

## SOMMAIRE

Introduction.....	1
1 Contexte.....	2
1.1 Le village de Mafa Kilda.....	2
1.1.1 Situation géographique et administrative.....	2
1.1.2 Milieu naturel.....	3
1.1.3 Milieu humain.....	3
1.1.4 Contexte socio-économique.....	4
1.2 La problématique.....	5
1.2.1 Durabilité de la ressource arborée.....	5
1.2.2 L'arbre au centre de négociations entre groupes d'intérêts.....	5
1.2.3 M.D.P. : un mécanisme de promotion de l'arbre ?.....	6
2 Méthode : protocole de mesure du carbone contenu dans la biomasse aérienne des arbres.....	7
2.1 Les objectifs.....	7
2.2 Choix du matériel végétal émondable.....	8
2.3 La pratique d'émondage.....	8
2.4 Estimation de tarifs de biomasse.....	9
2.4.1 La biomasse humide émondée ( $M_h E$ ).....	10
2.4.2 La biomasse humide non émondée ( $M_h \text{ non } E$ ).....	11
2.5 Le stock de carbone contenu dans le compartiment aérien non émondé.....	12
2.6 La productivité en bois émondable.....	12
2.7 Estimation de tarifs de biomasse.....	13
2.8 Estimation de la biomasse totale moyenne.....	14
2.9 Analyse des traitements de données.....	14
3 Résultats.....	15
3.1 Élaboration d'un tarif de biomasse pour les compartiments branches.....	15
3.2 Estimation de tarif de biomasse.....	21

4	Analyse.....	27
4.1	Les mesures de poids .....	27
4.2	L'estimation de la masse volumique.....	27
4.3	Recherche d'un model plus ajusté pour le tarif des branches.....	27
4.4	La productivité raméale.....	28
4.5	L'évaluation du carbone stocké.....	28
5	Discussion.....	29
5.1	Élaboration d'un tarif de biomasse pour la mise en place de MDP : Une nécessité d'affiner les tarifs de biomasse présents dans la littérature.....	29
5.2	Entre M.D.P. et pratiques paysannes.....	30
	Conclusion.....	32
	Annexes.....	33

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 : INVENTAIRE REALISE EN NOVEMBRE 2000 DANS LE CAMPMENT PEUL D'OURO BOUBA RAROU (25 ARBRES SUR 0,8 HA).....	3
TABLEAU 2: BIOMASSE SECHE TOTALE DES ARBRES .....	22
TABLEAU 3 : BIOMASSE SECHE DES BRANCHES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE A LA BASE (RAPPEL) .....	23
TABLEAU 4 : PRODUCTIVITE RAMEALE DU KARITE, DE L' <i>ANOGEISSUS LEIOCARPUS</i> ET DU <i>COMBRETUM NIGRICANS</i> .....	24
TABLEAU 5 : HUMIDITE MOYENNE (%) DES ESSENCES ETUDIEES .....	25
TABLEAU 6 : STOCK DE CARBONE CALCULE AU NIVEAU DE LA PARCELLE D'OURO BOUBA RAROU (31 ARBRES/ HA).....	26

## Liste des figures

FIGURE 1 : CARTE DU CAMEROUN .....	2
FIGURE 2 : CARTE DE MIGRATIONS AU NORD CAMEROUN .....	4
FIGURE 3 : KARITE BRULE A LA BASE PAR UN AGRICULTEUR QUI SOUHAITE S'EN DEBARASSER POUR RECOLTER LE BOIS ET REDUIRE L'OMBRAGE SUR LES CULTURES. ....	7
FIGURE 4 : ARBRE EMONDE APRES UNE ROTATION COURTE : LE BOIS RECOLTE EST DE PETIT DIAMETRE	8
FIGURE 5 : ARBRE AVANT ET APRES EMONDAGE .....	9
FIGURE 6 : SCHEMA RECAPITULATIF DES MESURES DE CARACTERISATION DE L'ARBRE.....	9
FIGURE 7 : NUMEROTATIONS DES TRONÇONS ET DES BRANCHES MESURES.....	10
FIGURE 8 : SCHEMA RECAPITULATIF DE LA DETERMINATION DE LA BIOMASSE HUMIDE TOTALE .....	12
FIGURE 9 : LECTURE DES CERNES SUR UNE BRANCHE DE <i>VITELLARIA PARADOXA</i> .....	13
FIGURE 10 : <i>VITELLARIA PARADOXA</i> (KARITE) : BIOMASSE SECHE DU BOIS DES BRANCHES EMONDEES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE A LA BASE.....	15
FIGURE 11 : BIOMASSE SECHE DU BOIS DES BRANCHES EN FONCTION DU DIAMETRE A LA BASE A LA RAMIFICATION 1 POUR <i>VITELLARIA PARADOXA</i> .....	16
FIGURE 12 : BIOMASSE SECHE DU BOIS DES BRANCHES DE RAMIFICATION 1 ET LES BRANCHES EMONDEES EN FONCTION DE LEUR DIAMETRE A LA BASE POUR <i>VITELLARIA PARADOXA</i> .....	16
FIGURE 13 : <i>ANOGEISSUS LEIOCARPUS</i> : BIOMASSE SECHE DES BRANCHES EN FONCTION DE SON DIAMETRE A LA BASE .....	17
FIGURE 14 : MASSE SECHE DES BRANCHES EN FONCTION DU DIAMETRE A LA BASE DES RAMIFICATIONS 1 POUR <i>ANOGEISSUS LEIOCARPUS</i> .....	18
FIGURE 15 : MASSE SECHE DES BRANCHES EN FONCTION DU DIAMETRE A LA BASE DES RAMIFICATION 1 ET DES BRANCHES EMONDEES POUR <i>ANOGEISSUS LEIOCARPUS</i> .....	18
FIGURE 16 : <i>COMBRETUM NIGRICANS</i> : BIOMASSE SECHE DU BOIS DES BRANCHES EN FONCTION DE SON DIAMETRE A LA BASE.....	19
FIGURE 17 : MASSE SECHE DU BOIS DES BRANCHES EMONDEES EN FONCTION DU DIAMETRE A LA BASE DES RAMIFICATION 1 POUR <i>COMBRETUM NIGRICANS</i> .....	20
FIGURE 18 : MASSE SECHE DU BOIS DES BRANCHES NON EMONDEES EN FONCTION DU DIAMETRE A LA BASE DES RAMIFICATION 1 ET DES BRANCHES EMONDEES POUR <i>COMBRETUM NIGRICANS</i> .....	20
FIGURE 19 : MASSE SECHE TOTALE DU BOIS DE LA PARTIE AERIENNE DE L'ARBRE (PARTIE EMONDEE ET NON EMONDEE) EN FONCTION DU DBH .....	21
FIGURE 20 : MASSE SECHE TOTALE MOYENNE DU BOIS DE LA PARTIE AERIENNE DES ARBRES EN FONCTION DU DBH (MASSE MOYENNE = BIOMASSE NON EMONDEE + 4 X PRODUCTIVITE ANNUELLE).....	22
FIGURE 21 : MASSE SECHE TOTALE DU BOIS DE LA PARTIE AERIENNE EN FONCTION DE LA SURFACE DE HOUPPIER.....	23
FIGURE 22 : PRODUCTIVITE RAMEALE EN FONCTION DE LA SURFACE DU HOUPPIER DU KARITE .....	24
FIGURE 23 : STOCK MOYEN DE CARBONE DE LA PARTIE AERIENNE DES ARBRES EN FONCTION DU DBH .....	25
FIGURE 24 : PRODUCTIVITE RAMEALE POUR LE KARITE ISSUE DES ETUDES MENEES .....	26
FIGURE 25 : RESIDUS DE LA VARIABLE DIAMETRE (D) .....	33
FIGURE 26 : REGRESSION LINEAIRE ISSUE DE LA TRANSFORMATION DE LA VARIABLE MO .....	33

