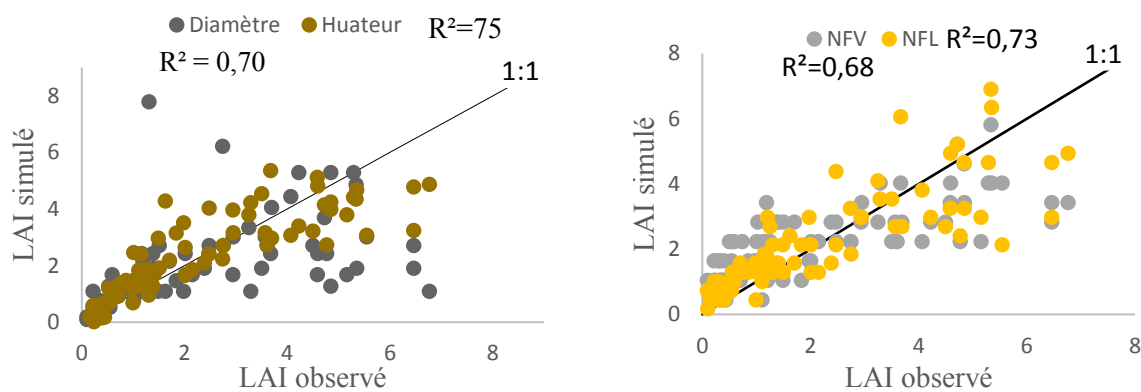


Figure 10a : LAI simulé par le diamètre et la hauteur **Figure 10b : LAI simulé par le NFL et NFV**

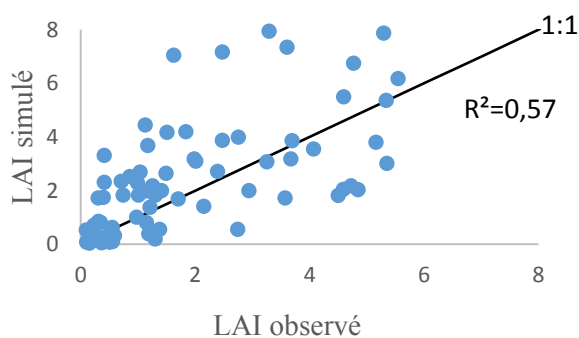


Figure 10c : LAI simulé par le produit longueur et largeur de la dernière feuille ligulée

3.2. Discussion

3.2.1. Effet des méthodes sur la mesure du LAI au cours du cycle de développement

Les résultats de l'analyse des effets des méthodes sur le LAI au cours du cycle de développement ont montré qu'il n'y a pas de différence significative entre les méthodes au 40^{ème}, 65^{ème}, 77^{ème}, et 93^{ème} Jour Après Semis (JAS). Cependant au 30^{ème} JAS (stade 6 feuilles ligulées) et au 51^{ème} JAS (stade 12 feuilles ligulées) l'analyse a révélé des différences significatives (tableau V et VI).

Ainsi au 30^{ème} JAS il ressort que la méthode M2 est significativement différente des autres méthodes. On remarque une surestimation du LAI avec la méthode M2 en début de saison due probablement aux faibles radiations mesurées en dessous des plantes. Etant donné qu'à cette période les plantes sont encore petites et que les organes aériens notamment les feuilles ne permettent pas une bonne couverture du sol, la radiation mesurée en dessous de la plante sera plus ou moins égale à celle mesurée au-dessus de la plante engendrant une surestimation du LAI. Ces résultats sont en accord avec ceux trouvés par Nadia EL Khadji (2008) qui a montré que toutes les méthodes empiriques mais aussi le LAI-2000 présentait un problème de surestimation du LAI au début de la croissance végétative et plus particulièrement chez le blé et le maïs. Ce qui pourrait être le cas aussi pour le sorgho. Ceci nous permet d'affirmer qu'en début de saison, le LAI-2000 n'est pas approprié pour estimer le LAI. Au regard de nos résultats nous pouvons dire qu'au cours du cycle de développement c'est-à-dire du 40^{ème} jusqu'au 93^{ème} JAS toutes les méthodes seraient appropriées pour l'estimation du LAI. Jonckheere *et al.*, (2004) ont plutôt montré qu'en plein cycle de développement le LAI estimé par le LAI-2000 est inférieur à celui estimé par les méthodes directes et qu'il y a saturation du LAI lorsque celui-ci atteint la valeur 5. Cependant au 51^{ème} JAS la méthode M3 a montré une différence significative avec la méthode M0. Cette différence observée est due à une légère sous-estimation du LAI par le ceptomètre "sunscan" ; ce qui témoigne les travaux de Futahuchi *et al.*, (2009) qui ont montré que le LAI estimé avec le sunscan était significativement différent ($R^2 = 0,96$) de celui obtenu par la méthode destructive. Selon Campbell (1986) les risques d'erreur avec le sunscan augmentent pour des éléments (feuilles) verticaux et un soleil bas (hauteur zénithale du soleil trop basse). Or pour notre mesure du 51^{ème} JAS, cette hauteur zénithale était très différente de celle des autres dates de mesure ; ce qui a nécessairement conduit à une sous-estimation du LAI.

