



REPUBLIQUE DU SENEGAL
Un Peuple –Un But –Une Foi



**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR, DE LA RECHERCHE
ET DE L'INNOVATION (MESRI)**

UNIVERSITE DE THIES

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'AGRICULTURE (E.N.S.A)

DEPARTEMENT DES PRODUCTIONS VEGETALES (DPV)

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

présenté par

Seydou DIATTA

pour obtenir le grade de :

**Master Foresterie et Environnement pour une
Gestion Durable des Ressources Naturelles**

Thème :

**Estimation du stock et du stockage annuel de carbone dans la
biomasse aérienne de *Faidherbia albida* (Del.) A chev du parc
agroforestier de Sob (Observatoire de Niakhar, Sénégal) :
approches par inventaires et dendrochronologie.**

Soutenu le 2020, devant le jury :

| | | |
|---------------------|--|--------------|
| Pr Saliou NDIAYE | Enseignant / Chercheur – ENSA de Thiès | Président |
| M. Ibrahima DIEDHIU | Directeur de l'ENSA de Thiès | Encadreur |
| M. Olivier ROUPSARD | Chercheur C.I.R.A.D (Dakar, Sénégal) | Co-encadreur |
| M. Massamba THIAM | Chef de Département PV | Membre |

Remerciements

Ce mémoire a été possible grâce à l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) à travers le Centre National de Recherches Forestières (CNRF) de Dakar dans le cadre du projet « *Roles of Agroforestry in Sustainable Intensification Small Farm and food Security of Societies in West Africa* » RAMSES II, qui a pour objectif de fournir des scénarios d'intensification innovants pour les quatre parcs agroforestiers à base de cultures céréalières les plus représentés en Afrique de l'Ouest, tout en optimisant leur adoption par les petits exploitants.

Au terme de cette étude, je rends grâce à Allah qui m'a tant donné. Que la paix et le salut se déversent en abondance sur son bien-aimé Prophète Mouhamed paix et salut sur lui.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et à remercier toutes les personnes ou institutions qui ont contribué de près ou de loin à sa réalisation.

Mes vives remerciements vont à l'endroit du:

Dr Olivier ROUPSARD, Chercheur au Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) Dakar, Sénégal, qui n'a ménagé aucun effort pour mon encadrement ; sans son précieux apport, ce mémoire n'aurait pas vu le jour. Mais aussi il a voulu partager ses connaissances et son savoir-faire. Vous avez fait preuve de patience, j'ai pu bénéficier de votre expérience, de vos qualités sociales, scientifiques et de vos conseils. Je ne vous remercierai jamais assez.

Monsieur Ibrahima DIEDHIOU, Professeur Assimilé, Directeur de l'Ecole Nationale Supérieure d'Agriculture (ENSA). Malgré vos lourdes responsabilités académiques et administratives, vous avez accepté de diriger ce mémoire. Je retiens de vous, une personne honnête, humble, accomplie, rigoureuse, généreuse, pragmatique, attachée au travail bien et ayant un grand sens des relations humaines. A travers vous, j'exprime aussi toute ma gratitude à l'endroit des autorités de l'Université de Thiès; la Direction de la Scolarité, de l'Orientation et des Statistiques de l'Université ;

Dr Diaminatou SANOGO, Directrice du CNRF/ISRA, pour avoir aimablement accepté de m'accueillir dans sa structure et, à travers sa personne, tout le personnel administratif et technique pour leur disponibilité ;

Dr Lydie LARDY, Directrice de Recherche de l'Institut de Recherche pour le Développement(IRD), UMR EcoetSols, Co-Directrice LMI IESOL, Dakar, Sénégal, de m'avoir accueilli dans sa structure et, à travers sa personne, tout le personnel administratif et technique pour leur disponibilité ;

Mes remerciements à toute l'équipe du laboratoire d'anatomie biowoeb, à travert elle, remercier en particulier M. Dao Dougabka, Remy Marchal, Jean Gérard Julien Ruelle de m'avoir fourni leurs données.

Dr Nicolas Montes pour son aide préssieuse et pour une relecture de mon Mémoire ;

Dr Raphael Manlay pour une relecture de mon Mémoire ;

Dr Valérie Delaunay et Laurence Fleury de m'avoir accueil au sein de l'Observatoire de Niakhar ;

M. Massamba THIAM, Coordinateur du Master Foresterie et Environnement pour une Gestion Durable des Ressources Naturelles, pour m'avoir permis de faire ce master, à travers lui tous les professeurs du master ;

Dr Cheick O. Samb du CNRF, pour son formidable appui technique, notamment au cours du tronçonnage des rondelles des arbres, et ses conseils.

Dr. Muriel Navarro pour le découpage des barreaux dans les rondelles de Faidherbia en menuiserie.

Mes sincères remerciements vont également à M. Robert DIATTE de Niakhar, pour avoir bien voulu m'accueillir au sein de sa famille dans le cadre de mon stage. Sans oublier Ibou DIOUF, Boubacar GACKOU et M. Abdoulaye DIOUF chef de village de Sob.

Enfin, je suis conscient que plusieurs noms n'apparaissent pas dans cette rubrique. Que les uns et les autres trouvent en cette œuvre le signe de ma reconnaissance.

Résumé

Cette étude a été conduite dans la zone de Niakhar, région de Fatick (Sénégal) avec l'objectif de quantifier le stock et le stockage annuel de carbone dans la biomasse aérienne des *Faidherbia albida* d'un parc agroforestier du bassin arachidier du Sénégal, à l'échelle d'un village de 500 ha environ (Sob, pourvue d'une densité de Faidherbias de 6.4 arbres/ha). Pour suivre l'accroissement en circonférence des arbres, trois méthodes indépendantes ont été comparées avec succès : (i) suivi saisonnier des circonférences ; (ii) inventaires en 2015 et 2019 ; (iii) dendrochronologie. L'accroissement annuel serait d'environ 1 cm par an sur le diamètre.

Des équations allométriques (tarif de cubage) de la littérature pour estimer la biomasse, le stock et le stockage annuel de carbone sont testées localement sur nos mesures destructives. Le modèle puissance, avec l'équation $y = 0.112 \text{ DHP}^{2.2335}$ (Laminou Manzo et al. (2015)) semble le plus indiqué localement. Nous estimons le stockage annuel de C à 0.084 tC ha⁻¹ an⁻¹.

Mots clés : Accroissement, inventaire, dendrochronologie, équations allométriques, modèles de prédiction, biomasse, carbone, *Faidherbia albida*.

Abstract

This study was conducted in the Niakhar area, Fatick region (Senegal) with the objective of quantifying the annual carbon stock and storage in the aerial biomass of *Faidherbia albida* in an agroforestry park in the groundnut basin of Senegal, on the scale of a commune of about 500 ha (Sob, with a density of *Faidherbias* of 6.4 trees/ha. In order to monitor tree circumference growth, three independent methods were successfully compared: (i) seasonal circumference monitoring; (ii) inventories in 2015 and 2019; (iii) dendrochronology. Annual increment would be about 1 cm per year on diameter.

Allometric equations (cubage rate) from the literature to estimate biomass, stock and annual carbon storage are used and are locally tested on our destructive measurements. The power model, with the equation $y = 0.112 \text{ DBH}^{2.2335}$ (Laminou Manzo et al. (2015) seems to be the most appropriate local model. We estimate the annual storage of C 0.084 tC ha⁻¹ yr⁻¹.

Keywords: Growth, inventory, dendrochronology, allometric equations, prediction models, biomass, carbon, *Faidherbia albida*.

Table des matières

| | |
|--|-------------|
| Remerciements | i |
| Résumé | iii |
| Abstract | iv |
| Table des matières | v |
| Liste des sigles et acronymes | vii |
| Liste des figures | viii |
| Liste des tableaux | ix |
| Introduction | 1 |
| CHAPITRE I : Revue bibliographique | 3 |
| 1. Systématique et caractéristiques botaniques de <i>Faidherbia albida</i> (Del.) A. chev | 3 |
| 1.2.2. Variabilité génétique | 6 |
| 1.3. Répartition géographique et exigences écologiques | 6 |
| 1.4. Notion de Parc agroforestier | 8 |
| 1.5. Importance Socio-Economique..... | 8 |
| 1.6. Caractéristiques physiologiques..... | 9 |
| 1.7. Modèles allométriques | 11 |
| CHAPITRE II : Matériel et Méthodes | 17 |
| 2.1. Présentation de la zone d'étude..... | 17 |
| 2.6. Mesure de l'accroissement en circonférence des arbres, en comparant 3 méthodes indépendantes : (i) suivi saisonnier des circonférences ; (ii) inventaires en 2015 et 2019 ; (iii) dendrochronologie | 20 |
| 2.7. Tarifs d'estimation de biomasse aérienne pour <i>F. albida</i> | 24 |
| 2.8. Calcul de l'accroissement annuel de la biomasse | 25 |
| 2.9. Estimation du stock de carbone dans la biomasse aérienne de <i>F. albida</i> et le stockage annuel de C. | 26 |

| | |
|--|-----------|
| CHAPITRE III : Résultats et Discussion | 27 |
| 3.1. Accroissement en circonférence des arbres, en comparant 3 méthodes indépendantes : (i) suivi saisonnier des circonférences ; (ii) inventaires en 2015 et 2019 ; (iii) dendrochronologie | 27 |
| 3.2. Synthèse des 3 méthodes..... | 33 |
| 3.3. Tarifs d'estimation de biomasse aérienne pour F. albida. | 34 |
| 3.4. Estimation du stock de biomasse et de carbone aériens de F. albida et du stockage annuel de C. | 36 |
| Conclusions..... | 39 |
| Références..... | 40 |
| Annexes..... | 44 |
| Annexe 1 : Tutoriel de l'hypsomètre L402 | 44 |
| Annexe 2 : Variabilité interannuelle de la pluviosité dans le terroir de Niakhar, Sénégal. | 46 |
| Annexe 3 : Tab7, 8 : Distribution des classes de diamètres et des fréquences des deux inventaires (2015 et 2019)..... | 47 |

Liste des sigles et acronymes

ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie

BioWooEB : Biomasse, Bois, Energie, Bio-produits

CTFT : Centre Technique Forestier Tropical

CNRF : Centre National de Recherches Forestières

CIRAD Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

CHP : Circonférence à Hauteur de Poitrine

DHP/DBH : Diamètre à Hauteur de Poitrine

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

ISRA Institut Sénégalais de Recherches Agricole

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

GIEC : Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Changement Climatique

GPS : Global Position System

ABSA : Accroissement Biomasse Sèche Aérienne Annuel

AAR : Accroissement Annuel sur le Rayon

ERS : Erreur Résiduelle Standard

AIC : Critère d'information d'Akaike

ENSA : Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie

SIG: Système d'Information Géographique

RAMSES II: Roles of Agroforestry in sustainable intensification of small farMs and food Security for Societies in West Africa

TAGB : Total Above Ground Biomass = biomasse totale aérienne

Liste des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : <i>Faidherbia Albida</i> , planche botanique | 5 |
| Figure 2 : Carte de répartition de <i>Faidherbia albida</i> | 7 |
| Figure 3 : Accroissements dans le bois de <i>F. albida</i> poussant dans différentes stations au Sénégal | 10 |
| Figure 4 : Modèles plausibles (a) ou aberrants (b) proposés dans Beedy et al. (2016) ou cités par Beedy et al. (2016). | 12 |
| Figure 5 : Situation de la zone d'étude SOB (Niakhar, Sénégal) avec le site d'études très instrumenté <i>Faidherbia</i> -Flux | 17 |
| Figure 6 : Image a et b, phase de repérage et de choix des arbres | 21 |
| Figure 7 : Les différentes étapes de la récolte des rondelles | 22 |
| Figure 8 : Portions de rondelles pour étude de cernes de <i>F. albida</i> | 23 |
| Figure 9 : Distribution des classes de diamètres et leur fréquence (Lalou 2015, 2109 arbre). 25 | |
| Figure 10 : Accroissement saisonnier de la circonférence à 1.3m (CHP) de <i>F. albida</i> , sur deux années successives, avec indication de la saison sans feuilles (hivernage 2019) | 28 |
| Figure 11 : a/ Comparaison de méthodes de mesures de diamètre au compas forestier ou au ruban (données de 2019) ; b/ Comparaison des mesures de hauteur en 2015 et en 2019 | 29 |
| Figure 12 : Régression entre CHP observée en 2015 et en 2019 sur les mêmes arbres (N = 189)..... | 30 |
| Figure 13 Profil de croissance (cerne 49)..... | 31 |
| Figure 14 : Profil de densité | 31 |

| | |
|--|----|
| Figure 15 : Régression de la circonférence du cerne en fonction du numéro de cerne (0 = moelle, 1 = premier cerne, etc.) | 32 |
| Figure 16 : Relations entre l'accroissement annuel sur le rayon et a/ la CHP ; b/ le DHP ; c/le nombre de cernes | 34 |
| Figure 17 : Comparaison des modèles d'estimation de la biomasse aérienne totale (TABG) de la littérature disponibles pour <i>Faidherbia albida</i> | 35 |
| Figure 18 : Distribution des classes de diamètres et leur fréquence (inventaire, 2019)..... | 38 |
| Figure 19 : Stockage de carbone par classe de diamètre | 38 |
| Figure 20 : Annexe 2 : Variabilité interannuelle de la pluviosité dans le terroir de Niakhar, Sénégal..... | 46 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Position systématique de <i>F. albida</i> | 3 |
| Tableau 2 : Modèles de prédiction de la biomasse aérienne (kg) de <i>F. albida</i> | 15 |
| Tableau 3 : Modèles de prédiction de la masse sèche totale de toutes les branches du houppier (bois, petites branches et fourrage) d'un arbre (kg arbre-1) de <i>F. albida</i> | 16 |
| Tableau 4 : Données à l'échelle du peuplement..... | 19 |
| Tableau 5 : Comparaison des trois méthodes pour estimer l'accroissement moyen sur le rayon d'un cerne, en fonction de son âge après que la tige ait atteint 130 cm, mesuré (cas de la dendrochronologie) | 33 |
| Tableau 6 : Estimation du stock de biomasse et de carbone aériens de <i>F. albida</i> et du stockage annuel de C | 37 |

Introduction

Le *Faidherbia albida* est un arbre répandu dans toutes les zones sèches de l'Afrique tropicale, et jusqu'au Moyen-Orient. Il possède la particularité de perdre ses feuilles au début de la saison des pluies et d'être feuillé en saison sèche. Ce rythme phénologique inversé fait que sa présence dans les champs ne nuit pas à l'agriculture, voire augmente les rendements dans bien des cas (fertilisation des sols). En outre, il contribue fortement à l'alimentation du bétail en saison sèche (CTFT, 1988).

F. albida joue un rôle important dans les domaines socio-économique, écologique, culturel, agronomique et pastoral pour les populations rurales (Cissé et Koné, 1993 ; Depommier et al., 1993 ; Sowers et Issoufou, 1993 ; Williams, 1993 ; Neuwinger, 2000 ; Dramé Yayé et Berti, 2008 ; Thiombiano et al., 2012 ; Sarr et al., 2013 ; Salissou, 2014). En effet, il protège et améliore les sols, il offre un microclimat favorable, il procure un revenu appréciable aux populations du Sahel, par la vente du bois et de gousses qui constituent un bon fourrage en saison sèche et participe aux rites. Enfin, chaque organe de l'espèce est utilisé efficacement dans la pharmacopée traditionnelle pour le traitement de nombreuses maladies : infections grippales, psychoneuroses, dysenterie... (CTFT, 1988 ; Zerbo et al., 2011).

Les écosystèmes forestiers tropicaux contiennent 40 à 50 % du carbone terrestre dans la biomasse (hors sol) et jouent un rôle majeur dans le cycle global du carbone (Pan et al., 2011). Le carbone est stocké dans la biomasse (biomasse aérienne et biomasse souterraine), la nécromasse (le bois mort, la litière) et la matière organique du sol (GIEC, 2003). Cependant, au Sahel, particulièrement au Sénégal, la connaissance sur la biomasse produite par *F. albida* est très limitée. Pourtant, la biomasse ligneuse renseigne beaucoup sur le fonctionnement, la productivité écologique et économique des agrosystèmes (Breman et Kessler, 1995 ; Kémeuzé et al., 2012). De plus, la biomasse ligneuse, combinée à l'âge renseigne sur le potentiel de séquestration de carbone atmosphérique : on utilisera dans la suite que le stockage de C dans la biomasse aérienne (on ne tiendra pas compte des autres gaz à effet de serre ni des autres compartiments). Ce qui répond ainsi particulièrement à la préoccupation globale d'atténuation des changements climatiques dus à l'émission des gaz à effet de serre, notamment le carbone selon le Groupe Intergouvernemental d'Expert sur le Changement Climatique (GIEC) (2014). En outre, l'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques via l'agroforesterie et les autres pratiques agroécologiques est un axe important du GIEC. Aussi la connaissance du stock et du stockage de C de *F. albida* permettrait

d'améliorer la gestion de l'espèce dans les agrosystèmes pouvant contribuer à la résilience des populations rurales au changement climatique.