## Liste des sigles et acronymes

C.I.R.A.D. : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement

D.B.H : Diameter at Breast Height (diamètre à hauteur de poitrine = 1,30m)

E.N.G.R.E.F. : École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

F.A.O. : Food and Agriculture Organization

F.R.T. : Foresterie Rurale et Tropicale

G.P.S. : Global Positioning System

I.R.A.D. : Institut de la Recherche Agricole pour le Développement

M.D.P. : Mécanisme de Développement Propre

M.O.C. : Mise en Œuvre Conjointe

P.E.N. : Permis d'Émission Négociable

P.R.A.S.A.C. : Pôle Régional de Recherche Appliqué au développement des Savanes d'Afrique Centrale

## INTRODUCTION

Depuis 2000, les étudiants de la formation Foresterie Rurale et Tropicale (F.R.T.) de l'École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (E.N.G.R.E.F.) de Montpellier réalisent des études de terrain en collaboration avec le Pôle Régional de Recherche Appliqué au développement des Savanes d'Afrique Centrale (P.R.A.S.A.C.) ainsi qu'avec l'Institut de la Recherche Agricole pour le Développement (I.R.A.D.) dans le nord du Cameroun.

Cette année, un groupe d'étudiants, basé au village de Mafa-Kilda, a mis au point une méthodologie qui puisse évaluer le carbone stockable au sein d'un parc à karité (*Vitellaria paradoxa*, ou *Butyrospermum parkii* et *Butyrospermum paradoxum* pour les anciens noms). Cette étude s'inscrit dans l'optique de l'éventuelle mise en place en 2012 d'un Mécanisme de Développement Propre (M.D.P.) dans le cadre du protocole de Kyoto et comme élément de réflexion à une meilleure gestion des parcs arborés en région soudanienne. La pression exercée par les activités anthropiques menace la durabilité de ces parcs arborés et des recherches doivent donc être réalisées pour une meilleure valorisation de la composante arborée dans ces écosystèmes fortement perturbés. En effet, de nombreux intérêts convergent autour de la ressource ligneuse : les éleveurs prélèvent des fourrages foliaires, les agriculteurs et les bûcherons du bois de feu et d'usage et divers collecteurs prélèvent des fruits et des produits pharmacologiques. Ainsi, l'arbre est au cœur des conflits d'usage et son maintien conditionne les principales activités économiques.

Le contexte de notre étude sera tout d'abord présenté. Ensuite, nous préciserons la méthode utilisée. Puis, les résultats et leurs analyses seront abordés. Enfin, une discussion sera menée.

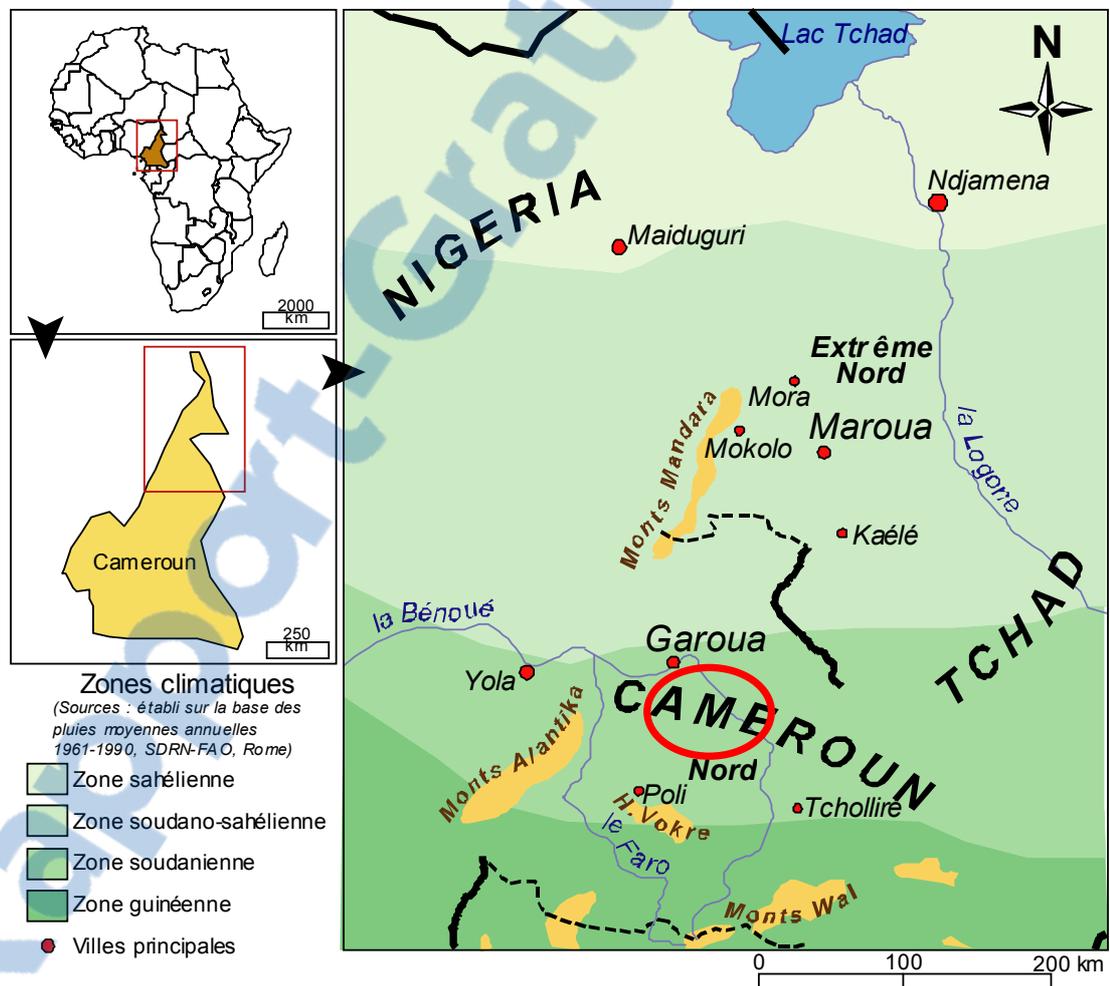
# 1 CONTEXTE

Le village de Mafa-Kilda puis la problématique sont présentés dans cette partie.