En plus du fait qu'il n'y a pas eu de différence significative entre les méthodes au cours du cycle de développement or mis les 30^{ème} et 51^{ème} JAS, on remarque que les deux méthodes directes (M0 et M1) sont plus proches entre elles. Cet état de fait pourrait s'expliquer par la nature de la variable mesurée. En effet dans le calcul du LAI, ces deux méthodes ont en commun les feuilles vertes et ligulées comme variable mesurée. Pour ce qui est des méthodes indirects (M2 et M3) elles sont également similaire entre elles concernant l'estimation du LAI. Cela est imputable au principe et à la logique des instruments de mesures. La variable commune mesurée dans ce cas n'est plus les feuilles vertes et ligulées mais plutôt la transmittance dans le couvert. Le LAI estimé par ces appareils tient compte non seulement du feuillage mais aussi des autres organes de la plante tels que la tige et l'ombrage ce qui biaise les estimations du LAI. Raison pour laquelle certains auteurs comme Asner *et al.*, (2003) pensent que pour de telles méthodes, une autre définition du LAI est plutôt de mise comme celle du LAI projeté horizontalement ou « LAI vert » ou encore PAI (Plant Area Index).

3.2.2. Interaction entre variété et méthode de mesure du LAI au stade Feuille Drapeau

Les résultats de l'interaction entre variété et méthode de mesure du LAI au stade feuille drapeau ont montré qu'il n'y avait pas de différences fondamentales entre les méthodes. Par contre les variétés ont présenté des différences significatives entre elles (tableau III), confirmant ainsi les travaux de Bonane (2015) qui a montré que les dix variétés de sorgho étaient très différentes entre elles en termes de LAI. L'analyse a montré qu'il n'y a pas de spécificité de la méthode par variété. C'est donc dire que toutes les méthodes ont la même estimation du LAI indépendamment de la variété puisqu'il n'y a pas eu de différence significative de l'interaction variété*méthode. Nos résultats sont proches de ceux obtenus par Grangeon (2006) qui a travaillé sur deux variétés de canne à sucre. En effet, il est parvenu à la conclusion que les méthodes utilisées (*LAI-2000 et le ceptomètre "Accupar"* ; pratiquement identiques à nos méthodes optiques) avaient la même estimation du LAI. Cet état de fait pourrait s'expliquer par le faible nombre de plantes échantillonnées. En effet, selon plusieurs auteurs (Baret *et al.*, 2003) pour avoir de bons résultats avec les méthodes optiques il faut effectuer un nombre assez important de mesure pour tenir compte de l'hétérogénéité due à l'organisation en rang au sein de la placette.

3.2.3. Corrélation entre le LAI et quelques paramètres de croissance de la plante

Nos résultats ont montré que le LAI est bien corrélé par certains paramètres que sont le NFL, la hauteur, le NFV et le diamètre. Ces résultats sont en corroboration avec les travaux de Nadia EL Khadji, (2008) qui a trouvé une corrélation de 0,733 entre le LAI et la hauteur. Bonane, (2015) était parvenu à des conclusions très similaires aux nôtres concernant les corrélations entre non seulement le LAI et le NFL (0,723) mais aussi entre le LAI et le diamètre (0,63). Cependant la corrélation entre le LAI et le NFV trouvée par Bonane, (2015) est légèrement inférieure à celle que nous avons trouvée. Ainsi donc plus la hauteur de la plante augmente, plus son LAI aussi augmente suivant une fonction logarithme. Malone *et al.*, (2002) illustre la notion de l'évolution du LAI par l'augmentation de groupe de feuilles et par la suite de l'augmentation de la hauteur. D'après Jackson *et al.*, (1983) l'évolution temporelle de la fraction du couvert végétale et le LAI sont similaires. Donc, les deux paramètres sont censés être sensible à la variation de la hauteur qui est strictement liée à la croissance de la végétation. Une croissance végétative induit un développement en hauteur de la plante qui va générer un nombre important de feuilles ce qui va permettre un fort taux de recouvrement et donc une augmentation du LAI.