Après la localisation et une présentation sommaire de notre site d'étude, la méthodologie utilisée sera décrite. Les résultats de l'étude réalisée sur le terrain et au laboratoire seront ensuite exposés. Enfin, une discussion sur l'intérêt d'une telle approche et une brève conclusion vont clore ce mémoire.

Objectif général :

Quantifier le stock (sur pied) et le stockage (variation de stock) annuel de biomasse et de carbone dans la biomasse aérienne des *Faidherbia albida* du parc agroforestier de Sob (Observatoire de Niakhar, bassin arachidier du Sénégal).

Objectifs spécifiques :

- Mesurer l'accroissement en circonférence des arbres, en comparant 3 méthodes indépendantes : (i) suivi saisonnier des circonférences; (ii) inventaires en 2015 et 2019; (iii) dendrochronologie ;
- Relations entre le numéro de cerne, l'âge, la circonférence et l'accroissement annuel ;
- Sélection de modèle de tarif de cubage à partir de la littérature, selon la concordance avec nos observations de terrain sur place ;
- Spatialisation : calcul de la biomasse aérienne, de l'accroissement annuel, du stock et du stockage annuel de C à l'échelle du territoire de Sob.

CHAPITRE I : Revue bibliographique

1. Systématique et caractéristiques botaniques de *Faidherbia albida* (Del.) A. chev

1.1. Systématique

La première détermination botanique de cette espèce revient à DELILLE (1813) à partir d'un échantillon récolté en Egypte. Il fut nommé *Acacia albida* Del. Légumineuse, Mimosoideae, l'espèce fut classée en 1875 par BENTHAM dans la série des Gummiferae qui est caractérisée par la présence des stipules (C.T.F.T., 1988).

Le genre *Acacia*, est le seul genre de la tribu des *Acacieae*, qui comprend environ 1200 espèces ; et caractérisé par la présence de filets staminaux libres les uns des autres ou unis seulement à la base. Toutefois, cette espèce est très distincte et isolée dans la systématique, sans espèces proches parentes. Pour cette raison, sa classification est très controversée et a donné lieu à de nombreuses études taxonomiques (C.T.F.T., 1988).

BAILLON signale dans sa << Révision des acacias médicinaux >> (1863) que les filets staminaux sont courtement connés à la base, mais il juge que ce critère est insuffisant pour disjoindre l'espèce du genre *Acacia*.

CHEVALIER (1934) propose de l'exclure du genre *Acacia* et de créer un genre mono-spécifique *Faidherbia* même si souvent avec hésitation, d'autres auteurs la maintiennent dans les *Acacias*. Cette nouvelle dénomination a été suivie par un grand nombre d'auteurs : AUBREVILLE (1950), GILBERT et BOUTIQUE (1952). TROCHAIN (1969)' VASSAL (1967), OUINET (1964), NONGONIERMA (1978)' LE HOUEROU (1980)' ROBBERTSE et al. (1980), POLHILL et RAVEN (1981) cité par BRENAN (1983), BOUDET et LEBRUN (1986). Toujours selon la C.T.F.T, cette espèce se sépare assez nettement des *Acacia* et qu'il serait logique de la classer dans un genre mono-spécifique *Faidherbia*. Mark W. Chase et James L. Reveal (2009), avec la classification APG III viennent approuver la création du genre *Faidherbia*.

Tableau 1 : Position systématique de *F. albida*

| Famille | Sous-famille | Tribu | Genre | Espèce |
|-----------------|--------------------|---------------|-------------------|--------------------------|
| <i>Fabaceae</i> | <i>Mimosoideae</i> | <i>Ingeae</i> | <i>Faidherbia</i> | <i>Faidherbia albida</i> |

Nous utiliserons donc la dénomination *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. Cependant, l'espèce à plusieurs synonymes :

- *Acacia albida* Del. (1813)
- *Acacia albida* Bel. var. *senegalensis* Benth. (1842)
- *Acacia saccharata* Benth. (1842)
- *Acacia gyrocarpa* Hochst. ex A. Rich. (1847)
- *Acacia mossambicensis* Bolle (1861)
- *Acacia albida* Del. var. *microfoliata* De Wild. (1925)
- *Acacia albida* Del. var. *variofoliata* De Wild. (1925).

Les noms locaux les plus fréquemment rencontrés dans les écrits des auteurs travaillant en Afrique de l'Ouest sont: gao en langue Haoussa, kad en Wolof, bu bilik en Diola, sas en Sérér, balanzan en Bambara (CTFT., 1988 ; BONKOUNGOU., 1987).

1.2. Caractères botaniques

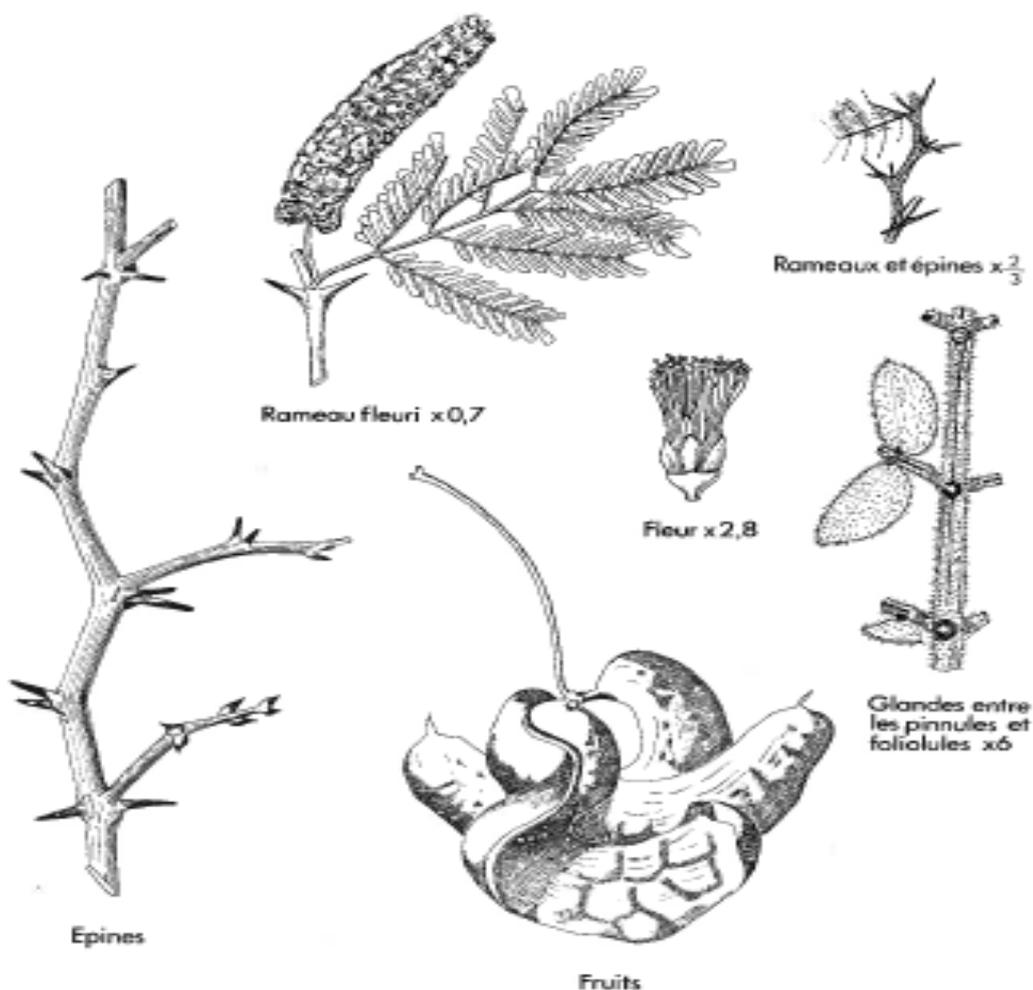
1.2.1. Description

L'arbre est vigoureux, atteignant couramment une hauteur de 15 à 20 m avec une circonférence de tronc de l'ordre du mètre. Il possède la particularité de perdre ses feuilles en début de la saison des pluies et d'être feuillé en saison sèche.

Les feuilles sont composées bipennées, alternes. Les folioles sont de couleur vert bleuté, oblongues, parfois obtusément mucronées, se recouvrant en partie. *Faidherbia albida* a un cycle phénologique inversé en matière de feuillaison. Elle perd ses feuilles en saison pluvieuse et les porte en saison sèche. Les épines sont insérées par paire à la base des feuilles; elles sont d'origine stipulaire selon la C.T.F.T, 1998.

Les inflorescences sont en épis. Les fleurs, sessiles ou avec un pédicelle de 2 mm, sont d'abord blanches, crèmes puis jaunes. La floraison débute vers la septième année d'après la C.T.F.T, (1998).

Figure 1 : *Faidherbia Albida*, planche botanique



- Rameau fleuri et fleurs d'après JH. ROSS: A conspectus of the African acacia species. 1979.
- Epines et fruits d'après J. ADAM, dans Flore forestière soudano-guinéenne de A. AUBRE VIL LE. 1950.
- Rameaux et épines, glandes entre les pinnules et foliolules d'après J. WJL LIAMSON, dans Guide de terrain des ligneux sahéliens et Soudano-guinéenne ? C.GEERLING. 1982.

Selon; DEMBELE (1994), la C.T.F.T(1988) le fruit est une gousse indéhiscente de couleur orange vif à brun orange qui tombe à terre environ trois mois après la floraison. Sa surface, convexe d'un côté, devient concave de l'autre et le mésocarpe, charnu à l'état frais, s'enroule plus ou moins en spirale en se lignifiant, comme des pelures de pomme séchées. Les gousses renferment de 10 à 29 graines brillantes, brun-foncé, séparées les unes des autres par des cloisons épaisses. Les graines sont protégées par une cuticule cireuse imperméable et conservant leur viabilité (en laboratoire) plusieurs années. La figure 1 résume les principaux caractères morphologiques.

1.2.2. Variabilité génétique

Brenan (1983) a attiré l'attention sur la présence en Afrique orientale de deux races géographiques bien caractérisées:

Race A : jeunes rameaux glabres ou presque, de même que l'inflorescence - pédoncule, calice et corolle; folioles ciliolées sur les bords, sinon glabres ou presque, généralement plutôt petites, jusqu'à 6 mm de long et 1,5 mm de large.

Race B : jeunes rameaux pubescents, de même que l'inflorescence - pédoncule, calice, et souvent corolle; folioles pubescentes sur leur surface, souvent plus grandes que dans la race A, jusqu'à 12 mm de long et 4 mm de large.

Aucun nom taxinomique officiel n'a été donné à ces deux races, étant donné qu'on rencontre de trop nombreuses formes intermédiaires dans certaines parties de leurs aires. Ross (1966) déclare: "Les caractères qui définissent chacune des deux races de Brenan ne sont pas forcément corrélatifs, et apparaissent plutôt comme des tendances hétérogènes de telle sorte que, comme le mentionne Brenan, des formes intermédiaires présentant des particularités des deux races sont communes".

1.3. Répartition géographique et exigences écologiques

L'Afrique est la principale aire de distribution de *Faidherbia albida* (figure 2) : au Nord, elle forme un bandeau des côtes occidentales aux côtes orientales de la zone subsaharienne remonte également dans le Sahara, mais uniquement à la faveur des cours d'eau. Elle contourne la zone centrale guinéenne (humide), trouve sa limite australe au Lesotho, remonte le long de la côte atlantique Sud en Namibie et en Angola. Les peuplements les plus importants à l'intérieur du continent se rencontrent dans les pays suivants : Sénégal, Gambie, Mali, Burkina Faso, Tchad, Egypte, Soudan (DEMBELE, 1994).

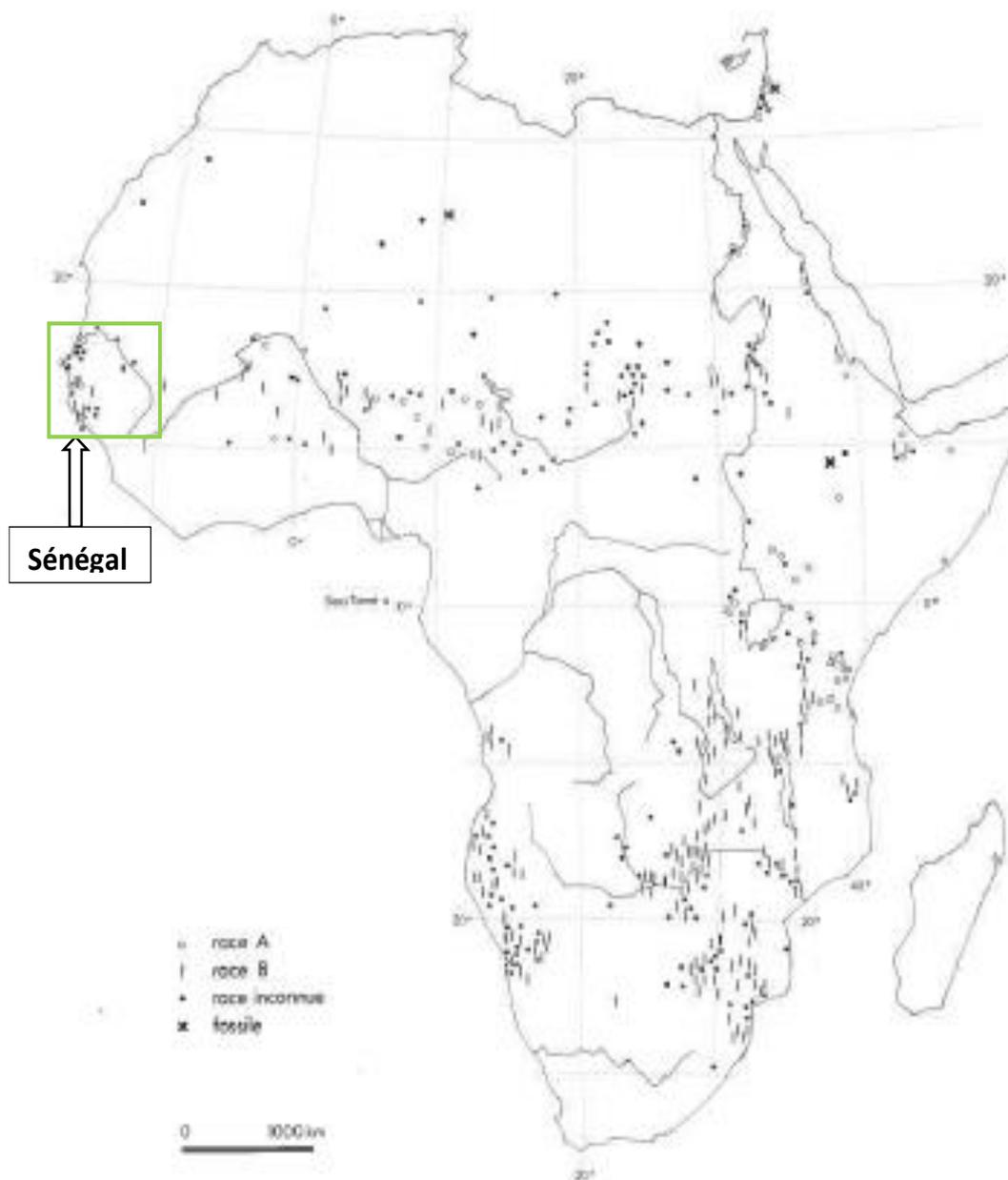


Figure 2 : Carte de répartition de *Faidherbia albida* (d'après Vassal et al., 1977). Les races A et B ont été définies par Brenan (1959).

Au-delà de l'Afrique, *Faidherbia* se rencontre au Moyen Orient dans certains pays de la Méditerranée orientale : Syrie, Liban, Palestine, Jordanie, Yémen, Israël (BONKOUNGOU, 1987). Cette distribution s'accompagne d'une très importante amplitude écologique, en termes de pluviométrie (de 50 à 1500 mm ; Fagg et Bames, 1990). Selon le CTFT (1988), Son optimum écologique se trouve sur les sols sableux profonds, légers entre les isohyètes 500 et 800 mm, aussi bien en Afrique de l'Ouest qu'en Afrique Orientale et Méridionale.

1.4. Notion de Parc agroforestier

Les parcs se caractérisent par une distribution régulière d'arbres ou d'arbustes en faible densité, qui fait que le couvert arboré n'est jamais continu. Selon Pullan (1974), ces parcs sont des paysages façonnés par les activités agricoles de l'homme. Bonkougou *et al.* (1997), désignent comme parcs agroforestiers ce mode singulier et traditionnel d'utilisation des terres dans lequel les végétaux ligneux pérennes sont délibérément conservés en association avec les cultures et/ou l'élevage et où existent à la fois des interactions écologiques et économiques entre les différentes composantes. Ainsi, selon Pelissier (1980), il existe plusieurs types de parcs agroforestiers tels que le parc de type résiduel, le parc de type sélectionné et le parc de type construit. Les arbres privilégiés dans ce système sont conservés en raison de leurs usages multiples : médecine traditionnelle, source de revenus supplémentaire, bois de chauffe et matériaux de construction, amélioration des sols, alimentation humaine, alimentation et protection du bétail.