## 1.1 LE VILLAGE DE MAFA KILDA

La situation géographique et administrative, le milieu naturel puis humain et enfin le contexte socio-économique sont présentés ici.

### 1.1.1 Situation géographique et administrative



Situé au Cameroun dans la province Nord, le village de Mafa Kilda est localisé au sein du département de la Bénoué, à 20km au sud de la ville de Garoua, sur la route nationale qui se dirige vers Ngaoundéré. Le village de Mafa Kilda dépend à la fois de l'autorité administrative de la sous-préfecture et de la commune rurale de Ngong et de l'autorité traditionnelle du Lamidat<sup>1</sup> de Tchéboa (BELLIDO DIAZ 2003).

### 1.1.2 Milieu naturel

Le village se situe en zone de bio-climat soudano-guinéen (AUBREVILLE 1950) caractérisée par des conditions climatiques semi-arides avec une pluviométrie annuelle monomodale qui varie entre 900 et 1200 mm.an<sup>-1</sup> (PRASAC 2005).

La végétation est éparse et composée de savanes arborées et de forêts claires sèches. Le paysage est fortement marqué par l'activité agricole qui maintient des parcs arborés dominé par l'extension des *Combretum spp.*, des *Terminalia spp.* et du *Vitellaria paradoxa* (karité). Dans les zones de pression agricole importante, la brousse devient très réduite et les densités d'arbres dans les parcs arborés n'atteignent que 6 individus par hectare en zone de culture alors qu'en zone de piedmont les densités peuvent atteindre 556 arbres par hectare (CASSAGNAUD 2001).

Tableau 1 : Inventaire réalisé en Novembre 2000 dans le campement peul d'Ouro Bouba Rarou (25 arbres sur 0,8 ha)

Essences	Répartition ( % )
<i>Vitellaria paradoxa</i>	44
<i>Terminalia glaucescens</i>	20
<i>Anogeissus leiocarpus</i>	8
<i>Celtis integrifolia</i>	8
Autres	20

(NTOUTOUME 2000)

### 1.1.3 Milieu humain

---

1 Mot fulfuldé qui désigne la chefferie traditionnelle de premier degré dans la tradition peule musulmane (également appelée sultanat)

La zone d'étude se caractérise par des villages habités par des migrants installés à partir de 1976. Pour le village de Mafa Kilda proprement dit, ces migrants étaient originaires des environs de Mokolo et appartenaient à l'ethnie Mafa. La population de Mafa Kilda ne cesse de s'accroître depuis la création du village en 1984. En 1994, elle comptait 500 habitants (BRETENOUX 2001) et en 2002, 1100 habitants (BONNERAT 2002). La population a plus que doublée en huit ans et cet accroissement s'explique par la croissance démographique du village mais surtout par l'arrivée de nouveaux migrants (Figure 2). La zone est aujourd'hui dans une situation de saturation foncière, avec une densité de population qui varie entre 40 à 60 habitants au km<sup>2</sup>. Sur un même espace, diverses ethnies cohabitent, en particulier les Mafa de Mafa Kilda, les Peul et les Tupuri d'Israël Balani et les Laka de Sanguéré Ngal.

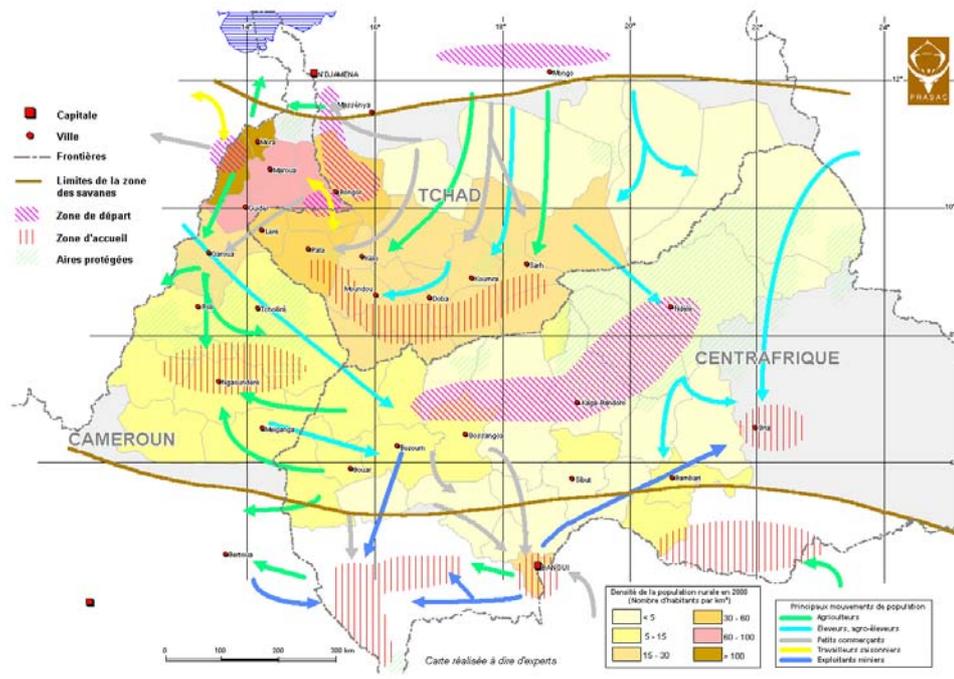


Figure 2 : Carte de migrations en zone Prasad

### 1.1.4 Contexte socio-économique

L'activité agricole est la principale activité économique et se différencie en fonction de l'appartenance ethnique. Les Mafa, qui sont à l'origine sédentaires et agriculteurs dans les monts Mandara s'orientent plus vers la culture du coton, de l'arachide, du

sorgho, du maïs et du niébé. Les Laka, qui sont originaires du Tchad et de tradition agricole, travaillent également la terre mais ils exercent en outre une activité de collecte du karité et effectuent sa transformation en beurre. Enfin, les Peul, nomades à l'origine, sont devenus des sédentaires à troupeaux transhumants, avec une activité d'élevage surtout bovine. Mais, au moment de l'étude, tous les agriculteurs qui en ont les moyens possèdent également du bétail (principalement des chèvres et des bovins), et les éleveurs souhaitent devenir autosuffisants en céréale (maïs). De ce fait, une majorité des habitants de la région peuvent être considérés comme des « agro-pasteurs ».