Conclusion et perspectives

L'étude menée à la station expérimentale et de recherche de Farako-Bâ (Burkina Faso) avait pour objectif global de comparer quatre méthodes afin de parvenir à une meilleure caractérisation de l'indice foliaire sur dix variétés de sorgho de race différente. Nos résultats ont révélé qu'au cours du cycle de développement toutes les méthodes donnent une bonne estimation du LAI sauf qu'en début de saison (30 JAS), le LAI-2000 présente une surestimation le LAI et qu'au 51^{ème} JAS c'est le sunscan qui le sous-estime. Au stade feuille drapeau l'analyse n'a montré aucune différence entre les méthodes contrairement aux variétés qui, elles sont significativement différentes. Au regard des contraintes observées sur le terrain concernant chaque méthode nous pouvons conclure que la méthode de mesure longueur largeur des feuilles ligulées (M1) serait la plus simple et la mieux utilisable en milieu paysan. Certes sa pratique est laborieuse et peut occasionner des stress à la plante d'où sa simplification au décompte du NFL et la mesure de la hauteur ou du diamètre de la plante pour calculer le LAI en utilisant la relation établie plus haut. Le LAI-2000 semble aussi recommandable en milieu paysan et surtout pour des cultures dont la hauteur n'excède pas 175 cm à condition que les mesures ne soient pas effectuées en début de saison (de 0 à 30 JAS). Le sunscan quant à elle est une technologie très spécifique nécessitant un investissement coûteux pour l'acquisition du matériel. Ce qui fait de cette technologie un handicap pour nos producteurs vu leur analphabétisme et leur niveau de formation. Au stade actuel, cette technologie est beaucoup plus utilisée par les techniciens en expérimentation dans les stations de recherche.

Cette étude a permis de mettre au point les modalités d'utilisation de deux méthodes simples (prédit à travers la hauteur et le NFL), susceptible d'être utilisé par le paysan et permettant de mesurer de façon systématique le LAI et donc de se substituer à des mesures directes qui sont destructrices et très longues à mettre en place. En guise de perspective,

- ✓ Il serait intéressant d'effectuer les essais directement en milieu paysan compte tenu de la complexité de ce milieu afin de s'assurer non seulement de la fiabilité mais aussi de l'adaptabilité de ces méthodes en plein champs ;
- ✓ Vu que le LAI-2000 donne une surestimation du LAI en début de saison, nous suggérons de déterminer le LAI par la hauteur de la plante en tout début de saison pour ensuite continuer avec le LAI.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- ANDERSON, M. C. 1964.** Studies of the woodland light climate. I. The photographic computation of light conditions. *Journal of Ecology* 52:25-41.
- ANDERSON, M. C. 1971.** Radiation and crop structure. Plant Photosynthetic Production, Manual of Methods. Eds Z.Sestak, J.catsky and P.G. Jarvis. Dr W. Junk Publ.: pp 412-466.
- ALEXANDRDE Y., 1981.** - Pénétration de la lumière au niveau du sous-bois d'une forêt dense tropicale 158p.
- ANDA A, LOKE Z. 2005.** Radiation Balance Components of Maize Hybrids Grown at Various Plants densities. *J. Agronomy and Crop Science*, 191: 202-209.
- ASNER G. P., HICKE J. A, 2003.** Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies. *Global Ecology and Biogeography*, 12, 191-205.
- AYAZ S., McKENZIE BA, McNEIL DL, HILL GD, 2004.** Light interception and utilization of four grain legumes sown at different plant populations and depths. *Journal of Agricultural Sciences* 142 : 297-308.
- BADO B. V. 2002.** Rôle des légumineuses sur la fertilisation des sols ferrugineux tropicaux des zones guinéennes et soudaniennes du Burkina Faso. Thèse de doctorat université Ouaga 1. Ph D, 184p.
- BONANE D, 2015.** Étude de l'indice foliaire de dix variétés de sorgho a multi usage dans la vallée du kou. CUPD. BURKINA FASO. Mémoire d'ingénieur de développement rural Option Agronomie, pp. 30-59
- BONHOMME R., RUGET F., DERIEUX M. VINCOURT P. 1982.** Relations entre productions de matière sèche aérienne et énergie interceptée chez différents génotypes de maïs. C.R. Acad. Sci., Paris, série III, 294, 393-398.
- BEADLE, C. L. 1993.** Photosynthesis and production in a changing environment: a field and laboratory manual, p. 36-46, *In* Hall, ed. Growth Analysis. Chapman & Hall, London.
- BEED F. D., N. D. PAVELEY B. SYLVESTER. 2007.** Predictability of wheat grown and yield in light-limited conditions. *J. Agric. Sci.* 145 : 63 - 79.
- BRÉDA N. 1996** L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle Fonctionnel. (*Quercus petraea*). — *Tree Physiology*, vol. 15, 1995, pp. 295-306.
- BRÉDA N., GRANIER A. 1994** Intra- and inter-annual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). — *Annales des Sciences forestières*, vol. 53, 1996, pp. 521-536.