Au Sénégal, en se basant uniquement sur l'espèce dominante, on peut rencontrer les parcs à *Faidherbia albida*, *Acacia raddiana*, *Cordyla pinnata*, *Adansonia digitata*, *Parkia biglobosa*, *Borassus akeassi*, *Elaeis guineensis*...

Le parc agroforestier à *F. albida* de Sob, traditionnellement entretenu, intervient fortement dans l'équilibre du système de production (Lericollais, 1999).

1.5. Importance Socio-Economique

En Afrique de l'Ouest principalement, *F. albida* a été intégré à l'économie rurale de longue date, et constitue la composante arborée principale de systèmes agro-sylvo-pastoraux appelés "parcs à *Faidherbia*". Cette productivité de contre-saison présente des avantages évidents pour l'économie des populations des zones sèches (Pélissier, 1980 ; Ouedraogo 1994 ; Depommier, 1996 ; CIRAD-Forêt, 1996). Émondé par les pasteurs, *Faidherbia albida* fournit du fourrage de grande qualité nutritionnelle aux troupeaux en période de soudure. En saison humide, *F. albida* est défeuillé complètement ou presque, et la compétition avec les cultures pour la lumière, l'eau, les éléments nutritifs devient minimale. Aux intersaisons (levée des cultures, récolte), cette compétition reste possible, mais elle est peu étudiée (Roupsard, 1997). En outre, les cultivateurs lui reconnaissent communément un effet améliorant du rendement de certaines cultures, en particulier céréalières. On parle des "effets *Faidherbia*", dont l'origine est certainement complexe : comme la plupart des arbres, *F. albida* pourrait freiner l'érosion et la perte des éléments nutritifs, améliorer les propriétés physiques du sol, la fraction organique et la fertilité au sens large (Charreau et Vidal, 1965). Plus spécifiquement,

il faut envisager un effet de concentration des déjections des troupeaux et de l'avifaune en saison sèche (faune attirée par l'ombrage, les insectes, etc.), et la fixation symbiotique de l'azote (Roupsard, 1997). *F. albida* est aussi apprécié par son bois facile à travailler, comme bois de chauffe ou facilement carbonisée. Il est utilisé pour d'autres usages aussi comme le fourrage (par la valeur nutritionnelle des feuilles et des fruits), la pharmacopée traditionnelle, le pollen et le nectar par les abeilles pour la production du miel (Barnes et Fagg, 2003; FAO, 2010; Spevacek, 2011; Cisse et Kone, 1992; Goda, 1992; Fagg, 1995)

1.6. Caractéristiques physiologiques

1.6.1. Densité de bois de *Faidherbia albida*

Le bois est un bois de feuillus de poids moyen. A une teneur en eau de 12%, la densité est de 580 – 710 kg/m³ selon PROTA (1934). Orwa et al., 2009 proposent la fourchette 560 – 710 kg/m³.

1.6.2. Croissance et dendrochronologie du *Faidherbia albida*

A première vue, les avis semblent contradictoires à propos de la croissance de cette essence : certains affirment que le *F. albida* pousse très lentement et d'autres que c'est le genre d'Acacia qui pousse le plus vite. Selon le CTFT, (1988) les deux opinions sont exactes car la variabilité génétique de l'espèce est très importante. En effet, il a souvent été fait mention du fait que pour une même provenance, dans des conditions de milieu identiques, la croissance initiale des plants est très irrégulière : certains plants démarrant rapidement, alors que d'autres stagnent pendant quelques années.

Des mesures fines sur les cernes de croissance ont été effectuées au Sénégal pour suivre l'accroissement du diamètre tout au long de l'année. Pour cela, six *Faidherbia albida* (2 à Hann, 2 à Bambey, 2 à Diourbel) ont été munis d'un ruban dendromètre. Les lectures ont été faites tous les quinze jours pendant trois ans (1966 à 1968) et ont permis de constater que l'accroissement varie considérablement d'un endroit à l'autre : de l'ordre de 0.42 cm/an sur le rayon dans le cas de dunes stériles (Hann) et 1.3 cm/an sur le rayon pour le cas de sols de culture à Thiès (figure 3). Notons que la croissance radiale triple ici quand le sol est fertile, hypothèse la plus probable. Ces mesures ont également permis de constater que la croissance est continue sauf durant la saison des pluies où l'arrêt de l'accroissement est total puisque les arbres sont défeuillés (CTFT, 1988).

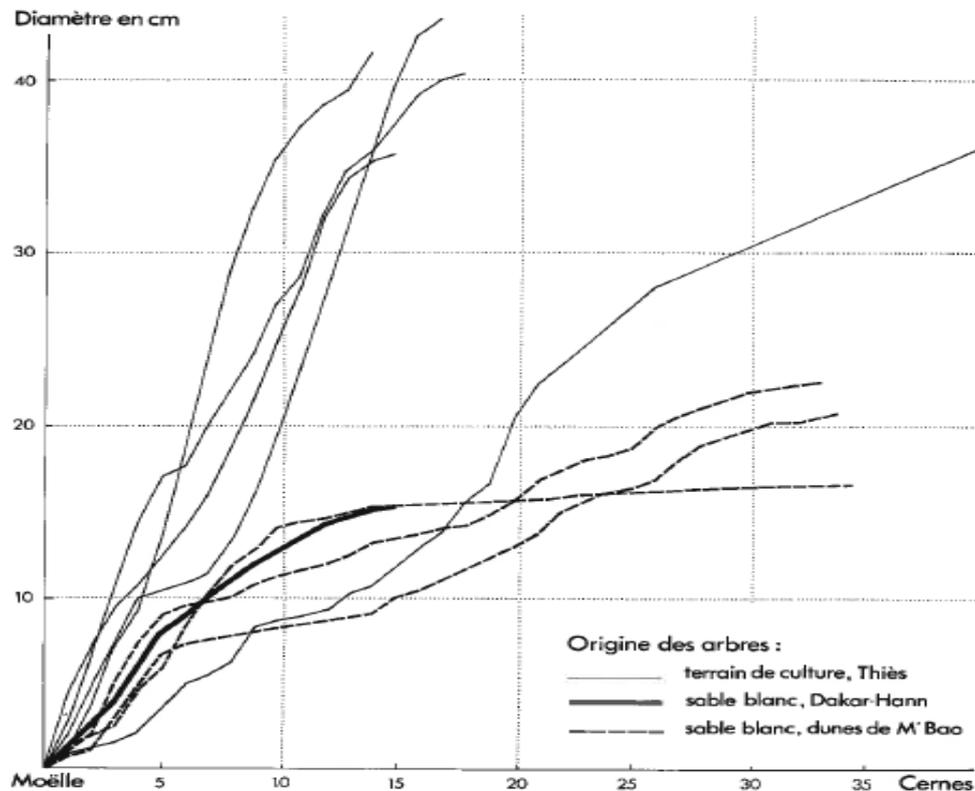


Figure 3 : Accroissements dans le bois de *F. albida* poussant dans différentes stations au Sénégal (d'après Mariaux. A., 1966).

La dendrochronologie est une science qui **repose sur la mesure des largeurs des cernes annuels de croissance et sur leur datation précise**. A l'heure actuelle, sous le terme dendrochronologie sont regroupées toutes les disciplines qui utilisent directement ou indirectement l'information « date » contenue dans une série chronologique de cernes (F. Lebourgeois, P. Mérian, 2012).

Les principales évaluations qui font référence dans ce domaine ont été réalisées par A. MARIAUX (1984, 1966, et 1979, cité par CTFT, 1988) par des marquages et prélèvements de cambium, des interprétations de cernes sur rondelles et des mesures sur ruban dendrométriques. Les observations et résultats enregistrés ont montré qu'il existe une forte probabilité d'assimiler un cerne à une année. I. D. GOULAY (1990, cité par CTFT, 1988), observant des rondelles de *F. albida* d'âge connu, a pu déterminer la correspondance entre cernes et années par la présence de cristaux de calcium rhomboïques en longues chaînes dans les cellules de parenchyme terminal.

Neuf rondelles prélevées sur des arbres récoltés dans diverses stations du Sénégal ont été analysées par le laboratoire d'anatomie du C.T.F.T. Sur ces rondelles, les auteurs ont observé des cernes dont la largeur variait de moins de 1 mm à plus de 20 mm. La croissance était tout à fait remarquable chez les sujets poussant sur terrains de culture mais par contre beaucoup plus lente pour les arbres provenant de dunes stériles (ralentissement très important de la croissance lorsque le diamètre atteint 10 à 15 cm (CTFT, 1988).

1.7. Modèles allométriques

La modélisation est par définition, un processus qui réduit une réalité ambiguë en un système de relations bien agencé afin d'atteindre un but bien précis (Bouchon, 1995). Le modèle est une représentation simplifiée de certains aspects de la réalité. Il est constitué d'un système d'équation qui permet de suivre le comportement de certaines caractéristiques dans le temps.

C'est ainsi qu'il demeure important d'élaborer des équations allométriques qui, à partir d'une simple mesure des paramètres dendrométriques, permettront d'estimer la biomasse de cette espèce dans les agrosystèmes. L'approche est basée sur des équations allométriques qui permettent d'estimer directement la biomasse totale ou partielle (biomasse aérienne, biomasse souterraine, etc.) d'un arbre en fonction de prédicteurs. Les prédicteurs les plus importants de la biomasse sont, par ordre décroissant : le diamètre du tronc, la densité du bois et la hauteur totale (Chave et al., 2005).

Il existe plusieurs publications relatives aux tarifs de cubage (modèles allométriques pour l'estimation du volume, de la densité et de la masse de bois des arbres) de *Faidherbia*. Malheureusement, certaines équations de Beedy et al. 2016 ont été corrompues au moment de l'édition des articles et s'avèrent inutilisables. Nous avons dû enquêter longuement auprès des auteurs pour les rectifier.

a/ Beedy et al. (2016), pour l'estimation de la biomasse aérienne (DHP du tronc) des *F. albida* et du carbone dans les parcelles mixtes maïs / arbres par des moyens non destructifs, ont mis au point des équations allométriques à partir de variables aisément mesurables, telles que le diamètre à hauteur de poitrine, la surface projetée de couronne la hauteur des arbres. Dans cette étude réalisée au Malawi, les *F. albida* ont été caractérisés dans des plantations en blocs et dans des parcs en régénération naturelle sur six sites, mais pour comparaison ici, on n'a retenu que les équations développées en parc. Des équations allométriques ont été développées pour les régimes de gestion des plantations : $y = -1.23 + 2.26 \times \ln x$ (équation1) avec y = biomasse aérienne sèche ; x = DHP et des parcs : $y = -1.62 + 0.702 \times \ln x^2 \times Sh$ (équation2), $y = -2.68 + 2.5 \times \ln x$ (équation3), avec y = biomasse aérienne

sèche ; Sh = surface houppier ; x = DHP. Néanmoins, ces équations nous sont apparues erronées. L'équation (2) de l'article qui vaut pour les *Faidherbia* en parcs ne permet pas de passer entre les points des figures de l'article (Fig. 4b). Nous l'avons corrigée et réajustée. Après vérification, correction des équations de cet article pour les arbres en parc, les équations plausibles retenues sont les suivantes.

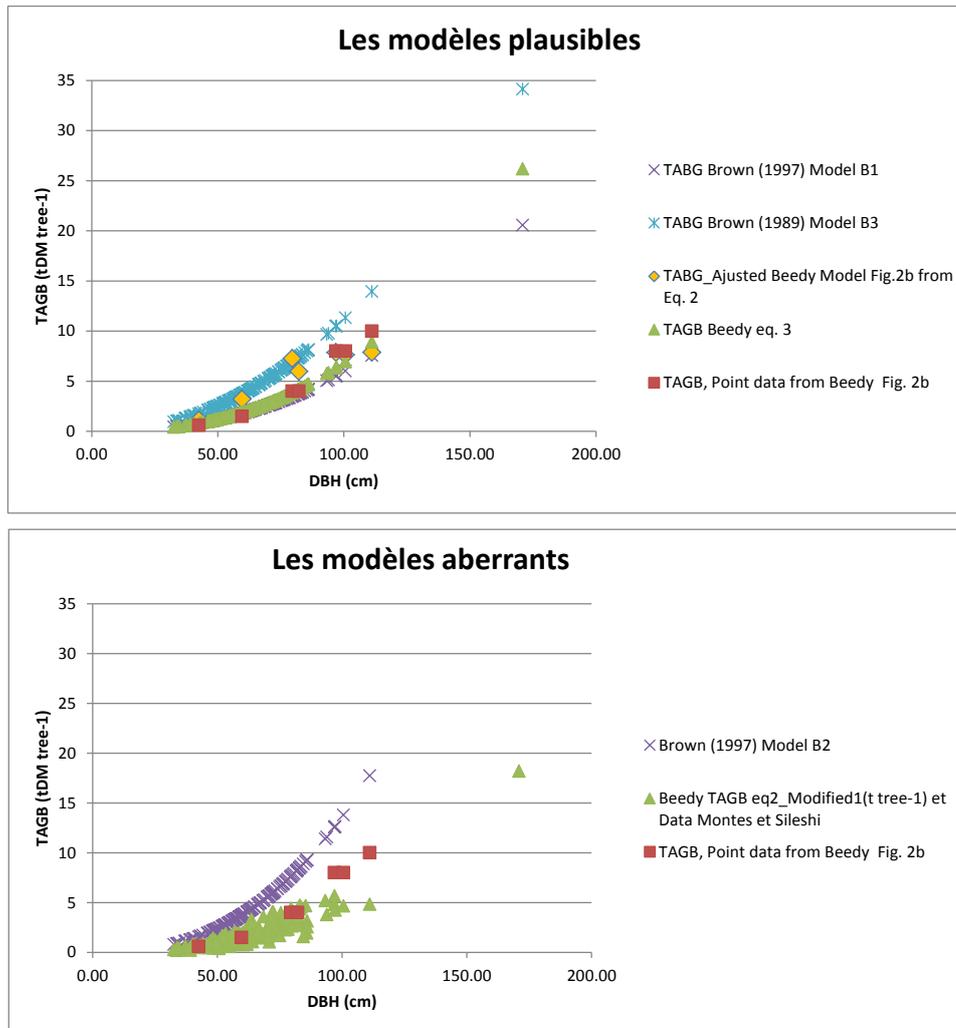


Figure 4 : Modèles plausibles (a) ou aberrants (b) proposés dans Beedy et al. (2016) ou cités par Beedy et al. (2016). Les points rouges sont les mesures de terrain de Beedy et al. (2016), numérisés à partir de leur figure 2b et servent de référence pour déterminer si les modèles sont plausibles ou aberrants. TAGB : Total Above Ground Biomass = biomasse totale aérienne.

a)* Eq3 originale, utilisant DHP uniquement

* Eq2 modifiée. $\ln(\text{Total Above Ground Biomass}) = 0.0 + 0.62 * \ln(\text{DHP}^2 * \text{CrA})$.

* Brown (1997) B1: il s'agit d'un modèle généralisé

* Brown (1989) B3: c'est un modèle généralisé, il surestime bien sûr *Faidherbia* mais il est plausible.

b) Les deux modèles présentés donnent des estimations trop éloignées des données pour pouvoir être crédibles.

b/ Laminou Manzo et al (2015) dans l'étude conduite dans la zone sahélienne à Aguié (Niger) et dont l'objectif était d'élaborer des modèles allométriques d'estimation de la biomasse aérienne (DHP du tronc) de *Faidherbia albida* dans les agrosystèmes, ont testé deux types de modèle : le modèle puissance $y = ax^b$ (équation1) et les modèles polynomiaux $y = a + bx + cx^2$ (équation2) et $y = a + bx + cx^2 + dx^3$ (équation 3) avec y la biomasse aérienne totale ; x le paramètre dendrométrique et a, b, c et d les coefficients des équations. Les critères de sélection et de validité des modèles sont basés d'abord sur les tests de normalité, nullité, hétérogénéité et autocorrélation des résidus. Ensuite est effectuée l'analyse des erreurs notamment l'erreur résiduelle, l'erreur résiduelle standard (ERS) et le critère d'information d'Akaike (AIC). Dans la partie résultats, on montrera que le modèle puissance, avec l'équation $y = 0.112x^{2.2335}$ (E1), semble le mieux indiqué pour l'estimation de la biomasse aérienne (y) de cette espèce dans nos conditions locales. Dans la littérature, le modèle puissance qui exprime la biomasse en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (130cm) est le plus communément utilisé (Zianis et Mencuccini, 2004 ; Sileshi, 2014).

c/ Rodriguez (2016), pour quantifier le stock et la production (après la taille) de biomasse de branches de *Faidherbia albida* exploité dans les systèmes agroforestiers sur le site-observatoire de Niakhar, mais pour les branches seulement. Les modèles allométriques qui ont été sélectionnés pour estimer le stock de biomasse et la production annuelle sont non linéaires et sont de la forme $y = ax^b$ (équation 74, pour quantifier la biomasse totale) et $y = ax_1^b \times x_2^c$ (équation 104, pour quantifier la biomasse foliaire) avec y = biomasse aérienne sèche ; x_1 = DHP ; x_2 = hauteur arbre ; a, b, et c les coefficients des équations. Les modèles choisis présentent une erreur résiduelle standard (ERS) plus faible. Les valeurs d'AIC et R^2 ont été prises en compte.

d/ Henry et al. (2011) dans Estimation de la biomasse forestière des forêts d'Afrique subsaharienne (ASS) : examen des équations allométriques disponibles dont les objectifs étaient de réaliser une étude des équations allométriques qui pourraient être utilisées pour l'estimation des stocks de biomasse et de carbone en ASS ; analyser la pertinence d'utiliser

des équations allométriques déjà existantes pour estimer les stocks de biomasse d'arbres et de carbone par rapport aux équations allométriques généralisées. Nous avons utilisé l'équation 1(E1) dont le paramètre dendrométrique est CHP qu'on a convertis en DHP. Ce qui donne comme équation : $y = x(a) \times 10^{-b}$ avec y = la biomasse aérienne de l'arbre ; x = DHP ; a et b les coefficients de l'équation.