## **1.2 LA PROBLEMATIQUE**

### **1.2.1 Durabilité de la ressource arborée**

La ressource arborée est utilisée pour différents usages tels que les productions ligneuses (bois de feu, bois d'œuvre) et non ligneuses (fruits, fourrages, pharmacopée). Différents groupes d'usagers peuvent être distingués pour une même ressource : les Peul qui prélèvent essentiellement des fourrages, les Mafa qui utilisent et commercialisent le bois et les Laka qui prélèvent principalement les fruits du karité pour la transformation en beurre. D'après les inventaires réalisés en 2000 par l'E.N.G.R.E.F. sur l'ensemble du territoire villageois, les espèces qui ont été émondées pour une raison ou une autre sont les suivantes : *Burkea africana*, *Daniellia oliveri*, *Vitellaria paradoxa*, *Afrormosia laxiflora* et *Terminalia glaucescens*. Sur les terres des Peul, l'importance du piétinement occasionné par les troupeaux empêche la régénération des arbres. Chez les autres ethnies, elle est limitée par le labour attelé et le sarclage. Ainsi, les classes d'arbres de petits diamètres sont absentes à l'exception des bandes anti-érosives où les arbres sont relativement protégés. D'autre part, le prélèvement excessif des différents produits issus des parcs arborés conduit à une constante diminution de la ressource arborée. La durabilité des parcs arborés est donc remise en question par l'augmentation de la pression démographique et par une mauvaise gestion.

### **1.2.2 L'arbre au centre de négociations entre groupes d'intérêts**

Différents intérêts et modes de gestion propres à chaque ethnie gravitent donc autour de la ressource arborée. A l'occasion de précédents voyages d'étude de l'E.N.G.R.E.F., en particulier en 2002, des négociations ont eu lieu entre les différents groupes concernés (éleveurs, agriculteurs, récolteurs) pour la mise en place d'une gestion communautaire durable des brousses et des parcs à karité.

Une des issues négociées était un émondage des karités tous les huit ans afin de satisfaire les différents usagers (Peltier, communication personnelle). Cependant, il est important de noter que la pratique de l'émondage, en particulier des espèces

protégées, est interdite par la loi. Des contrôles sont réalisés par des agents des Eaux et Forêts pendant la saison sèche et ceux-ci verbalisent parfois les contrevenants. Seule la mise en place effective d'une forêt communautaire pourrait légaliser ce type de gestion.

Dans cette situation de ressource limitée, la valorisation de l'arbre paraît indispensable pour l'avenir des parcs arborés.

### **1.2.3 M.D.P. : un mécanisme de promotion de l'arbre ?**

Dans le cadre de la coopération internationale de lutte contre le changement climatique (convention cadre de Washington), et suite au protocole de Kyoto (1997), trois mécanismes de lutte contre le réchauffement climatique ont vu le jour.

Tout d'abord, les permis d'émission négociables (P.E.N.) correspondent à un programme qui permet de vendre ou d'acheter des droits à émettre entre pays industrialisés. Puis, la mise en œuvre conjointe (M.O.C.) qui permet aux pays développés de procéder à des investissements visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre en dehors de leur territoire national et de bénéficier des crédits d'émission générés par les réductions ainsi obtenues. Enfin, le mécanisme de développement propre (M.D.P.), proche du dispositif précédent, à la différence que les investissements sont effectués par un pays développé, dans un pays en développement.

Dans le cadre des projets M.D.P., trois volets devraient permettre de réaliser des investissements dans les pays dits de l'annexe B (pays en développement ayant ratifié le protocole de Kyoto) pour la première période d'engagement qui s'effectue de 2008 à 2012.

En ce qui concerne le M.D.P., seules les actions de substitution d'énergies fossiles par de la biomasse et les actions de séquestration par boisement et par reboisement sont éligibles pour la première période d'engagement. Les activités de conservation des massifs forestiers, les plantations à usages multiples, l'agroforesterie et les reboisements sur terrains dégradés ne sont notamment pas éligibles pour la première période d'engagement mais pourraient l'être, lors de la seconde période qui débutera en 2012.

Les M.D.P. constituent donc une source de financement pour des actions de promotion de l'arbre dans les systèmes agraires dégradés en zone soudanienne et peuvent participer à la lutte contre la désertification. Ainsi, pour la seconde période d'engagement, il s'agirait d'un mécanisme intéressant, éventuellement mobilisable.

## 2 METHODE : PROTOCOLE DE MESURE DU CARBONE CONTENU DANS LA BIOMASSE AERIENNE DES ARBRES

### 2.1 LES OBJECTIFS

Les deux objectifs de l'étude sont la conception et le test d'une méthodologie pour un projet M.D.P., et l'estimation de la durabilité d'un parc à karité.

La réalisation d'une méthodologie pour un projet M.D.P., passe d'une part, par la mise en place d'équations allométriques permettant d'évaluer la biomasse stockée dans les troncs et le houppier d'un parc arboré à karité à partir de paramètres simples, tels que le diamètre à hauteur de poitrine ou la surface du houppier et, d'autre part, par le calcul de la production annuelle de biomasse récoltable par émondage (donc sans destruction du tronc et de la majeure partie du houppier), de façon à ne pas avoir à utiliser de l'énergie fossile.

Pour cela, notre étude s'attache à la vérification et à l'élaboration de tarifs de biomasse aisément utilisables. Il serait alors possible d'étendre ces calculs à de grandes surfaces grâce à des outils du type système d'information géographique, télédétection et inventaires avec mesures rapides de diamètres d'arbres sur le terrain. L'utilisation de ces équations permettra d'obtenir rapidement et facilement la quantité de biomasse des arbres, soit à partir de leur diamètre à hauteur de poitrine, soit par calcul de leurs surfaces de houppier sur photos aériennes ou images satellites.



Tout en réalisant ce travail de mesures purement biométrique, l'équipe s'attache à aider les agriculteurs, les éleveurs et les cueilleurs à trouver une méthode de récolte du bois et du fourrage qui soit productive sur le long terme, ce qui encouragerait tous ces usagers à protéger les arbres existants, voire à en conserver ou à en planter d'autres, au lieu de les détruire progressivement comme cela est encore le cas (

**Figure 3).**

**Figure 3 : Karité brûlé à la base par un agriculteur qui souhaite s'en débarrasser pour récolter le bois et réduire l'ombrage sur les cultures.**

## 2.2 CHOIX DU MATERIEL VEGETAL EMONDABLE

Notre étude porte essentiellement sur des mesures réalisées sur le Karité. En effet, cette essence est très présente dans les parcs arborés de la zone étudiée. Il s'agit d'une essence utilisée par différents groupes d'intérêts. Son fruit est utilisé dans la transformation du beurre, son fourrage est utilisé en fin de période sèche (car peu appétant) et le bois émondé comme combustible.

## 2.3 LA PRATIQUE D'EMONDAGE

La pratique d'émondage est déjà répandue dans la zone d'étude mais chaque utilisateur choisit la durée de rotation en fonction de ses besoins propres, sans tenir compte des besoins des autres (exemple : rotation très courte pour les éleveurs, Figure 4). Les nombreux usages du karité (utilisation pour le fourrage, le bois de chauffe, les fruits et les produits de pharmacopée) encouragent le maintien des parcs arborés. Afin d'estimer la productivité des arbres, notre travail a porté sur des mesures d'arbres qui avaient déjà été émondés à dates connues. L'émondage a été réalisé par deux anciens « émondeurs » (un du village peul et l'autre du village de Mafa Kilda) en respectant leurs pratiques habituelles : conservation d'un tronçon de jeune bois à la base de chaque branche pour faciliter l'émission de rejets et, également, conservation de quelques branches non émondées pour « tirer la sève » et pour construire un houppier équilibré.