BREDA, N. 1994. Analyse du fonctionnement hydrique des chênes sessile (*Quercus Petraea*) et pédonculé (*Quercus robur*) en conditions naturelles ; effets des facteurs du milieu et de l'éclaircie. Thèse, Université de Nancy. 167pp

BULLETIN DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE n°22, 1998. Caractérisation et méthode de criblage des variétés de sorgho Guinéens photopériodique de la mali.

CAMPBELL, G.S. 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology* 36:317-321.

CAMPBELL, G.S. 1990. Derivation of an angle density function for canopies with ellipsoidal leaf angle distributions. *Agricultural and Forest Meteorology* 49 :173-176.

CATALOGUE OUEST AFRICAIN DES ESPECES ET VARIETES VEGETALES, 2008. Le sorgho. Organisation des Nations Unies Pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome, 2008, 110p.

CHANTEREAU et al., 2013. Agriculture tropicale en poche : *le Sorgho*. Edition Quae, RD 10,78026 Versailles Cedex, France. Presses agronomiques de Gembloux, 247 p.

CHEN, J. M., BLACK. 1991. Measuring leaf area index of plant canopies with branch architecture. *Agricultural and Forest Meteorology* 57:1-12.

CHEN, J. M., BLACK. 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment* 15 :421-429.

CLERGET, B., 1999. Etude comparée de la croissance et du développement de deux variétés de sorgho de race caudatum et guinea. DEA. INA-PG, Paris, France 32 pp.

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, Institut National Agronomique ParisGrignon. France 103p+ annexes.

COLWELL, J. E. 1974. Vegetation canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 3, 175- 183.

CRAUFURD, P. Q., FLOWER, D. J., PEACOCK, J. M., 1993. Effect of heat and drought stress on sorghum. I. Panicle development and leaf appearance. *Exp. Agr.* 29, 61-76.

DAVID L., 1987 : Cultures traditionnelles de plein champ. Peace Corps, par la TransCentury Corporation, Washington, D.C, 497 p.

DANIEL-YVES A. 1981. L'indice foliaire des forêts tropicales *Acta Oecologica/Oecologia Generalis*, Vol. 2, no 4, p. 299-312.

DANNER, M.; LOCHERER, M.; HANK, T.; RICHTER, K. 2015: Measuring Leaf Area Index (LAI) with the LI-Cor LAI 2200C or LAI-2200 (+2200Clear Kit) – Theory, Measurement, Problems, Interpretation. *EnMAP Field Guide Technical Report, GFZ Data Services*.

DE WET, J. M. J., HARLAN, J. R. PRICE, E. G. 1970. Origin of variability in the Spontanea complex of Sorghum bicolor. *American Journal of Botany* 57(6): 704-707.

WITT, C. T. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Agric. Res. Rept.* 663:57p.

DOGGETT H., 1988. Sorghum. 2nd edition. Longman Scientific and Technical, UK, 512 pp.

DENOROY P, THIEBEAU P, GOSSE G. 2002. Une méthode pour estimer l'interception du rayonnement par un couvert bas : application au colza avant montaison. *OCL*, 9 : 5463.

DENOROY P., E. JUSTES and G. GOSSE. 2000. Mesure du taux de couverture du sol pour estimer les principales caractéristiques d'une culture de colza avant montaison. *Oléagineux, Corps Gras, Lipide*. 7: 118 - 23.