Dans le cadre de notre mémoire, l'un des objectifs est de comparer ces équations allométriques de la littérature (tableau 2 et 3) avec nos propres mesures de volume, densité et biomasse réalisées sur 3 arbres tombés naturellement et presque intacts. Une fois sélectionnée l'équation de la littérature la plus appropriée à notre site d'étude, elle nous permettra d'estimer et de cartographier la biomasse, le stock et le stockage annuel de carbone de F. albida dans le parc.

Tableau 2 : Modèles de prédiction de la biomasse aérienne (kg) de *F. albida*

| (NUMERO EQUATION) ET SOURCE | EQUATION ALLOMETRIQUE | x | a | b | c | d | R ² | ERS | AIC | Gamme DHP (cm) |
|-----------------------------|--|----------|--------------|-------------|--------|--------|----------------|---------------|-------------|----------------|
| 1 (L. Manzo) | ax^b | DHP (cm) | 0,112 | 2,23 | | | 0,94 | 0,0443 | 2,47 | 7.3-36.6 |
| 2 (L. Manzo) | $a + bx + cx^2$ | DHP (cm) | 0,2866 | -1,07 | 0,4512 | | 0,96 | 0,428 | 123,55 | idem |
| 3 (L. Manzo) | $a + bx + cx^2 + dx^3$ | DHP (cm) | -0,0057 | 0,66 | -8,368 | 42,091 | 0,96 | 0,2967 | 125,16 | idem |
| | | | | | | | | | | |
| 2 (Beedy) | $a + b \times \text{Ln}(x)^2 \times S_h$ | DHP (cm) | -1.62 | 0.702 | | | 0.9764 | | -99.1 | 5 - 116 |
| 3 (Beedy) | $a + b \times \text{Ln}(x)$ | DHP (cm) | -2.68 | 2.5 | | | 0.9811 | | -107.5 | idem |
| | | | | | | | | | | |
| Henry et al | $x(a) \times 10^{-b}$ | DHP (cm) | 2,08 | -3 | | | | | | 10 - 200 |

S_h : surface houppier (m²); R² : coefficient de détermination ; ERS : erreur résiduelle standard ; AIC : critère d'information d' Akaike et a, b, c et d des coefficients.

Tableau 3 : Modèles de prédiction de la masse sèche totale de toutes les branches du houppier (bois, petites branches et fourrage) d'un arbre (kg arbre-1) de *F. albida*

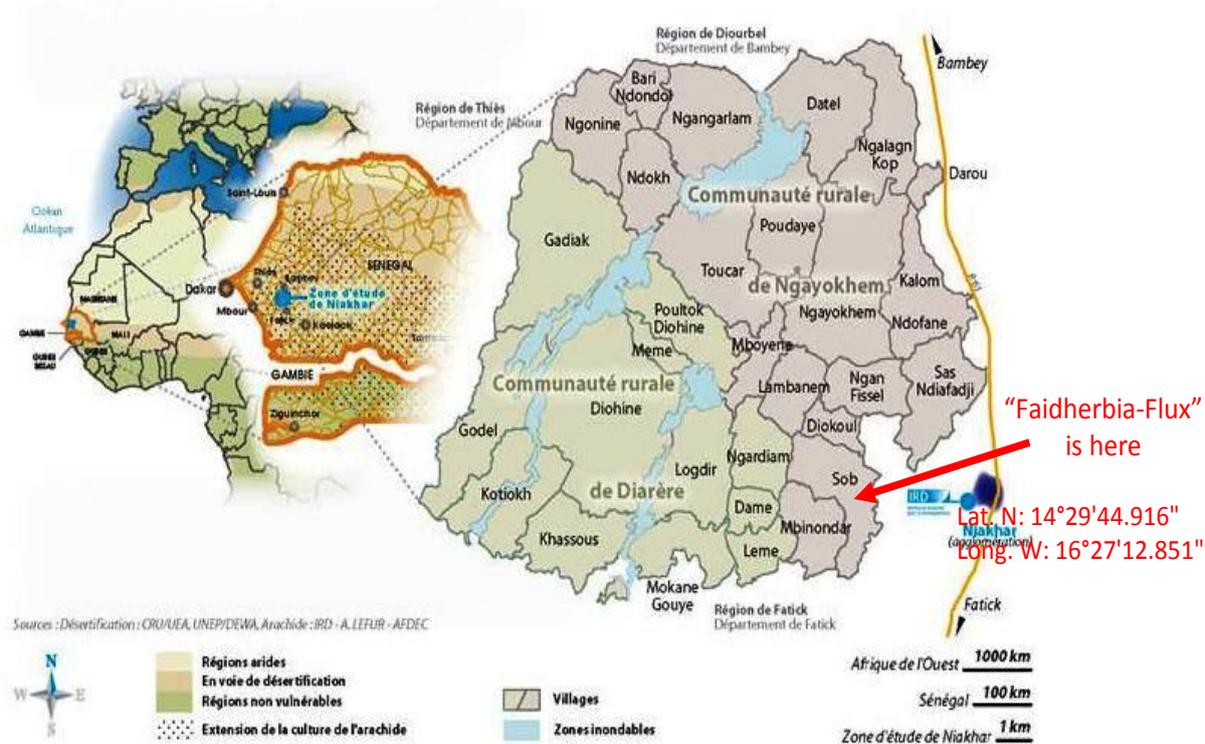
| (Numéro équation) et Source | Equation allométrique | X ₁ | X ₂ | a | b | c | R ² | ERS | AIC |
|-----------------------------|-----------------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|----------------|------|-----|
| 74 (Rodriguez) | ax^b | DHP (cm) | | 3.397 | 1,177 | | 0,76 | 204 | 502 |
| 76(Rodriguez) | ax^b | DHP (cm) | | 2.309 | 1.201 | | 0.83 | 167 | 488 |
| 104(Rodriguez) | $ax_1^b \times x_2^c$ | DHP (cm) | H _t | 0.718 | 0.858 | 0.602 | 0.51 | 28.3 | 471 |

Mst : masse sèche totale (kg) ; R² : coefficient de détermination ; ERS : erreur résiduelle standard ; AIC : critère d'information d'Akaike et a, b, c et d des coefficients.

CHAPITRE II : Matériel et Méthodes

2.1. Présentation de la zone d'étude

Cette étude a été menée dans le village de Sob ($14^{\circ}29'44.916''$ N et $16^{\circ}27'12.851''$ O), situé à 150 km à l'Est de Dakar capitale du Sénégal, dans le département de Fatick, arrondissement de Niakhar, au cœur du bassin arachidier.



(*) <https://ped.info/wikiObsSN/>

Figure 5 : Situation de la zone d'étude Sob (Niakhar, Sénégal) avec le site d'études très instrumenté Faidherbia-Flux

2.2. Données humaines

Le site Observatoire Population Santé Environnement (OPSE) de Niakhar comprend actuellement 30 villages regroupant environ 47 000 habitants en 2017 (Delaunay et al., 2018). La population des trente villages de l'observatoire a presque doublé en 40 ans. La densité qui était de l'ordre de 100 habitants/km² dans les années 1960-70 est passée à plus de 200 habitants/km² dans les années 2010 (IRD, 2018).

2.3. Aspects socio-économiques

2.3.1. Ethnie et Religion

L'ethnie principale est Sereer avec 96.7% de la population. Les autres ethnies représentées sont les Wolofs 1,2 %, les Toucouleurs 1 % et les Laobés 0,6 %. Les 0,4 % restants sont répartis en diverses ethnies (Peul, Maure, Socé, Diola).

La population est profondément enracinée dans les traditions familiales. Cependant l'islam est la religion majoritaire avec 77.3% de musulmans et 19,6% de Chrétiens. Les rites traditionnels sont cependant observés par l'ensemble de la population (Delaunay et al., 2013).

2.3.2. Activités agricoles

Les cultures principales sont le mil et l'arachide mais la crise agricole et la pression démographique ont conduit à d'autres activités comme la production de viande ou les migrations vers les zones urbaines (Delaunay et al. 2013).

2.4. Données physiques

2.4.1. Climat

Le climat est soudano-sahélien, avec une saison humide de juin à octobre, suivie d'une saison sèche de huit mois. Selon Lalou et al. (2019), les précipitations sont passées de 900 à 400 mm entre 1950 et 1995 (la période la plus sèche), puis se sont partiellement rétablies à 500 mm en 2015. La répartition saisonnière a changé au cours de cette période de récupération : moins de pluie tombe maintenant au début de la saison des pluies, et plus à la fin.

La température moyenne mensuelle est de 24°C en décembre-janvier et de 30°C pour les mois les plus chauds (mai-juin) (Chippaux, 2001).

Les principaux vents qui balayent la zone sont : l'harmattan, chaud et sec, qui souffle du Nord et Nord-Est en saison sèche ; et la mousson (saison des pluies) entre Avril et Octobre. Lors des dix dernières années, la moyenne mensuelle minimale du taux hygrométrique observé dans la région est sensiblement égale à 31%, tandis que la moyenne mensuelle maximale est de 80% (ANSD, 2015).

2.4.2. Le relief et le sol

Le relief est plat dans son ensemble avec quelques zones dépressionnaires constituant les berges, marigots et mares.

Les ressources pédologiques font état de 2 à 3 types de sol formés principalement sur des sédiments sableux ou sablo-argileux d'origine éolienne et alluviale (ISRA, cité dans SANOGO 2000) :

- ❖ Les sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés sur les plateaux, généralement sableux appelés sols « Dior », pauvres en matière organique. Ils représentent 80 % environ des terres de la zone et sont souvent aptes à la culture de l'arachide, du niébé, du manioc, de Pastèque et du bissap.
- ❖ Les sols bruns hydromorphes sablo-argileux, appelés « Deck » qui sont localisés au niveau des vallées et des bas-fonds relativement riches en matière organique et en argiles. Ils couvrent environ 15 % des terres et sont propices à la culture du sorgho, au maraîchage et à l'arboriculture fruitière.
- ❖ Les sols halomorphes à structure non dégradée, salins, acidifiés, « tanne ».

2.4.3. Végétation

Niakhar situé au cœur du Bassin Arachidier, et selon Lalou et al. (2015), la végétation se caractérise par la prédominance de *Faidherbia albida* (Kad), *Balanites aegyptiaca* (Model), *Ziziphus mauritiana* (Ngic) et *Adansonia digitata* (Bak), *Tamarindus indica* (Sob/Ndahar), à l'approche et autour des villages. On a aussi *Acacia microstachya* (Sim) *Acacia nilotica* (Nenef) *Acacia seyal* (Surur), *Acacia sieberiana* (Sul), *Anogeissus leiocarpus* (Ngogil), *Azadirachtas indica* (Nim), *Bauhinia rufescens* (Ngambayargin), *Cassia cieberiana* (Selumg), *Celtis integrifolia* (Ngan), *Ceiba pentandra* (Mbuday), *Calotropis procera* (Mbodafod), *Cordia senegalensis* (Sub), *Cordyla pinnata* (Nar), *Detarium senegalensis* (Ndooy), *Diospyros mespiliformis* (Alôm), *Ficus gnafalocarpa* (Ndun), *Ficus iteophylla* (Mbeden), *ficus plalyphlla* (Mbadat), *Mitragyna inermis* (Ngaul), *Morus mesozigia* (Sand), *Parkia biglobosa* (Sew), *Piliostigma reticulata* (Ngayox), *Pterocarpus erinaceus* (Ban), *Sclerocarya birrea* (Aric), *Spathodea campanulata* (Mamb), *Gardenia ternifolia* (Mbos), *Grewia bicolor* (Ngel), *Borassus ethiopium* (Coni).

2.5. Données d'inventaire de 2015 (Lalou et al., 2015)

Tableau 4 : Données à l'échelle du peuplement

| Nbre arbres | Nbre F. alb | Surface (ha) | Nbre jeunes | Nbre adultes | Densit F. alb (arbr/ha) |
|-------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------------------|
| 3643 | 3289 | 499.6 | 1357 (2.46) | 1932 (3.9) | 6.36 |

Une dynamique en faveur d'une augmentation des jeunes individus déjà observée sur la période 1965-2006 se poursuit puisque la densité des jeunes a doublé en 10 ans. La densité totale des *F. albida* reste donc assez faible (6,36 arbres/ha) mais en nette augmentation.

2.6. Mesure de l'accroissement en circonférence des arbres, en comparant 3 méthodes indépendantes : (i) suivi saisonnier des circonférences ; (ii) inventaires en 2015 et 2019 ; (iii) dendrochronologie

2.6.1. Méthode 1 : Accroissement saisonnier de la circonférence à 1.3m du sol

Cette méthode consiste à faire des mesures de circonférences à 1.3 m de hauteur sur 12 arbres choisis dans la parcelle principale de *Faidherbia-Flux*, tous les 10 jours. On a utilisé un fil de nylon (non élastique) pour faire le tour du tronc le long d'une ligne dessinée au marqueur indélébile au premier passage, puis mesuré la circonférence au ruban mètre avec une précision de 1mm. Pour chaque arbre et à chaque date de passage, nous avons toujours fait deux mesures successives et seule la moyenne de ces deux mesures est retenue. Ces mesures ont été réalisées sur une durée de plus d'un an.

2.6.2. Méthode 2 : Accroissement sur 4 ans de la circonférence à 1.3m observée, via deux inventaires successifs (2015 et 2019) sur 189 arbres adultes

Pour l'inventaire, une méthode non destructive des arbres de *F. albida* a été adoptée. Les données d'inventaire disponibles sur le parc agroforestier, de Lalou et al. (2015) (1932 arbres adultes, 1357 juvéniles soit 3162 arbres au total), ont été consultées pour répéter le même inventaire avec les mêmes méthodes en 2019, mais un sous-échantillon d'arbres. Cent quatre-vingt-neuf (189) arbres prioritaires ont ainsi été mesurés deux fois, en 2015 puis en 2019, soit un sous-échantillon défini comme prioritaire par N. Montes après la campagne 2015 pour ses travaux sur les formes d'arbres (tests sur la validité d'un modèle architectural pour l'estimation non destructive de la biomasse des arbres appelé PAI (Pan Architectural Index), un indice qu'il a construit (en cours de publication) pour essayer de tenir compte de la complexité architecturale des arbres dans l'estimation de leur volume et donc de leur biomasse). Le mois choisi pour les mesures était juillet dans les deux cas, ce qui correspond en théorie à l'arrêt de croissance pour *Faidherbia*. Pour retrouver ces 189 arbres sur le terrain, on a utilisé des outils comme QGIS pour confection de carte, Google Earth pour le repérage spatial, le GPS et finalement des photos horizontales de ces arbres prises en 2015 pour confirmation terrain en 2019.

Les mesures suivantes ont été effectuées sur 189 arbres adultes sur pied :

- La circonférence à la base du tronc et à hauteur de poitrine (CHP, transformable en DHP) (à 1,30 m du sol) avec un fil nylon ;
- La hauteur totale (H_t) de l'arbre avec un hypsomètre L402 laser (voir annexe), le même appareil en 2015 et en 2019 ;
- Les deux diamètres croisés du houppier (d_1 et d_2) avec un décimètre. Assimilé à un disque, le diamètre moyen du houppier (D_h) a été calculé pour avoir la surface du houppier (S_h m²) :

$$\text{Equation 1 : } S_h = \pi \times (D_h / 2)^2$$

2.6.3. Méthode 3 : Accroissement annuel des cernes par dendrochronologie

Pour l'analyse anatomique des cernes (position, limite, numéro et/ou âge et microdensité), des rondelles ont été récoltées durant le mois de mars 2019 sur des arbres morts naturellement et récemment (en 2018), dans différents villages de l'Observatoire de Niakhar. Nous avons commencé par un repérage de tous les arbres morts, ces derniers ont été localisés au GPS et photographiés (figure 6 : a, b).



Figures 6 : Image a et b, phase de repérage et de choix des arbres

Une sélection des meilleurs arbres a été faite, 10 ont été retenus sur lesquels les rondelles ont été prélevées. Pour chaque arbre, nous avons coupé la rondelle à une hauteur de 130cm de la base du tronc. La tronçonneuse a été maniée par le Dr. Cheick O. Samb (CNRF), afin d'obtenir des rondelles d'une épaisseur de 8 cm environ. L'opération pour récupérer ces 10 rondelles a pris 4 jours en tout, en raison surtout du mauvais état général de la tronçonneuse et des réparations nécessaires. Pour cette raison, il n'a pas été possible de découper les arbres en rondins pour procéder à la pesée, comme nous l'avions envisagé initialement.