**Figure 4 : Arbre émondé après une rotation courte : le bois récolté est de petit diamètre**





Figure 5 : Karité avant et après émondage

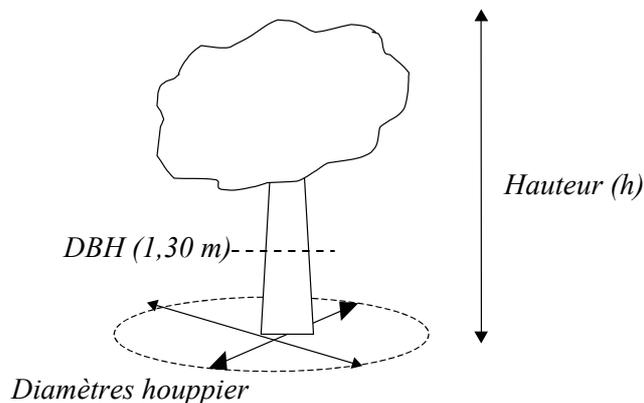
## 2.4 ESTIMATION DE TARIFS DE BIOMASSE

La phase de caractérisation générale de l'arbre passe notamment par la détermination de l'espèce, la localisation de l'arbre (relevé GPS, village, date) : ceci permet un suivi dans le temps du parc.

La phase de caractérisation précise de l'arbre consiste à effectuer des mesures de circonférence (en cm) à 1.30m à partir de laquelle on pourra déduire le DBH (en cm), des mesures de hauteur totale (en m) de l'arbre à l'aide d'un dendromètre, des mesures de deux diamètres perpendiculaires (en m) de la projection du houppier au niveau du sol, à l'aide d'un double décimètre pour pouvoir calculer la surface du houppier (en m<sup>2</sup>) qui sera assimilée à une ellipse. Sa surface du houppier est calculée par la formule :

$$S_{\text{houppier}} = (\pi / 4) \times \text{diamètre1} \times \text{diamètre2}$$

Figure 6 : Schéma récapitulatif des mesures de caractérisation de l'arbre



La phase d'évaluation de la biomasse humide aérienne (en kg) peut être divisée en deux parties :

- calcul de la biomasse humide émondée ;
- calcul de la biomasse humide non émondée.

### 2.4.1 La biomasse humide émondée ( $M_h E$ )

Les différentes ramifications de l'arbre sont repérées à l'aide d'un dessin d'ensemble. Les branches sont alors numérotées (Figure 7). La masse humide des branches émondée ( $m_h$ ) est estimée par pesée à l'aide de pesons de différentes précisions (2 kg, 5 kg et 50 kg). Afin d'établir une relation entre le diamètre à la base des branches et la masse, les diamètres à la base de toutes les branches émondées sont mesurés à l'aide d'un pied à coulisse.

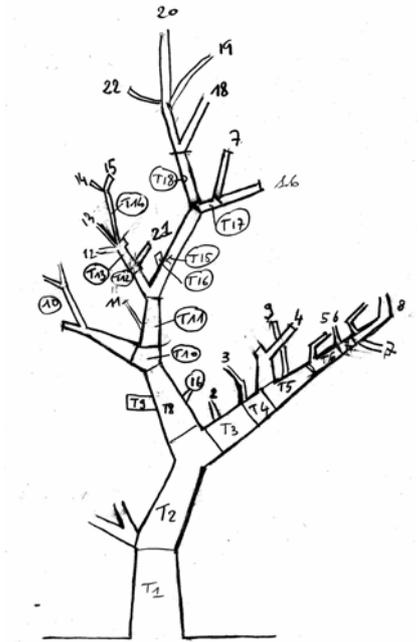


Figure 7 : Numérotations des tronçons et des branches mesurés.

## 2.4.2 La biomasse humide non émondée ( $M_h$ non E)

Les compartiments non émondés sont estimés à partir des mesures de volume et de densité et des relations obtenues entre le diamètre et la masse des branches. Les mesures suivantes sont effectuées :

- Les branches :

La biomasse des branches non émondée a été calculée par la relation circonférence à la base/masse des branches émondées. Pour cela la circonférence des branches non émondées a été mesurée à leur base.

- Les tronçons :

La longueur (en m) et la circonférence (C) médiane (en m) des tronçons de l'arbre sont mesurées à l'aide d'un mètre ruban afin d'obtenir leur volume. Les tronçons de l'arbre étant considérés comme des cylindres on obtient la formule suivante :

$$V_{\text{tronçons}} = (C^2 / 4\pi) \times L$$

La biomasse humide des tronçons est calculée à partir de ce volume et de la masse volumique humide. Pour calculer ce dernier paramètre, des échantillons conséquents de bois sont prélevés au hasard dans l'architecture de l'arbre, sans enlever l'écorce. La masse volumique humide est déterminée grâce à la formule :

$$\rho_h (\text{kg.m}^{-3}) = M_h / V_h$$

La masse humide est mesurée à l'aide d'un peson aussitôt après la coupe. Puis, le volume humide est estimé par immersion des échantillons dans un récipient d'eau et mesure du volume d'eau déplacé. Les échantillons sont ensuite placés à l'étuve à  $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ . Après stabilisation de la masse, ceux-ci sont sortis de l'étuve et pesés. La masse sèche est alors mesurée ( $M_0$ ). Le taux d'humidité est alors calculé à partir de la formule :

$$H (\%) = (M_h - M_0) / M_h$$

Le calcul de la masse volumique étant difficilement accessible pour le compartiment tronc (mesure destructive), elle sera mesurée pour le compartiment branche et rapportée au compartiment tronc. L'estimation de la biomasse du tronc se base sur les hypothèses que la densité du compartiment tronc est identique de celle du compartiment branche.

$M_h$  des branches non émondées calculée à partir de leur circonférence à la base et en utilisant un tarif de biomasse

$M_h$  des tronçons mesurée à partir de la masse volumique

$$M_h = V_h \times \rho_h$$

*Hypothèses : les tronçons sont considérés comme des cylindres et la masse volumique est identique dans les compartiments de l'arbre*

$M_h$  des branches émondées mesurée par pesée de toutes les branches non effeuillées ( $M_h E$ ) et par calcul du taux masse du bois/masse totale bois+feuilles sur un échantillon de branches