FESTO J. M., S. N. AZAM-ALI and J. A. Roberts. 2003. The impact of the temperature on leaf appearance in Bambara Groundnut Landraces. *Crop Sci.* 43: 1375 - 1379.

FLÉNET F, KINIRY JR, BOARD JE, WESTGATE ME, REICOSKY DC. 1996. Rowspacing effects on light extinction coefficients of corn, sorghum, soybean and sunflower. *Agron. J.*, 88 : 185–190.

GOSSE G., CHARTIER M., VARLET-GRANCHER C. BONHOMME R. 1982 Interception du rayonnement utile à la photosynthèse chez la luzerne : variations et modélisation. *Agronomie* 2, 6, 583-588

GOSSE G., VARLET-GRANCHER C., BONHOMME R., CHARTIER M., ALLIRANDJ.M. LEMAIRE G. 1986 Production maximale de matière sèche et rayonnement solaire intercepté par un couvert végétal. *Agronomie* 6, 1, 47-56

GUINKO S., 1984. Végétation de Haute Volta. Thèse de Doctorat d'état, Université de Bordeaux France

GUINKO S. 1988. Choix de quelques espèces ligneuses spontanées pour les programmes d'amélioration génétiques et de reforestation. *Act. Séminaire régional sur les semences forestières*.

HODGE T. Kanemasu E.T., 1977 Modeling daily matter production of winter wheat. *Agron. J.* 974-978

HOUSE L. R., 1987. Manuel pour la sélection du sorgho. Deuxième édition. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, Patancheru, Inde, 229 pp.

- JACKSON, R. D., EZRA, C. E., 1985.** Spectral response of cotton to suddenly- induced water stress. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 177- 185
- JACKSON, R. D., PINTER, P. J. J., 1986.** Spectral response of architecturally different wheat canopies. *Remote Sensing of Environment*, 20(1), 43-56.
- JACKSON, R. D., SLATER, P. N., PINTER, P. J. J., 1983.** Discrimination of growth and water stress in wheat by various vegetation indices through clear and turbid atmosphere. *Remote Sensing of Environment*, 13,187- 208.
- JONCKHEERE, I., S. FLECK, K. NACKAERTS, B. MUYS, P. COPPIN, M. WEISS, AND F. BARET. 2003.** Review of methods for in situ leaf area index determination. Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121:19-35.
- LAFARGE T. A. AND HAMMER G. L., 2002.** Predicting plant leaf area production. Shoot assimilate accumulation and partitioning, and leaf area ratio are stable for a widerange of sorghum population densities. *Field Crops Research*. 77, 137-151.
- LEBLANC SG, CHEN JM., 2001.** A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agricultural and Forest meteorology*. 110:125-139.
- LEONG, W., R. LEMEUR, P. K. YOON. 1982.** Characterization of leaf area index and light penetration of *Hevea brasiliensis* Muell. Arg. by hemispherical photography. *Rubber Res Inst Malaysia* 30:80-90.
- MALONE, S., HOISHOUSER, D. L, HERBERT, D. A J., JONES, B. P., 2002.** Identifying Soybean Fields at Risk to Leaf-Feeding Insects. *Virginia Cooperative Extension* (www.ext.vt.edu/pubslentomology/444-203/), 444-203.
- MCCREE K. J., 1966** A solarimeter for measuring photosynthetically active radiation. *Agric. Meteorol.* 3, 353- 366
- MCCREE K. J., 1972:** The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9, 191-2166
- MCPHERSON, E. G., AND P. J. PEPER. 1998.** Comparison of five methods for estimating leaf area index of open-grown deciduous trees. *J. Arboric.* 24 :98-111.
- MEDEIROS, 1997.** Modifications et développement d'un nouveau module contraint hydrique dans le modèle CERES-sorghum sucrier. Thèse doctorale. Institut National Paris Grignon, 113 pp.
- MUCHOW, R. C., CARBERRY, P. S., 1990.** Phenology and leaf-area development in tropical grain sorghum. *Field Crops Research*. 23, 221-237.
- MYNENI, R. B., G. ASRAR, E. T. KANEMASU, D. J. LAWLOR, I. IMPENS. 1986.** Canopy architecture, irradiance distribution on leaf surfaces and consequent photosynthetic efficiencies in heterogeneous plant canopies. Part 1. Theoretical considerations.

Agricultural and Forest Meteorology 37:189-204.