Figure 7 : Les différentes étapes de la récolte des rondelles

Pour alléger l'envoi en France, des barreaux ont été prélevés sur les rondelles. Deux bandes diamétrales (passant par le cœur) orthogonales de 5 cm de large, suivant la figure ci-dessous ont été découpées en menuiserie par Dr. Muriel Navarro.

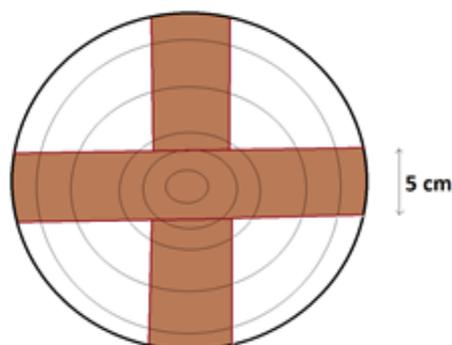


Figure 8 : Prélèvement de barreaux (en brun) au sein des rondelles pour étude de cernes de *F. albida*

La suite des opérations a été réalisée à Montpellier (au laboratoire d'anatomie de BioWooEB du CIRAD) et Nancy (Laboratoire de qualité, INRA Champenoux), dans le cadre de la thèse de doctorat de Dao Dougabka (BioWooEB).

Mesures microdensitométriques (résultats de thèse de Dao Dougabka)

L'analyse microdensitométrique a été réalisée selon la méthodologie décrite par Polge et Nicholls (1972). Deux barrettes radiales de 2 mm d'épaisseur longitudinale ont été sciées dans chaque barreau diamétral à l'aide de scies fraises jumelées (Perrin et Ferrand 1984) puis stabilisées à une humidité d'environ 11 % dans un local fermé.

Les éprouvettes ont ensuite été exposées à un rayonnement X (tube Hamamatsu L9181-02 réglé à 40 kV et 300 μ A) pendant 15 secondes. Les images radiographiques ont été enregistrées par un détecteur plan (Varian Paxscan 4030R, surface de 3200 x 2304 pixels, 127 μ / pixel) avec un grossissement permettant d'obtenir une résolution finale de 70 à 80 μ / pixel. Les niveaux de gris obtenus sur ces images dépendent en première approximation de la quantité de matière traversée par le rayonnement X, donc du produit de la densité par l'épaisseur. L'épaisseur de chaque éprouvette a été mesurée au pied à coulisse. La calibration en densité du bois a ensuite été effectuée à l'aide d'une cale présentant des paliers d'épaisseurs fixe et une rampe d'épaisseur variable, usinée dans un matériau homogène de composition

atomique proche du bois (kemetal). La calibration spatiale a été effectuée avec la même éprouvette dont les dimensions sont connues.

L'image de chaque éprouvette a ensuite été analysée avec le programme Cerd (Mothe et al 1998) permettant de pointer manuellement les limites de cerne lorsque des marqueurs de croissance secondaire étaient visibles et d'enregistrer un profil radial de densité (moyenne sur une hauteur de 5 mm) au centre de chaque éprouvette.

Dans le cadre de notre mémoire *sensu stricto*, nous avons utilisé les profils de largeur de cerne et la densitométrie moyenne fournis par Dao Dougabka.

2.7. Tarifs d'estimation de biomasse aérienne pour *F. albida*.

Un tarif de biomasse, c'est-à-dire une équation reliant la biomasse sèche totale à une variable facilement mesurable comme le diamètre, a été construite à partir des données de 3 arbres, choisis comme étant les meilleurs (les plus complets pour troncs et branches) parmi nos 10 arbres choisis pour prélever des rondelles. Ces trois arbres ont été marqués en tronçons d'un mètre de long chacun environ (valable pour les troncs et les branches)

Le volume ($V : m^3$) de chaque tronçon (billes ou branches) a été calculé avec la formule :

$$\text{Equation 2 : } V = \pi R^2 \times L$$

Avec : L = longueur du tronçon (m) ; R = rayon moyen du tronçon (m)

Le volume total de chaque arbre était la somme des volumes de tous ses tronçons.

Nous avons calculé la biomasse sèche aérienne (BSA, t) du bois de chaque arbre en multipliant le volume par la densité du bois. La densité du bois moyenne rapportée par l'expérience de microdensitométrie (source Dao Dougabka) est de 0.568, proche des valeurs de la littérature (PROTA (1934) ; Orwa et al., 2009), c'est cette valeur que nous avons retenue pour nos calculs.

$$\text{Equation 3 : } BSA = V \times 0.568$$

Avec : V (volume arbre, m^3) ; 0.568 (densité bois de *F. albida*, $t m^{-3}$)

Puis nous avons comparé nos valeurs de volume et biomasse mesurés sur 3 arbres de Niakhar aux valeurs des modèles de la littérature globale, éventuellement dans d'autres pays avec d'autres variétés de *Faidherbia* (figure 17, Tableau 2) qui ont utilisé les mêmes paramètres dendrométriques (DHP) pour l'estimation de la BSA, ceci afin de déterminer lequel de ces modèles serait le plus pertinent pour notre localité.

2.8. Calcul de l'accroissement annuel de la biomasse

Pour cette partie, nous avons utilisé l'approche basée sur l'équation allométrique de Laminou Manzo et al. (2015) que nous avons sélectionnée pour estimer la biomasse totale aérienne (TAGB : total above-ground biomass) d'un *Faidherbia* en fonction du prédicteur (DHP). Ensuite nous avons calculé l'accroissement annuel de la biomasse sèche aérienne (ABSA) de bois par arbre comme suit, en utilisant la différence entre deux diamètres de l'année courante et suivante avec la formule de l'équation de Laminou Manzo # 1 du tableau 2 :

$$\text{Equation 4 : } \text{ABSA} = (0.112 \times (\text{DHP} + \text{AAD})^{2.233} - 0.112 \times (\text{DHP})^{2.233})/1000$$

Avec DHP = diamètre à 130 cm du sol ; AAD = Accroissement Annuel sur le Diamètre.

Enfin l'accroissement annuel de la biomasse aérienne de Sob (ABA_{Sob}), a été calculé en multipliant l'ABSA de chaque classe de DHP par le nombre d'individus dans chacune de ses classes (Fig.9).

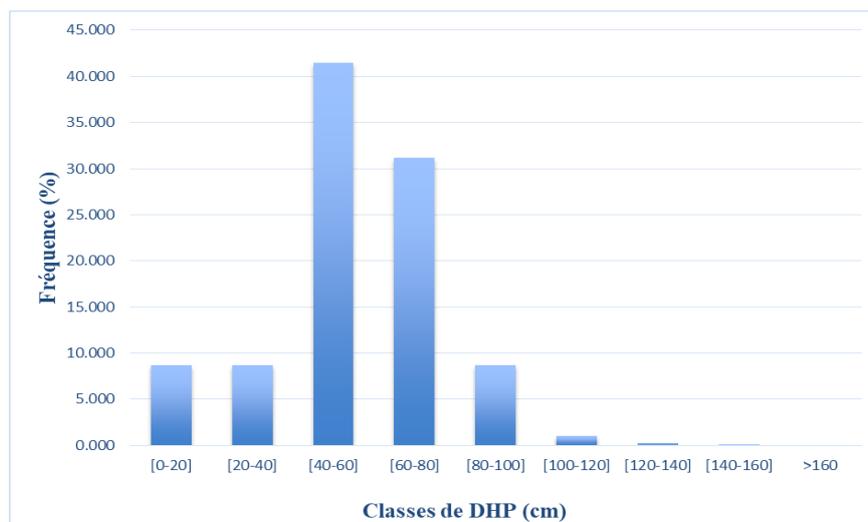


Figure 9 : Distribution des classes de diamètres et leur fréquence (Lalou 2015, 2109 arbre)

2.9. Estimation du stock de carbone dans la biomasse aérienne de *F. albida* et le stockage annuel de C.

La méthodologie d'estimation du carbone aérien stocké par les individus de *F. albida* est basée sur l'évaluation de la biomasse présente dans leurs composantes aériennes. L'estimation de la biomasse est obtenue à l'aide de la méthode dite indirecte qui consiste, entre autres, à appliquer des modèles de régression allométriques sur des mesures dendrométriques effectuées sur le terrain (Valentini, 2007). La quantité de carbone stockée par la biomasse aérienne est obtenue en multipliant l' ABA_{Sob} par la concentration en carbone, estimée à 0,48.

$$\text{Equation 5} \quad C = ABA_{Sob} \times 0.48$$

La quantité de carbone stockée par les arbres de Sob, est la somme de carbone de tous les sujets de *F. albida* (2109) inventoriés en 2015.

L'équivalent CO₂ (masse molaire 44g) du C (masse molaire 12g) stocké dans la biomasse a été obtenu en multipliant le contenu en carbone de la biomasse aérienne par 3,67 (= 44/12) et de représenter sur des graphiques la proportion de carbone stocké par classe de diamètre dans le parc agroforestier à *F. albida* du village de Sob.

CHAPITRE III : Résultats et Discussion

3.1. Accroissement en circonférence des arbres, en comparant 3 méthodes indépendantes : (i) suivi saisonnier des circonférences ; (ii) inventaires en 2015 et 2019 ; (iii) dendrochronologie

3.1.1. Méthode 1 : Accroissement saisonnier de la circonférence à 1.3m de hauteur

La figure 10 montre l'accroissement saisonnier de la circonférence à hauteur de poitrine (CHP) sur les 12 arbres autour de la tour. Une croissance faible mais non nulle est mesurée de juillet à novembre, soit pendant la période défeuillée. A partir de la deuxième quinzaine de novembre, on observe une rapide croissance, jusqu'au mois de décembre. Cette croissance se poursuit de manière plus lente et progressive jusqu'au mois de juillet. En seconde année, on observe à nouveau une perte de feuilles de juillet à septembre avec une très faible croissance. Enfin, une rapide croissance au mois d'octobre (seconde année de croissance, qui succède à la re-feuillaison). Cette croissance se poursuit faiblement et lentement jusqu'au mois de décembre. Sur une année, la croissance en circonférence moyenne est de 3.44 cm soit 0.55 cm sur le rayon.

Etonnamment, nous avons obtenu une petite croissance même pendant la saison des pluies, alors qu'on envisageait un arrêt total, puisque les arbres sont défeuillés. Sachant que les arrêts de croissance sont bien visibles sur les cernes, et qu'il n'y a donc probablement plus de production de tissus néoformés. Des phénomènes hydrauliques (reconstitution des réserves hydriques en saison humide par exemple) pourraient expliquer ce phénomène éventuellement. De plus, la croissance en début de saison sèche a semblé beaucoup plus forte en année 1 qu'en année 2, il y a donc éventuellement une importante variabilité interannuelle de la croissance saisonnière.

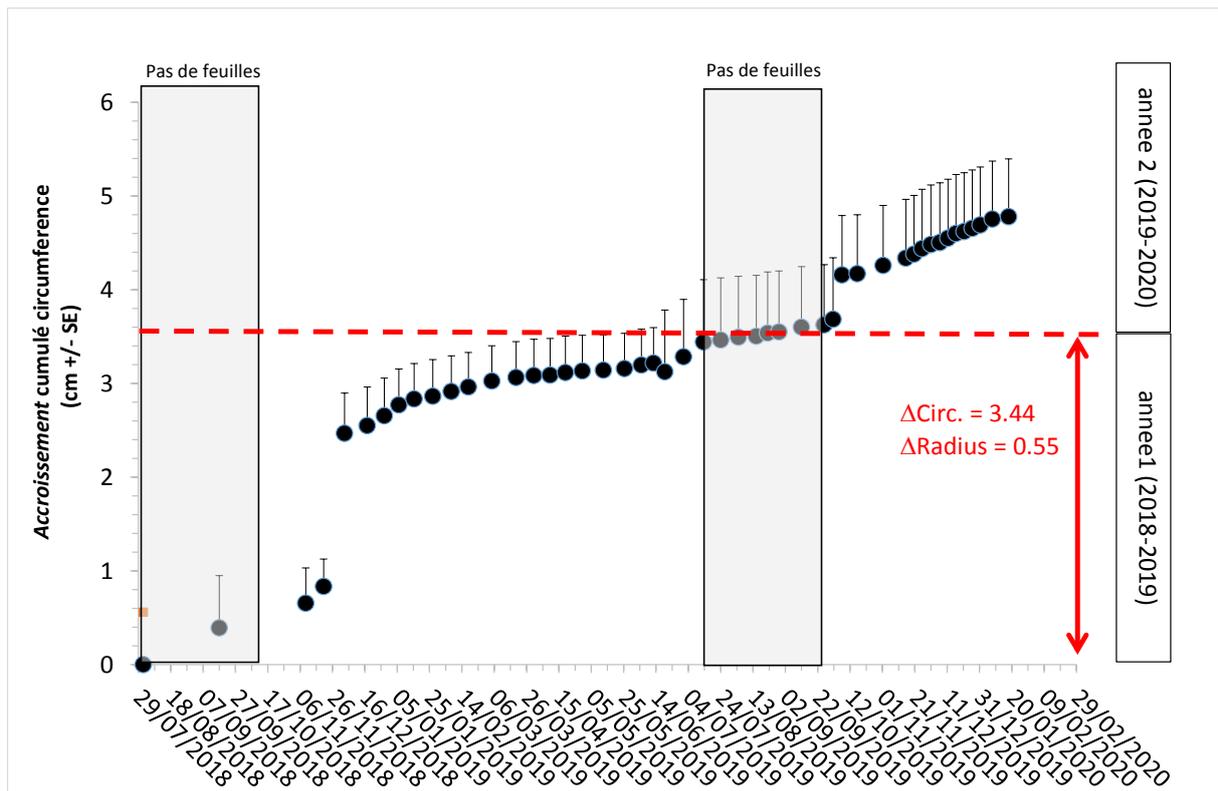


Figure 10 : Accroissement saisonnier de la circonférence à 1.3m (CHP) de *F. albida*, sur deux années successives, avec indication de la saison sans feuilles (hivernage 2019) en grisé. Les barres d'erreur sont des erreurs standard (SE).

3.1.2. Méthode 2 : Accroissement sur 4 ans de la circonférence à 1.3m

En 2015, les mesures de DHP avaient été faites au compas forestier. On a tout d'abord vérifié que les mesures au compas forestier étaient similaires aux mesures au ruban, ceci sur les données de 2019 (Figure 11a). Globalement, les résultats sont similaires avec des coefficients de détermination très élevés. Mais nous préférons la méthode du ruban dans la suite, qui est en principe plus précise (intègre mieux les variations azimutales de rayon de l'arbre).

En ce qui concerne les mesures des hauteurs des *F. albida* avec l'hypsomètre L402 (Figure 11b), on note que le coefficient de détermination est bien inférieur aux mesures de CHP. D'une part la méthode de l'hypsomètre est plus imprécise, d'autre part les arbres ont pu être affectés par l'émondage par exemple. Nous avons à peu près la moitié des arbres qui ont gagné en hauteur et l'autre moitié qui ont perdu. Ces derniers ont connu probablement un plus fort émondage durant cette période de 4 ans.