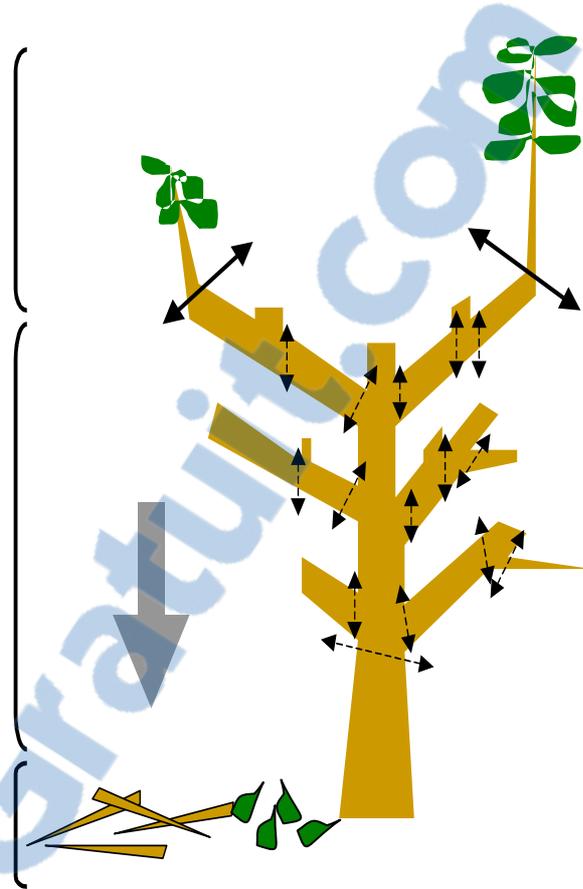


Figure 8 : Schéma récapitulatif de la détermination de la biomasse humide totale

## 2.5 LE STOCK DE CARBONE CONTENU DANS LE COMPARTIMENT AERIEN NON EMONDE

La biomasse sèche aérienne est calculée suivant la formule :

$$M_0 = M_h \times (1-H)$$

En se basant sur un pourcentage de carbone de 45% de la matière sèche (PONCE-HERNANDEZ 2004), le carbone stocké peut être évalué à partir de la formule suivante :

$$C_{\text{stocké}} (t) = (M_h \text{ non E} (t) \times (1-H)) \times 0.45$$

## 2.6 LA PRODUCTIVITE EN BOIS EMONDABLE

Les compartiments feuille et branche ont été pesé individuellement sur un échantillon de branches de chaque espèce (environ dix) afin de pouvoir calculer la

productivité raméale et foliaire. Par lecture des cernes des branches émondées, l'âge des branches est estimé en se basant sur l'hypothèse que les cernes sont annuels.



Figure 9 : Lecture des cernes sur une branche de *Vitellaria paradoxa*

$$\text{Productivité raméale} = \sum(M_h E / \text{âge}) \times (100 - \%_{\text{feuilles}}) / 100$$

$$\text{Productivité foliaire} = \sum(M_h E / \text{âge}) \times \%_{\text{feuilles}} / 100$$

## 2.7 ESTIMATION DE TARIFS DE BIOMASSE

L'estimation des tarifs de biomasse vise la mise en place de mesures simplifiées de la biomasse des arbres. La FAO propose des formules globales applicables pour tous les arbres de la planète, de manière générale, en utilisant un facteur de forme de 0.5 (PONCE-HERNANDEZ 2004).

$$\text{Volume} = G \times H / 2$$

hauteur totale de l'arbre : noté H

A l'occasion de cette étude, différents tarifs de biomasse ont été estimés à partir des relations biomasse / DBH, biomasse / hauteur et biomasse / surface houppier.

## 2.8 ESTIMATION DE LA BIOMASSE TOTALE MOYENNE

Suite aux négociations entre les différents acteurs (agriculteurs, éleveurs, récolteurs), il a été décidé de réaliser une rotation de 8 ans, entre deux émondages, dans les parcs arborés. Dans ces conditions, cela signifie que la biomasse moyenne du bois de la partie aérienne des arbres dans un parc arboré peut être grossièrement estimée par la somme de la biomasse non émondée auquel on ajoute la masse des branches après quatre ans de croissance (moitié de la rotation). Ainsi :

Biomasse totale moyenne = biomasse non émondée + 4 x productivité raméale

## 2.9 ANALYSE DES TRAITEMENTS DE DONNEES

Les données récoltées sur le terrain ont été saisies sous Microsoft© Excel pour chaque arbre, en séparant les différents compartiments (branches émondées, branches non émondées et tronçons). Une feuille Excel de synthèse a également été réalisée afin de faciliter l'analyse statistique, réalisée sous XLSTAT. Les modèles théoriques choisis sont du type puissance ( $y = a.X^b$ , où  $a$  et  $b$  sont des constantes). Le coefficient de détermination est calculé afin de rendre compte du pourcentage explicatif de la variable  $X$  dans le modèle sélectionné. Un test de Fisher est finalement réalisé afin d'évaluer le risque d'erreur quant à l'utilisation d'un tel modèle par rapport à un modèle de type  $y = \text{constante}$ . Le rejet de l'hypothèse nulle ( $H_0$ ) se fait si la probabilité de se tromper est supérieure à 5%.

### 3 RESULTATS

#### 3.1 ÉLABORATION D'UN TARIF DE BIOMASSE POUR LES COMPARTIMENTS BRANCHES

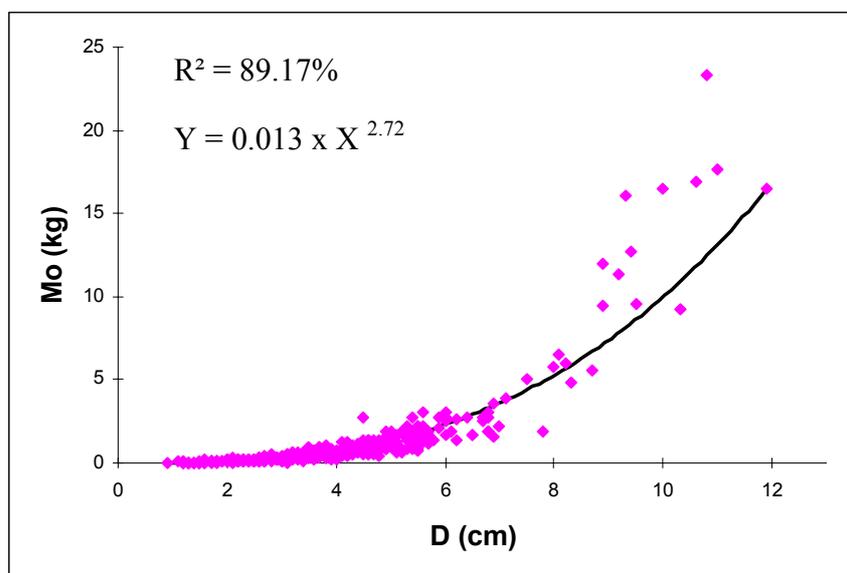
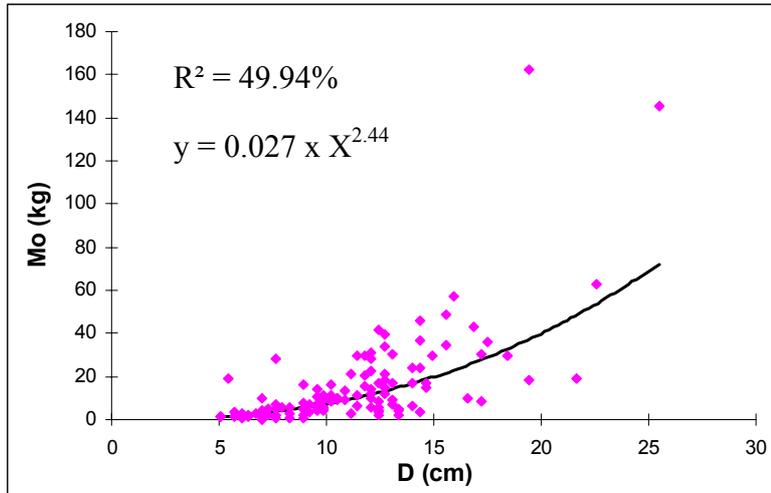