NADIA EL KHADJI, 2008. Estimation des paramètres biophysiques des cultures agricoles par télédétection aéroportée. Université de Montréal Faculté des études supérieures 141 pp

ROMAIN GRANGEON, 2006. Mesure de l'indice foliaire de la canne à sucre par deux méthodes indirectes. Master en Biologie Fonctionnelle des Plantes 22pp

ROSS, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands The Hague.

SAMIR MERIDJA, 2011. Approche biophysique des processus de développement et de croissance des couverts végétaux : Interaction avec le stress hydrique et optimisation des pratiques culturales en climat méditerranéen. Thèse doctorale Paris Tech 181pp

SINOQUET, H., BONHOMME. 1989. Modélisation de l'interception des rayonnements solaires dans une culture en rangs. II. Structure géométrique du couvert et validation du modèle. *Agronomie* 9 :619-628.

SINOQUET, H., B. MOULIA, AND R. BONHOMME. 1991. Estimating the three-dimensional geometry of a maize crop as an input of radiation models: comparison between three dimensional digitizing and plant profiles. *Agricultural and Forest Meteorology* 55 :233-249.

TROUCHE G., CHANTEREAU J. et ZONGO J.D., 1998. Variétés traditionnelles et variétés améliorées de sorgho dans les régions sahéliennes. In : L. Bacci et F-N. Reyniers (eds). *Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique tropicale semiaride*, pp 197-208.

VAKSMANN, M., TRAORE, S. B., KOURESSY, M., COULIBALY, H., REYNIERS, F.-N., 1998. Etude du développement d'un sorgho photopériodique du Mali. In : *Le futur des céréales photopériodiques pour une production durable en Afrique semi-aride*. Florence, Italia, CIRAD et Ce.S.I.A., Florence, Italia, pp. 109-122.

VAN OOSTEROM EJ, O'LEARY GJ, CARBERRY PS, CRAUFURD PQ. 2002. Simulating growth, development, and yield of till ring pearl millet. III. Biomass accumulation and partitioning. *Field Crops Research*, 79: 85-106.

WATSON, D. J. 1947. Comparative physiological studies on the growth of field crops. I Variations in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annales of Botany* 11, 41:41-76.

WEISS, M., F. BARET, G. J. SMITH, I. JONCKHEERE, COPPIN. 2004. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination. Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121:37-53.

WELLES, J. M. 1990. Some indirect method of estimating canopy structure. *Remote Sensing Revue* 5:31-43.

WILHELM, W. W., MCMASTER, G. S., 1995. Importance of the phyllochron in Studying development and growth in grasses. Crop Sci. 35, 1-3.

ZHANG, Y., J.M. CHEN, J. R. MILLER. 2005. Determining digital hemispherical Photograph exposure for leaf area index estimation. Agricultural and Forest Meteorology 133 :166181.

ANNEXES

Annexe 1 : Mesure du LAI avec le LAI-2000



Photo 4 : Mesure via LAI2000 Source : OULA (2016)

Annexe 2 : Fiches d'observation agronomique

Données à collecter :

<i>Plants</i>	<i>Nombre feuilles apparues</i>	<i>Nombre feuilles ligulées</i>	<i>Nombre feuilles vertes</i>	<i>Nombre talles</i>	<i>Poids frais</i>	<i>Poids sec</i>	<i>LAI 2000</i>	<i>LAI sunscan</i>	<i>LAI scanné</i>
---------------	---	---	---------------------------------------	--------------------------	------------------------	----------------------	---------------------	------------------------	-----------------------

			<i>Feuille 1</i>				<i>Feuille 2</i>			
			<i>Longueur</i>		<i>Largeur</i>		<i>Longueur</i>		<i>Largeur</i>	
<i>Plants</i>	<i>Hauteur</i>	<i>Diamètre</i>	<i>Brin</i>	<i>Talle</i>	<i>Brin</i>	<i>Talle</i>	<i>Brin</i>	<i>Talle</i>	<i>Brin</i>	<i>Talle</i>

Annexe 3 : Mesure de la longueur et de la largeur des feuilles



Photo 5 : Mesure largeur de la feuille



Photo 6 : Mesure longueur de la feuille

Source : OULA OUATTARA (2016)

Annexe 4 : Mesure du LAI avec le Sunscan



Photo 7 : Mesure via le sunscan Source : OULA (2016)

Annexe 5 : Pied à coulis utilisé pour la mesure du diamètre médian