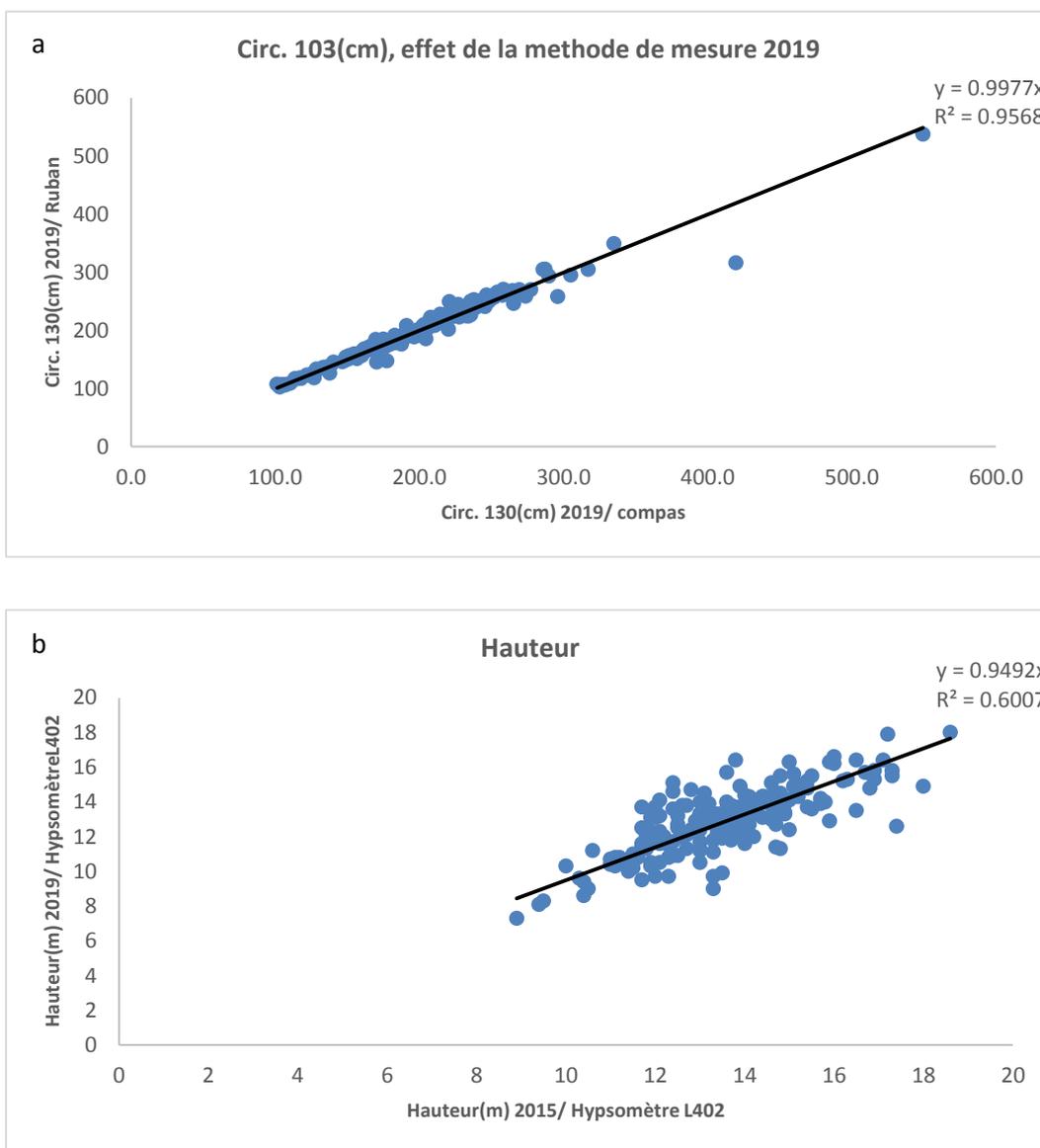


Figure 11 : a/ Comparaison de méthodes de mesures de diamètre au compas forestier ou au ruban (données de 2019) ; b/ Comparaison des mesures de hauteur en 2015 et en 2019

Pour calculer l'accroissement moyen sur le rayon par an dans cette expérience, on a utilisé la circonférence moyenne à 130 cm du sol de l'inventaire 2015 (soit 187.12 cm ; N = 189 arbres), qu'on a multiplié par la pente -1 ($1.0572 - 1 = 0.0572$) de la régression 2015 vs 2019,

forcée par l'origine (Figure 12), pour obtenir l'accroissement en CHP moyen sur quatre ans. Les arbres ont donc grandi de 5.72%, soit 10.7 cm sur la circonférence, ou encore 1.7 cm sur le rayon, ou encore 0.43 cm par an sur le rayon, en moyenne. La pente ne semblait pas varier beaucoup avec la taille des arbres.

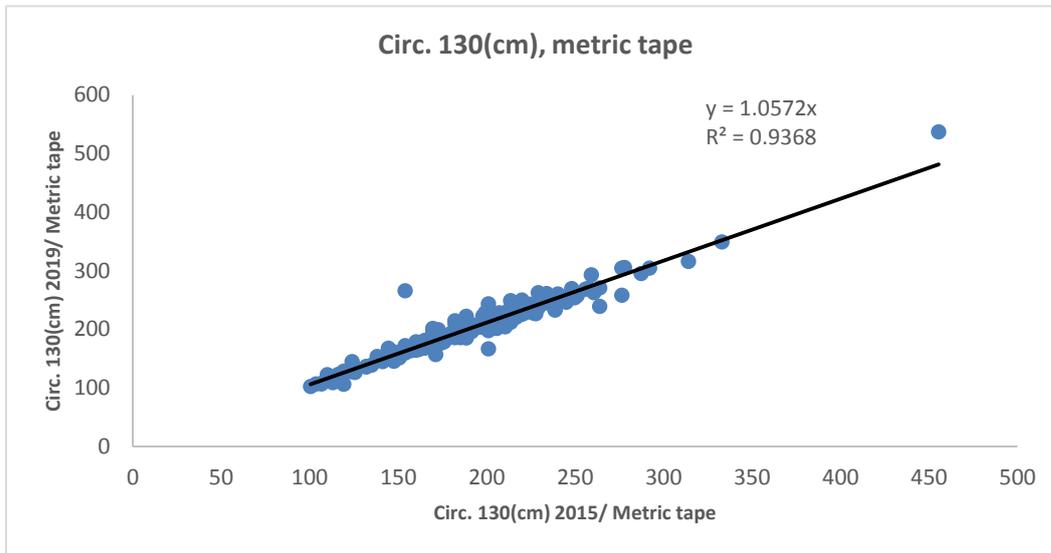


Figure12: Régression entre CHP observée en 2015 et en 2019 sur les mêmes arbres (N = 189)

3.1.3. Méthode 3 : Accroissement annuel des cernes par dendrochronologie

Pour pouvoir traiter les informations contenues dans les anneaux, on reporte leurs largeurs sur un graphique appelé profil de croissance (figure13). Sur l'axe horizontal une graduation correspond à une année et sur l'axe vertical on reporte l'épaisseur des anneaux (cernes). Sur ces rondelles, on observe des cernes dont la largeur varie considérablement : de moins de 4 mm à plus de 23 mm ; ils sont donc très difficiles à relever pour les années où la croissance est presque nulle. Sachant que *Faidherbia* défeuille complètement en saison humide et pour plusieurs mois, il y a une très haute probabilité pour que le nombre de cernes corresponde au nombre d'années, compte non tenu, évidemment, des années passées avant que la tige n'atteigne le niveau de prélèvement de la section observée, c'est-à-dire à 130 cm au-dessus du sol.

Les résultats de la dendrochronologie de *F. albida* ont apporté plusieurs informations notamment sur la croissance et la densité du bois de l'espèce (figure 14). La densité moyenne était de 568 mg cm^{-3} .

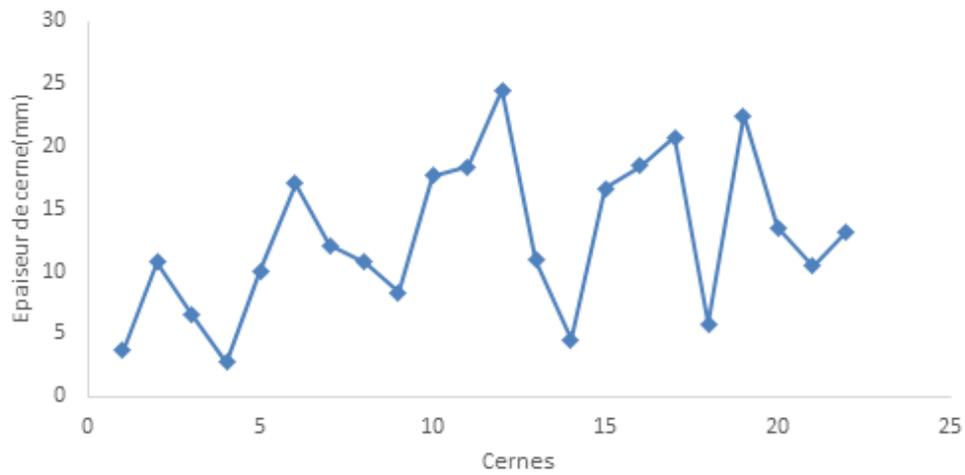


Figure 13 : Exemple de profil de croissance (arbre 49)

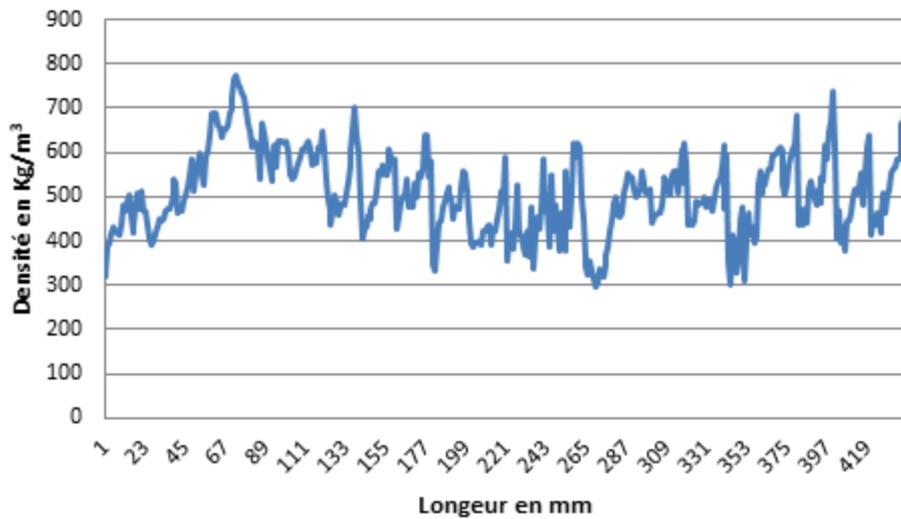


Figure 14 : Profil de densité (arbre 49)

Sur la Figure 15, on observe la trajectoire de la circonférence des cernes appartenant à 10 rondelles. Le nombre de cernes varie d'une rondelle à une autre.

Le modèle d'équation de régression forcé par l'origine est de la forme :

$$\text{Equation 6 } \text{Circ}(cm) = a \times \text{nbre de cerne}$$

L'équation de régression est de : $y = 5.1616x$ (avec y = Circonférence du cerne étudié; x = numéro du cerne en partant du centre (0 = moëlle, 1 = premier cerne, etc.). Le coefficient de détermination $R^2 = 0.86$, signifie qu'il y a une forte association entre nombre de cernes et la circonférence.

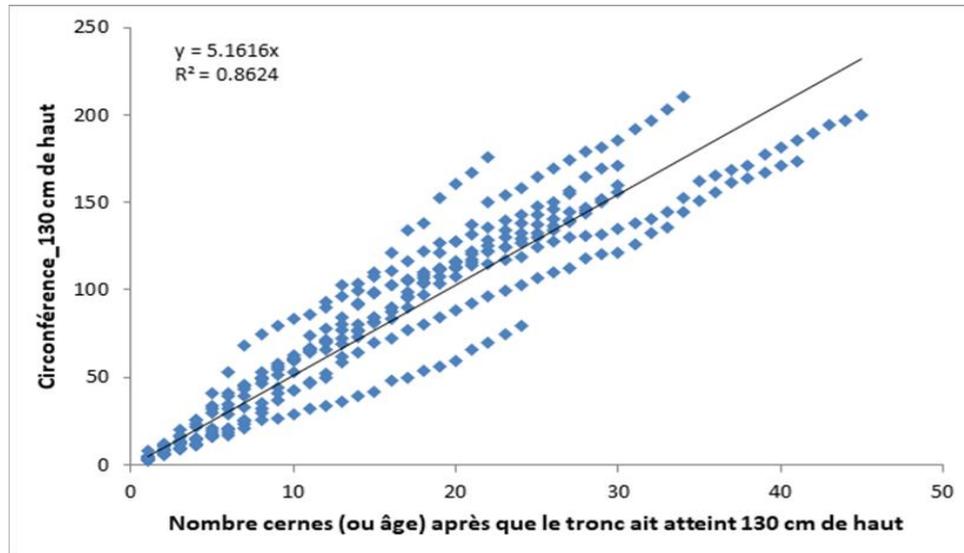


Figure 15 : Régression de la circonférence du tronc en fonction du numéro de cerne (0 = moëlle, 1 = premier cerne, etc.), montrant les trajectoires de chacun des dix arbres expérimentaux.

Si on considère que les cernes sont annuels (ce qui est probable pour cette espèce à croissance continue durant la saison sèche et à arrêt de croissance marqué en principe pendant la saison des pluies en état défeuillé) et qu'il n'y a pas d'années sans croissance, alors on peut estimer que le nombre de cernes correspond en fait à l'âge de l'arbre (en années) depuis que des cernes sont apparus à 130 cm de hauteur (hauteur de prélèvement de la rondelle), c'est-à-dire depuis l'âge où la hauteur du jeune arbre a dépassé 130 cm.

3.2. Synthèse des 3 méthodes

Tableau 5 : Comparaison des trois méthodes pour estimer l'accroissement moyen sur le rayon d'un cerne, en fonction de son âge après que la tige ait atteint 130 cm (avant-dernière colonne), mesuré (cas de la dendrochronologie), sinon estimé à partir de la relation de la Fig.15

| #Methodes | Description | Cric Moyenne. 130 cm | Age estimé après que le tronc ait atteint 130cm de haut | Accroissement annuel R (cm) |
|-----------|---|----------------------|---|-----------------------------|
| 1 | Accroissement saisonnier sur 12 arbres Faidherbia-Flux | 157 | 31 | 0.55 |
| 2 | Accroissement entre inventaires 2015 et 2019(189 arbres) | 187 | 36 | 0.43 |
| 3 | Dendrochrono 0-9 ans | 26 | 5 | 0.89 |
| 3 | Dendrochrono 10-19 ans | 77 | 15 | 0.93 |
| 3 | Dendrochrono 20-29 ans | 128 | 25 | 0.70 |
| 3 | Dendrochrono 30-39 ans | 180 | 35 | 0.78 |
| 3 | Dendrochrono 40-49 ans | 231 | 45 | 0.58 |
| | Moyenne simple des valeurs en rouge, soit 30-35 ans après que le tronc ait atteint 130 cm | | | 0.58 |
| | Moyenne pondérée des valeurs en rouge, soit 30-35 ans après que le tronc ait atteint 130 cm | | | 0.58 |

Avec l'accroissement saisonnier (méthode 1), pour une circonférence moyenne de 157 cm à 130 cm du sol, nous avons une croissance annuelle sur le rayon de 0.55 cm pour un âge estimé (selon relation de la Fig. 15) de 31 ans après que le tronc ait atteint 130 cm de haut.

Avec l'accroissement entre les deux inventaires 2005 et 2019 (méthode 2), pour une circonférence moyenne de 187 cm en 2015, nous avons une croissance annuelle sur le rayon de 0.43 cm pour un âge estimé de 36 ans après que le tronc ait atteint 130 cm de haut.

Avec la dendrochronologie (méthode 3), nous avons des circonférences moyennes qui varient de 26 cm à 231 cm selon la classe d'âge. Par ailleurs, plus l'espèce est jeune plus elle croit. Pour la classe d'âge de 40 – 49 ans pour une circonférence de 231 cm, nous avons une croissance annuelle de 0.58 cm pour un âge estimé de 45 ans après que le tronc ait atteint 130 cm de haut.

Les valeurs en rouge dans le tableau correspondent à un âge comparable de 30-35 ans environ (après que la tige ait atteint 130 cm de haut). La comparaison des 3 méthodes nous indique

que l'accroissement annuel sur le rayon se situerait entre 0.43 et 0.78 cm. La moyenne simple entre les 3 méthodes est de 0.58 cm an⁻¹. La moyenne pondérée par le nombre d'arbres de chaque expérience entre les 3 méthodes est de 5.2 cm an⁻¹. Soit environ 1.3 cm par an sur le diamètre. Ainsi, un arbre de 40 cm de diamètre sous l'écorce montrerait environ 40 ans écoulés, depuis que sa tige a atteint 130 cm de haut.