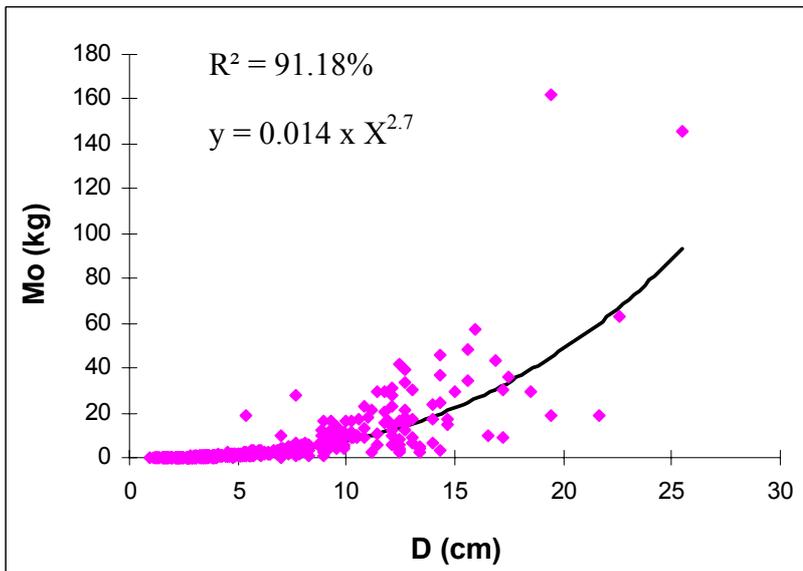
Figure 10 : *Vitellaria paradoxa* (Karité) : Biomasse sèche du bois des branches émondées en fonction de leur diamètre à la base

L'analyse graphique (Figure 10) montre qu'il existe une bonne corrélation entre la biomasse sèche du bois des branches de Karité et leurs diamètres respectifs. Le modèle utilisé ( $Y = a.X^b$ ) est performant pour les diamètres de branches inférieurs à 7 cm ; au-delà il semble moins approprié et tend à sous-estimer la biomasse des branches de diamètre important. La relation obtenue entre les diamètres des branches et leur biomasse explique à 89.17 % la variabilité. Le test de Fisher montre que le modèle est significatif (risque = 0,01 %).



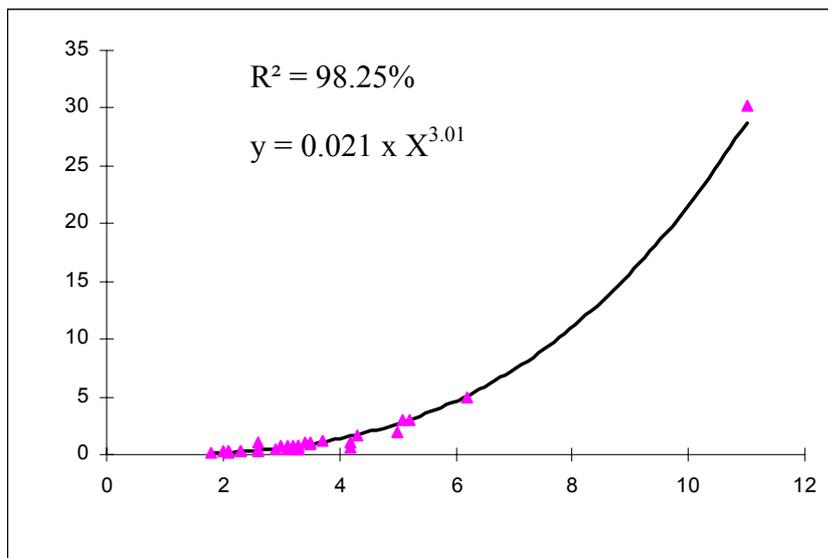
**Figure 11 : Biomasse sèche du bois des branches en fonction du diamètre à la base à la ramification 1 pour *Vitellaria paradoxa***

Afin d'améliorer la relation dans les classes de gros diamètres, les branches émondées issues d'une même ramification ont été regroupées. Le graphique (Figure 11) présente donc la biomasse sèche de ces branches en fonction de leur diamètre à la base. La corrélation est beaucoup plus faible ( $R^2 = 50 \%$ ).



**Figure 12 : Biomasse sèche du bois des branches de ramification 1 et les branches émondées en fonction de leur diamètre à la base pour *Vitellaria paradoxa***

Enfin, le graphique (Figure 12) a été réalisé en compilant les deux graphiques précédents. Il regroupe à la fois les branches émondées en fonction de leur diamètre, ainsi que les branches issues d'une même ramification 1, en fonction du diamètre à la base. Cela permet donc de prendre en compte des branches de gros diamètre. La corrélation est améliorée ( $R^2 = 91 \%$ ) grâce à l'introduction des branches émondées (de petits diamètres). Le modèle utilisé est toujours du type puissance et permet d'avoir une équation intermédiaire prenant en compte petites et grosses branches.



**Figure 13 : *Anogeissus leiocarpus* : Biomasse sèche des branches en fonction de son diamètre à la base**

L'analyse graphique (Figure 13) montre qu'il existe une bonne corrélation entre la biomasse sèche des branches et leurs diamètres respectifs pour *Anogeissus leiocarpus*. Le modèle utilisé ( $y = a.X^b$ ) est correct. Cependant, il ne peut pas être validé statistiquement en raison d'un échantillonnage trop restreint. Les diamètres des branches expliquent à 98 % la variabilité de la biomasse sèche. Le modèle est significatif par application d'un test de Fisher (risque = 0,01 %).