Nous avons utilisé les données du tableau 5 pour faire les graphes de la Fig. 16, en fonction de la circonférence à hauteur de poitrine (CHP) ou du diamètre à hauteur de poitrine (DHP), ou du nombre de cernes. L'accroissement annuel sur le rayon diminue avec l'âge. Comme chaque point n'est pas adossé au même nombre d'observation, ces régressions ne sont pas pondérées actuellement. Néanmoins, elles sont présentées à titre indicatif pour permettre d'établir d'estimer rapidement l'accroissement annuel, à l'aide de relations simples (indicateurs de croissance) entre taille du tronc, accroissement et nombre de cernes (ou âge)

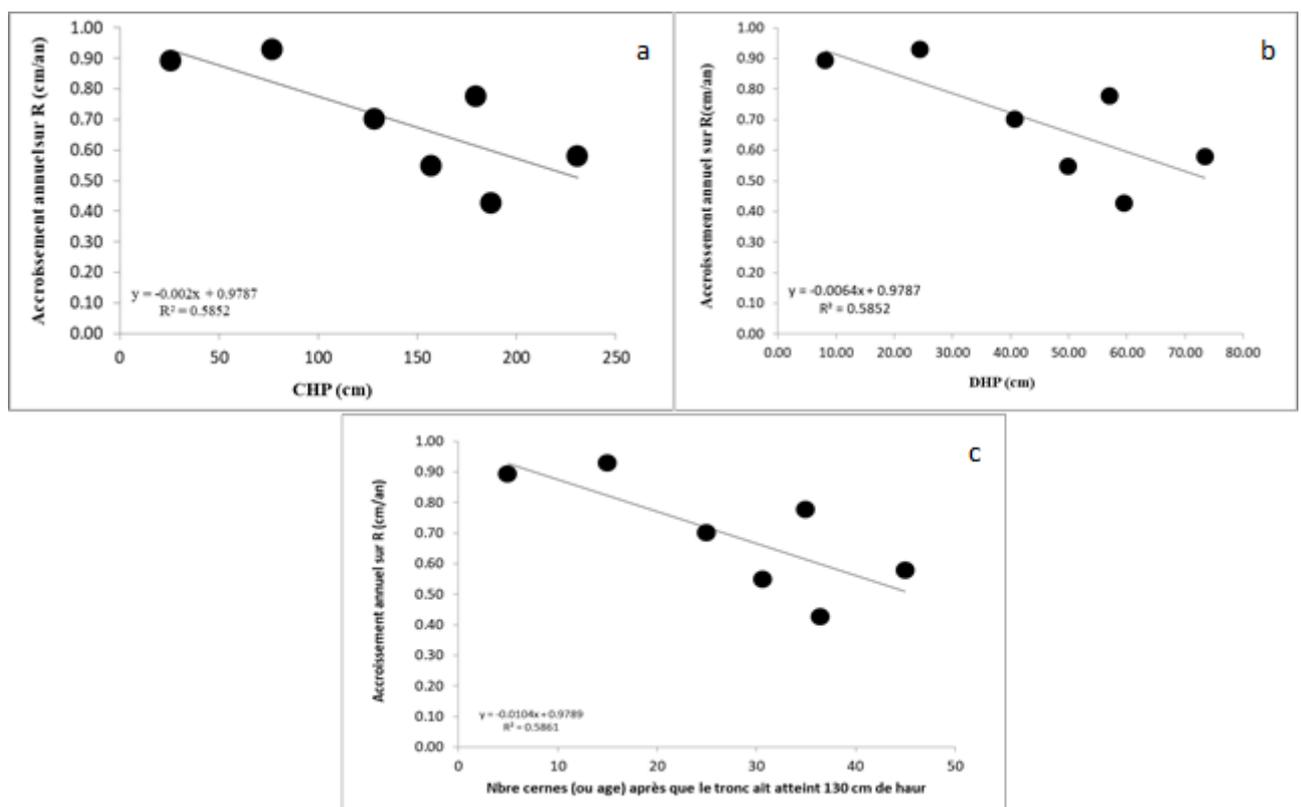


Figure 16 : Relations entre l'accroissement annuel sur le rayon et a/ la CHP ; b/ le DHP ; c/le nombre de cernes.

3.3. Tarifs de cubage pour l'estimation de biomasse aérienne pour *F. albida*.

Il s'agissait avant tout de choisir un modèle de la littérature approprié à notre situation locale (figure 17). Le modèle de Laminou Manzo (2015) avec une équation $y = 0.112x^{2.2335}$ (E1) (y = biomasse aérienne et x = diamètre à hauteur de poitrine) semble le mieux indiqué pour notre localité puisqu'il recouvre au mieux nos 3 points expérimentaux (arbres tombés naturellement et évalués).

Le modèle de Rodriguez (2016) ne peut être utilisé ici puisqu'il ne concerne que les branches, il est présent à titre indicatif de la biomasse de branches relative seulement. On note que tous les autres modèles auraient tendance à beaucoup sur ou sous-estimer BSA des arbres du parc de Niakhar.

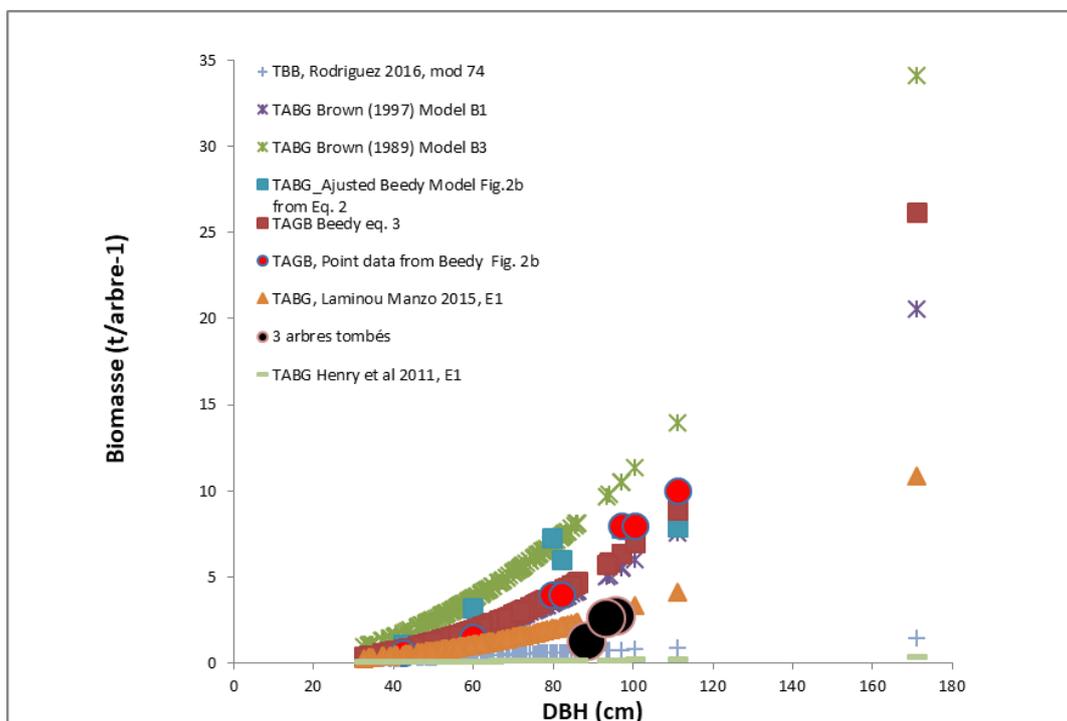


Figure 17 : Comparaison des modèles d'estimation de la biomasse aérienne totale (TABG) de la littérature disponibles pour *Faidherbia albida*. Les 3 points noirs sont nos propres mesures, utilisées pour sélectionner le modèle le plus approprié à notre situation.

Seul le modèle de Laminou Manzo et al. (2015) se rapproche des 3 arbres que nous avons mesurés. Néanmoins, il faut souligner ici que l'équation de Laminou Manzo et al. (2015) a été calibrée pour des arbres de $DBH \leq 35$ cm, alors que nos trois arbres sont dans la gamme de 90 cm environ : malgré cette forte extrapolation, qui est non recommandée, surtout s'agissant d'une équation exponentielle, il semblerait que l'équation reste valide et nous n'en avons pas trouvé de meilleure. Mais il est clair qu'à l'avenir, il faudra la vérifier sur une gamme plus

étendue. Les équations plausibles (voir M&M) de Beedy et al. (2016) surestiment beaucoup et ne seront donc pas utilisées plus avant. L'équation de Rodriguez (2016) ne concerne que les branches totales et est indiquée pour mémoire seulement. Les équations de Brown ne sont pas spécifiques à *Faidherbia*, mais génériques pour les espèces tropicales sèches, surestiment beaucoup et ne seront pas utilisées plus avant. L'équation de Henry et al. (2011) sous-estime beaucoup donc n'est pas utilisée.

La biomasse aérienne moyenne estimée (observée) de nos trois arbres est de 2.07 t/arbre⁻¹, reste néanmoins inférieure au résultat prédit par le modèle de Laminou Manzo, qui donne de 2.76 t/arbre⁻¹.

3.4. Estimation du stock de biomasse et de carbone aériens de *F. albida* et du stockage annuel de C.

Selon l'inventaire de 2015 (Lalou et al., 2015), nous disposons de 2109 mesures de DHP de *F. albida*. Ces mesures de DHP ont été réparties en classes (Tab.6). La biomasse aérienne par arbre a été calculée selon le modèle de Laminou Manzo (2015) qui ne nécessite que le DHP en entrée (eq.1). Pour passer à l'échelle de Sob, nous avons multiplié par le nombre d'individu dans chaque classe et obtenu un total de 2224.71 t_{AGDM} Sob⁻¹. Nous avons divisé par 495.38 ha pour obtenir 4.49 t_{AGDM} ha⁻¹. Ce chiffre est très proche de la valeur rapportée par Montes, soit de 4.4 t_{AGDM} ha⁻¹. L'accroissement annuel sur le rayon du centre de chaque classe a été calculé en utilisant l'équation de la Fig. 16b. Nous avons calculé l'accroissement moyen par arbre à partir de l'accroissement annuel du rayon et de l'équation de Laminou Manzo (2015). Rapporté à Sob, cela correspondait à 86 t_{AGDM} an⁻¹ multiplié par 0.48 pour avoir l'équivalent en C, soit 41.69 t_{AGC} an⁻¹. Soit 0.084 tC ha⁻¹ an⁻¹ (Fig.18). Soit encore un équivalent CO₂ de 0.309tCO₂/an/ha-1.

Tableau 6 : Estimation du stock de biomasse et de carbone aériens de *F. albida* (arbres adultes) et du stockage annuel de C à l'échelle de Sob

| Classes DHP | Centre classe DHP | Toit des Classes DHP | Nb indiv chaque classe | Frequence | Accr. Annuel Rayon (cm) | Biomasse aérienne un arbre Laminou Manzo (tDM arbre-1) | Biomasse aérienne Sob Laminou Manzo (tDM Sob-1) | Biomasse aérienne / ha Sob Laminou Manzo (tDM ha-1) | Accroissement annuel biomasse par arbre Laminou Manzo (tDM arbre-1 an-1) | Accroissement annuel biomasse aérienne Sob (tDM Sob-1 an-1) | Stockage annuel de C biomasse aérienne Sob (tC Sob-1 an-1) | Stockage annuel de C / ha biomasse aérienne Sob (tCSob ha-1 an-1) | Stockage annuel de CO2 biomasse aérienne / ha Sob (tCO2 ha-1 an-1) |
|-------------|-------------------|----------------------|------------------------|-----------|-------------------------|--|---|---|--|---|--|---|--|
| [0-20] | 10 | 20 | 183 | 8.677 | 0.915 | 0.019 | 3.509 | 0.007 | 0.009 | 1.595 | 0.766 | 0.002 | 0.006 |
| [20-40] | 30 | 40 | 183 | 8.677 | 0.787 | 0.223 | 40.815 | 0.082 | 0.027 | 4.927 | 2.365 | 0.005 | 0.018 |
| [40-60] | 50 | 60 | 875 | 41.489 | 0.659 | 0.698 | 610.767 | 1.233 | 0.042 | 36.448 | 17.495 | 0.035 | 0.130 |
| [60-80] | 70 | 80 | 658 | 31.200 | 0.531 | 1.480 | 973.801 | 1.966 | 0.050 | 33.210 | 15.941 | 0.032 | 0.118 |
| [80-100] | 90 | 100 | 183 | 8.677 | 0.403 | 2.594 | 474.755 | 0.958 | 0.052 | 9.518 | 4.569 | 0.009 | 0.034 |
| [100-120] | 110 | 120 | 22 | 1.043 | 0.275 | 4.061 | 89.349 | 0.180 | 0.045 | 0.997 | 0.479 | 0.001 | 0.004 |
| [120-140] | 130 | 140 | 4 | 0.190 | 0.147 | 5.898 | 23.592 | 0.048 | 0.030 | 0.119 | 0.057 | 0.000 | 0.000 |
| [140-160] | 150 | 160 | 1 | 0.047 | 0.147 | 8.119 | 8.119 | 0.016 | 0.035 | 0.035 | 0.017 | 0.000 | 0.000 |
| >160 | 170 | | 0 | 0.000 | 0.147 | 10.738 | 0.000 | 0.000 | 0.041 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| | | | 2109 | 100 | | | 2224.71 | 4.49 | | 86.85 | 41.69 | 0.084 | 0.309 |

Figure 18 : Distribution des classes de diamètres et leur fréquence (inventaire , 2019)

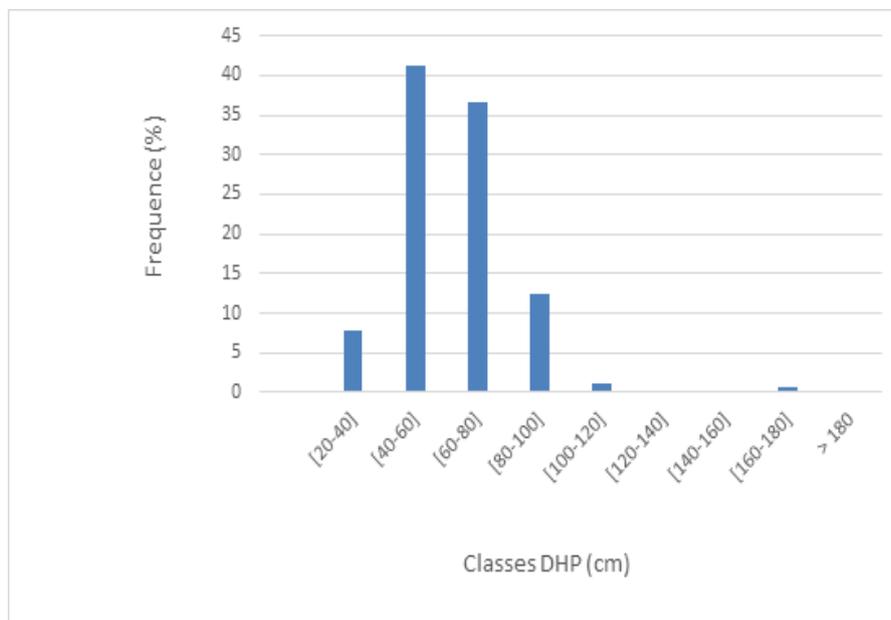
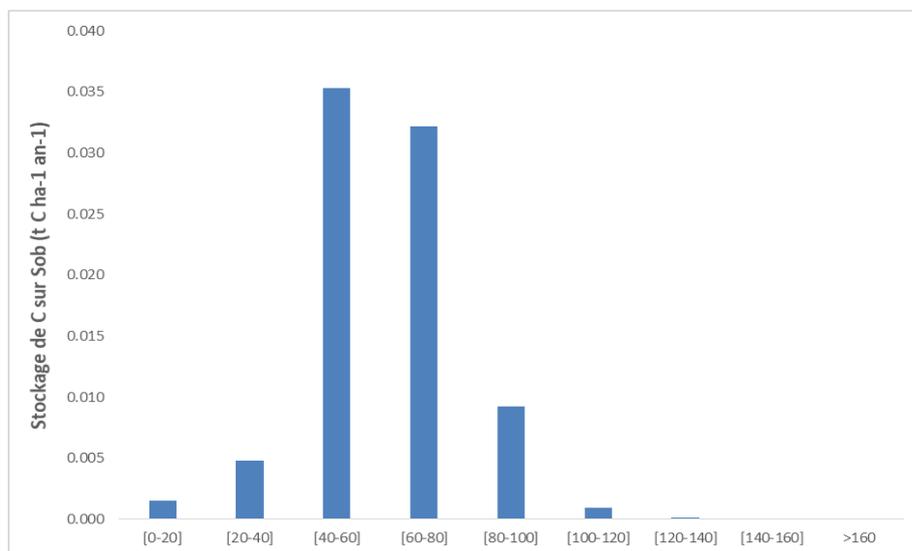


Figure19 : Stockage de carbone par classe de diamètre.



Conclusions

Dans cette étude, nous avons comparé 3 méthodes d'estimation de l'accroissement annuel sur le rayon à hauteur de poitrine de *Faidherbia albida* et à l'aide d'équations allométriques de la littérature sélectionnées pour nos conditions locales, estimé les stocks et stockages de biomasse et de C aérien sur pied par arbre et à l'échelle d'un village (Sob).

Les trois méthodes d'approche de l'accroissement annuel moyen du rayon à 130 cm convergiaient vers une valeur proche de 50 mm an⁻¹ sur le rayon.

Nous avons observé une croissance faible mais non nulle en saison des pluies (phase défeuillée), malgré une interruption claire de la croissance des tissus visible sur les anneaux de croissance : cette croissance apparente en saison défeuillée ne correspond pas forcément à une croissance vraie par production de tissus néoformés, mais peut-être à de simples variations de contenu en eau.

Nous avons sélectionné le modèle de Laminou Manzo et al. (2015) parmi plusieurs autres modèles disponibles dans la littérature, car il correspondait le mieux à nos tarifs de cubage établis localement sur 3 arbres.

Nous avons calculé grâce à ce modèle et à un inventaire une biomasse aérienne de bois de 2224.71 tonnes dans la commune du village de Sob soit 4.49 t_{AGDM}/ha⁻¹.

Le stockage de carbone aérien des individus de *F. albida* du parc agroforestier est évalué à 41.69 tC/an pour cette commune, ce qui correspond à 0.084 tC ha⁻¹ an⁻¹, soit un peu moins de 100 kg C ha⁻¹ an⁻¹ pour une densité d'arbres de 6.3 arbres ha⁻¹.

Nous proposons des relations empiriques simples entre le numéro de cerne, le nombre d'années écoulées après avoir atteint la hauteur de 130cm, la circonférence (ou le rayon) et l'accroissement annuel. Ces relations permettront d'estimer aisément l'âge des arbres au champ par exemple, ou leur accroissement annuel.

Sur la base des résultats obtenus et tenant compte des limites de ce travail, cette étude mérité d'être élargie sur la quantification des contributions spécifiques des arbres au bilan carbone, pourrait faciliter la mise en place de stratégies de gestion de la strate ligneuse la plus favorable au bilan carbone, notamment en jouant sur la densité, qui est ici très faible. Bien sûr, étant donné que les ligneux, y compris ceux qui ne participent pas de façon significative au bilan carbone, produisent de nombreux autres biens et services aux communautés locales, ceux-ci ne doivent pas être négligés, même à faible densité.

Références

- AUBREVILLE, A. : Flore forestière soudano-guinéenne. - Société d'éditions géographiques, Maritimes et Coloniales, Paris, **1950**, pp. **280-283**
- BAILLON, H. : Révision des Acacias médicinaux - Adansonia, n° **4**, **1863**, pp. **85-127**.
- Barnes R.D., Fagg C., 2003. *Faidherbia albida*. Monograph and annotated bibliography. United Kingdom, Oxford Forestry Institute, p. 288.
- Bonkougou, E.G., Ayuk, E.T. et Zoungrana, I., 1997. Les parcs agroforestiers des zones semi-arides d'Afrique de l'ouest. Actes du Symposium international tenu à Ouagadougou, Burkina Faso 25-27 octobre 1993. ICRAF, Nairobi, Kenya. 226p.
- BONKOUNGOU E.G., 1987. « Monographie de *Acacia albida* Del., espèce agroforestière à usages multiples. » IRBET/CNRST. Ouagadougou, 92 pages + annexe.
- BRENNAN, J. P. M. ; Manuel sur la taxonomie des espèces d'acacias. - F.A.O., Rome, **1983**, **53** p.
- BOUDET, G. & LEBRUN J. P. avec coll. DEMANGE, R. : Catalogue des plantes vasculaires du Mali. - I.E.M.V.T., Maisons-Alfort, **1986**, **480** p.
- Charreau Claude, Vidal Pierre. 1965. Influence de l'*Acacia albida* Del. sur le sol, nutrition minérale et rendements des mils *Pennisetum* au Sénégal. *L'Agronomie Tropicale. Série 3, Agronomie Générale. Etudes Scientifiques*, **20** (6-7) : 600-626.
- Centre technique Forestier Tropical., 1988. « *Faidherbia albida* (Del) A. chev. (Synonyme *Acacia albida* Del.) ».
- CHEVALIER, A. : Nouvelles observations sur quelques Acacias de l'Afrique occidentale. - Revue de Botanique Appliquée, 1934, n° **14**, pp. **875-884**.
- Cisse M., Kone A., 1992. The Fodder Role of *Acacia albida* Del: Extent of Knowledge and Prospects for Future Research. In: *Faidherbia albida* in the West African semi-arid tropics: proceedings of a workshop. R.J. Vandenbeldt. Niamey, Niger, **pp. 29- 37**.
- Delaunay, V., Deschanps-Cottin M., Bertaudière-Montès V., Vila B., Oliveau S., Dos-Santos S., Soumaré A., Lalou R., 2015. Dynamique démographique et dynamique du parc agroforestier à *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. en pays Serer (Sob, Sénégal).
- Delaunay V., Desclaux A., Sokhna C. (éd.), 2018. *Niakhar, mémoires et perspectives*.

- Depommier, D. & Détienne. R (1996) Croissance de *Faidherbia albida* dans les Parcs du Butina Paso. Etude des cernes annuels dans la tige et le pivot racinaire. Les Parcs à *Faidherbia* (cd. R. Peltier), **PP. 23-53**. Cahiers scientifiques **No 12**. CIRAD-Forêt, Nogent-sur-Marne.
- Depommier, D. (1996) Structure, dynamique et fonctionnement des parcs à *Faidherbia albida* (Del) A. Cheu Caractérisation et incidence des facteurs biophysiques et anthropiques sur l'aménagement et le devenir des parcs de Dossi et de Watinoma Burkina Faso. PhD thesis, University of Paris, France.
- Fagg C., 1995. *Faidherbia albida* - inverted phenology supports dryzone agroforestry. Forest, Farm, and Community Tree Network. Disponible sur Internet: http://factnet.winrock.org/fnrm/factnet/factpub/FACTSH/F_albida.html [Consulté le 04/02/2016].
- FAO, 2010. « Climate-Smart » Agriculture. Rome, Italy. [Diffusé le 04/02/2016].
- GIEC, 2003. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. GIEC.
- GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Expert sur le Changement Climatique). 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Équipe de rédaction principale, Pachauri RK et Reisinger A. GIEC, Genève, Suisse, **103 p.**
- GILBERT, G. & BOUTIQUE, R. : Flore du Congo belge et du Ruanda-Urundi. Bruxelles, **1952**, pp. **145-169**.
- Goda S.E., 1992. Pollen Studies on *Faidherbia albida* in Sudan. In: *Faidherbia albida* in the West African semi-arid tropics: proceedings of a workshop. R.J. Vandenbeldt. Niamey, Niger, **p. 25**.
- Henry, M. et al. 2011. Estimating tree biomass of sub-Saharan African forests: a review of available allometric equations.
- LE HOUEROU, H. N. : Le rôle des ligneux fourragers dans les zones sahélienne et soudanienne. - Colloque sur les fourrages ligneux en Afrique, Addis-Abeba, 8-12 avril 1980, pp. **85-101**.
- [https://uses.plantnet-project.org/fr/faidherbia_albida_\(prota\)](https://uses.plantnet-project.org/fr/faidherbia_albida_(prota)).
- IRD., 2018. La situation Démographique dans l'observatoire de Niakhar 1963-2014, 92 p.

- Laminou O., Moussa M., Issoufou H.B.-A., Abdoulaye D., Morou B., Youssifi S., Mahamane A., Paul R., 2015. Allometric equations for estimating the aboveground biomass of *Faidherbia albida* (Del.) Achev in the Aguié agrosystems, Niger. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **9 (4)**, pp. **1863- 1874**.
- Lebourgeois, F., Mérian, P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie. Master. Nancy, France. <cel-01627048>.
- Lalou, R., Sultan, B., Muller, B. *et al.* Does climate opportunity facilitate smallholder farmers' adaptive capacity in the Sahel?. *Palgrave Commun* **5**, 81 (2019). <https://doi.org/10.1057/s41599-019-0288-8>
- Lalou R., Montès N., Deschamps-Cottin M., Vila B., Bertaudière-Montès V., 2015. Relevé arbres Sob 2015.
- Lericollais A (ed). 1999. Paysans sereer. Dynamiques agraires et mobilités au Sénégal. Collection "à travers champs", Paris : IRD Editions, Collection "à travers champs » : 668 p.
- Mothe. F, Duchanois. G, B. Zannier, Leban. J-M. 1998. Analyse microdensitométrique appliquée au bois : méthode de traitement des données utilisée à l'Inra-ERQB (programme CERD).*Ann.Sci.For.* 55 (1998) p 301-313.
- NONGONIERMA, A. : Contribution A l 'étude biosystématique du genre *Acacia* Miller en Afrique occidentale. IV. Distribution bioclimatique des différents taxa. - *Bull. I.F.A.N.*, **1978**, t. **39**, sb. A, no **2**, pp. **318-339**.
- Orwa et al. 2009- Agroforestree Database: a tree reference and selection guide version 4.0
- OUEDRAOGO J.S., 1994 - Dynamique et fonctionnement des parcs agroforestiers du Plateau-Central burkinabè. Influence des facteurs biophysiques et anthropiques sur la composante arborée. Thèse Paris 6, 222 pages.
- Pan Y. et al., 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, **333**, 988-993.
- PELISSIER, P. : L'arbre dans les paysages agraires de l'Afrique Noire. L'arbre en Afrique tropicale - la fonction et le signe. - *Cahiers O.R.S.T.O.M.*, ser. Sci. Hum., 1980, **vol. XVII**, n^{os} 3-4, pp. 131-136.
- Pélissier. P. (1980) L'arbre en Afrique tropicale. La fonction et le signe. *Cahiers ORSTOM, Sciences Humaines* 17, 127-130.

- Perrin. J.R, Ferrand. J.C, 1984. Automatisation des mesures sur carottes de sondage de la densité du bois, de son retrait et des contraintes de croissance. Annales des sciences forestières, INRA/EDP Sciences, Ann. Sci. For., 41 (1), 69-86.
- Polge. H, Nicholls. J.W.P, 1972. Quantitative radiography and the densitometric analysis of wood. Wood Science, 5 (1), 51-59.
- PROTA, (1934). *Faidherbia albida*. Protologue: Rev. Int. Bot. Appl. Agric. Trop. 14 : 876. [https://uses.plantnet-project.org/fr/Faidherbia_albida_\(PROTA\)](https://uses.plantnet-project.org/fr/Faidherbia_albida_(PROTA))
- Recherches pluridisciplinaires sur le changement en Afrique. Marseille et Dakar, Éditions de l'IRD et L'Harmattan Sénégal, 535 p.
- ROBBERTSE, P. J., VENTER, G. & JANSE VAN RENSBURG, H.: The wood anatomy of the south african Acacias. - I.A.W.A. Bull., 1980, vol. 1, no 3, pp. 93-103.
- ROUPSARD, O., 1997. Écophysiologie et Diversité Génétique de *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. (syn. *Acacia albida* Del.), un Arbre à Usages Multiples d'Afrique Semi-Aride : Fonctionnement hydrique et efficacité d'utilisation de l'eau d'arbres adultes en parc agroforestier et de juvéniles en conditions semi-contrôlées.
- Spevacek A., 2011. *Acacia (Faidherbia) albida*. United States, United States Agency International Development, p. 18.
- TROCHAIN, J. L. : Le rythme phénologique aberrant de *Faidherbia albida* (Del.) A. Chev. (Mimosaceae). – Annales Scientifiques de l'Université de Besançon, 1969, Botanique, 3^e série, fasc. 6, pp. 7-13.
- VASSAL, J. : La plantule d'*Acacia albida* Del. (*Faidherbia albida* Del.) A. Chev.). - Bull. Soc. Hist. nat. Toulouse, 1967, CIIZ, n^{os} 3-4, pp. **583-589**

Annexes

Annexe 1 : Tutoriel de l'hypsomètre L402

Laser L402 V1.1

Pour une mesure précise de la hauteur, de la distance et de l'angle sur le terrain.

1. Appuyez sur MODE pour allumer l'instrument.
2. Sélectionnez le menu CONFIGURATION et appuyez sur le bouton Mode.
3. Sélectionnez l'unité de distance et de hauteur. Démarrez le laser en appuyant sur POWER et sélectionnez l'unité comme mètre(m) ou Yard en continuant d'appuyer sur le bouton Mode. L'unité sélectionnée apparaît dans le menu Laser afficher. Sortez de ce menu en appuyant simultanément sur SHIFT et MODE.
4. Sélectionnez l'unité d'angle en degrés (Deg), GRAD (gradients) ou% (pourcentage) en appuyant sur DÉCALAGE. Confirmez en appuyant sur MODE.
5. Réglez le P.OFFSET avec SHIFT et MODE. Un curseur apparaît sous le chiffre. Utilisez le bouton Shift pour augmenter ce chiffre. Confirmez le chiffre en appuyant sur MODE. Répétez pour le chiffre suivant jusqu'à ce que le décalage du pivot soit défini.
6. Réglez le REF.HGT

P.OFFSET

Le décalage de pivot est la distance entre l'avant de l'instrument laser et le point d'intersection virtuel derrière l'instrument. Le P.OFFSET normal est de 0,3 m / 1,0 pied.

REF.HGT

Distance à un point de référence facultatif. REF HGT est toujours ajouté à la hauteur lors de la mesure distance manuellement. Lors de la mesure de la distance avec le laser, REF HGT n'est pas utilisé sauf lors de l'utilisation de la méthode unique. La hauteur de référence (REF HGT) doit alors correspondre à la hauteur de vos yeux.

MESURES DE HAUTEUR

L'instrument laser L402 propose différentes méthodes de mesure pour une hauteur précise :

One shot : Distance et angle par rapport à une partie optionnelle de l'objet, mesurés au laser.

Pour pouvoir travailler avec cette méthode, vous devez être au même niveau que le bas de l'objet à mesurer.

HEIGHT 3P: Distance et angle par rapport à la partie optionnelle de l'objet mesurés au laser. L'angle est mesuré à la partie la plus basse et la plus haute de l'objet.

HEIGHT 2P: Distance et angle, par rapport à un point de référence, mesurés au laser. L'angle supérieur est mesuré.

HEIGHT 2PL: Distance et angle au bas et au haut, mesurés au laser.

La méthode est idéale pour les objets penchés.

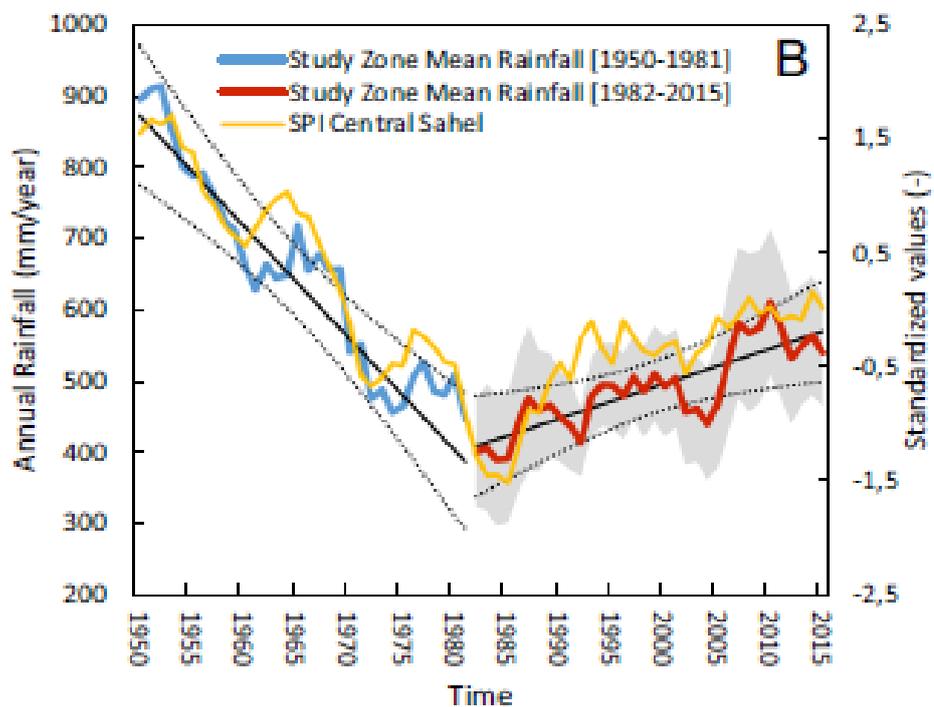
MESURE DE LA DISTANCE ET DE LA HAUTEUR AU LASER (HEIGHT 2PL)

1. Appuyez sur POWER pour allumer le laser.
2. Visez le bas de l'arbre et appuyez sur POWER pour mesurer avec le laser tu prolonge la visée du bas toujours jusqu'à la cime de l'arbre et appuyer à nouveau sur POWER.

L'instrument laser L402 indique par un court signal le résultat de la mesure terminé. L'écran affiche la distance de pente(SD), la distance horizontale(HD), l'angle et la hauteur (REF.HGT inclus).

Appuyez sur les boutons Mode et Shift pour sortir d'un menu et éteindre l'instrument laser.

Annexe 2 : Variabilité interannuelle de la pluviosité dans le terroir de Niakhar, Sénégal.



Annexe 3 : Tab7, 8 : Distribution des classes de diamètres et des fréquences des deux inventaires (2015 et 2019)

| Classe DHP (cm) | Centre classe DHP | Toit des classe DHP | Nb individus ds chaque classe | Fréquence % |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|--|------------------------|
| [0 – 20[| 10 | 20 | 183 | 8.677 |
| [20 – 40 [| 30 | 40 | 183 | 8.677 |
| [40 – 60[| 50 | 60 | 875 | 41.489 |
| [60 – 80[| 70 | 80 | 658 | 31.200 |
| [80 – 100[| 90 | 100 | 183 | 8.677 |
| [100 - 120[| 110 | 120 | 22 | 1.043 |
| [120 - 140[| 130 | 140 | 4 | 0.190 |
| [140 – 160[| 150 | 160 | 1 | 0.047 |
| >160 | 170 | | 0 | 0.000 |

Inventaire Lalou 2015

| Classe DHP (cm) | Centre classe DHP | Toit des classe DHP | Nb individus ds chaque classe | Fréquence % |
|----------------------------|------------------------------|--------------------------------|--|------------------------|
| [0 – 20[| 10 | 20 | 0 | 0 |
| [20 – 40 [| 30 | 40 | 14 | 8 |
| [40 – 60[| 50 | 60 | 73 | 41 |
| [60 – 80[| 70 | 80 | 65 | 37 |
| [80 – 100[| 90 | 100 | 22 | 12 |
| [100 - 120[| 110 | 120 | 2 | 1 |
| [120 - 140[| 130 | 140 | 0 | 0 |
| [140 – 160[| 150 | 160 | 0 | 0 |
| [160 – 180[| 170 | 180 | 1 | 1 |
| >180 | 190 | | | |

Inventaire 2019