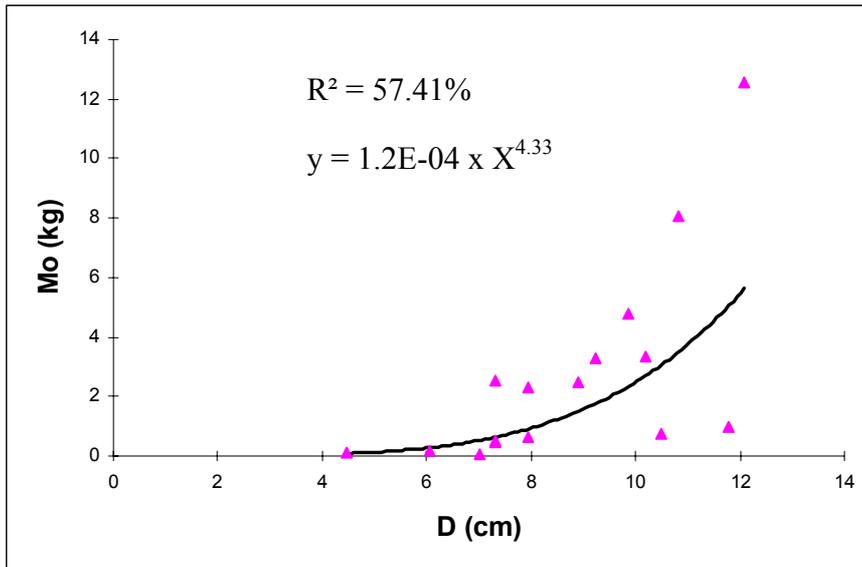


Figure 14 : Masse sèche des branches en fonction du diamètre à la base des ramifications 1 pour *Anogeissus leiocarpus*

Afin d'améliorer la relation dans les classes de gros diamètres, les branches émondées issues d'une même ramification ont été regroupées. Le graphique (Figure 14) présente donc la biomasse sèche de ces branches en fonction de leur diamètre à la base des ramifications 1. La corrélation est beaucoup plus faible ( $R^2 = 63 \%$ ).

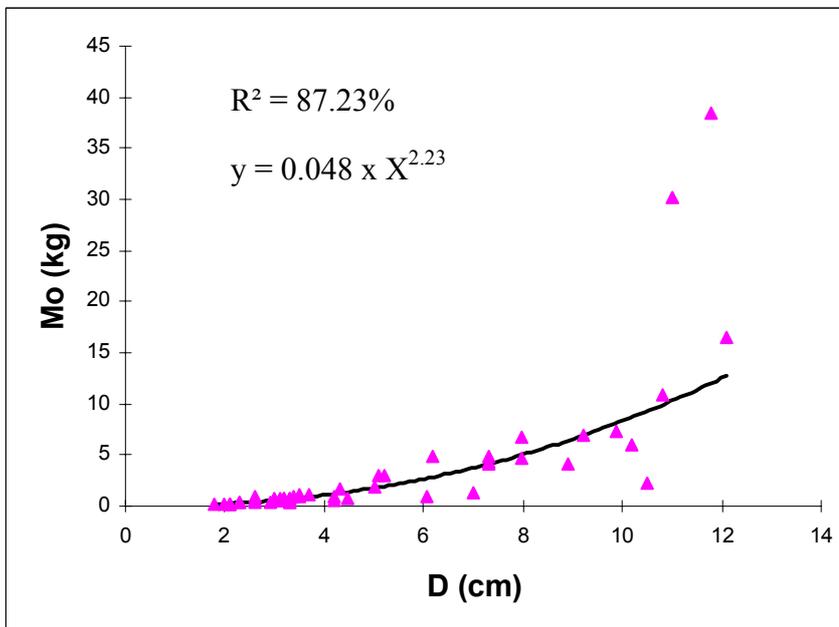


Figure 15 : Masse sèche des branches en fonction du diamètre à la base des ramification 1 et des branches émondées pour *Anogeissus leiocarpus*

Comme il a été fait précédemment pour le Karité, les branches de ramification 1 sont ajoutées aux branches émondées afin d'avoir des classes de diamètre important (Figure 15). Le modèle ne permet pas d'expliquer les variations pour des diamètres importants. La corrélation est moins bonne (87%) que celle obtenue avec les branches émondées seules, mais permet d'affiner le modèle statistique choisi avec un risque inférieur à 5% (test de Fisher).

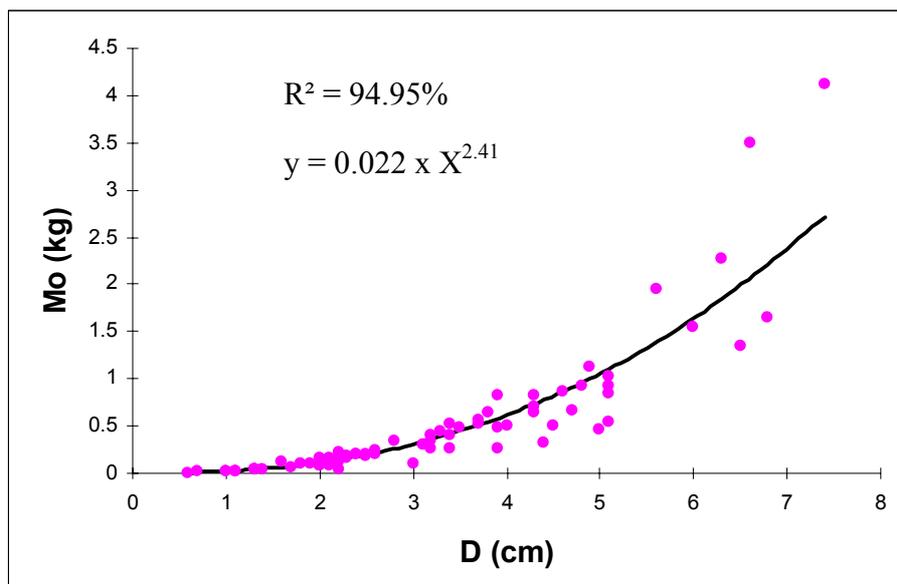
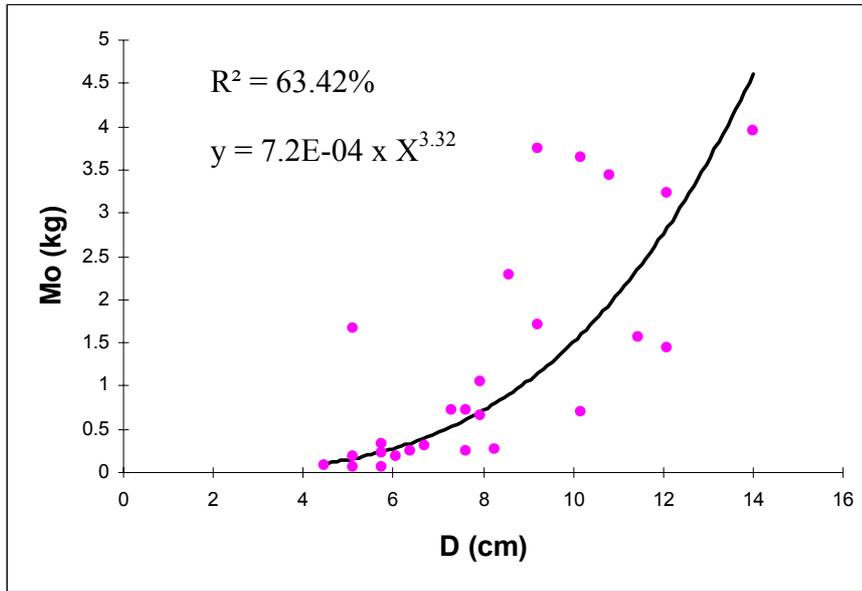


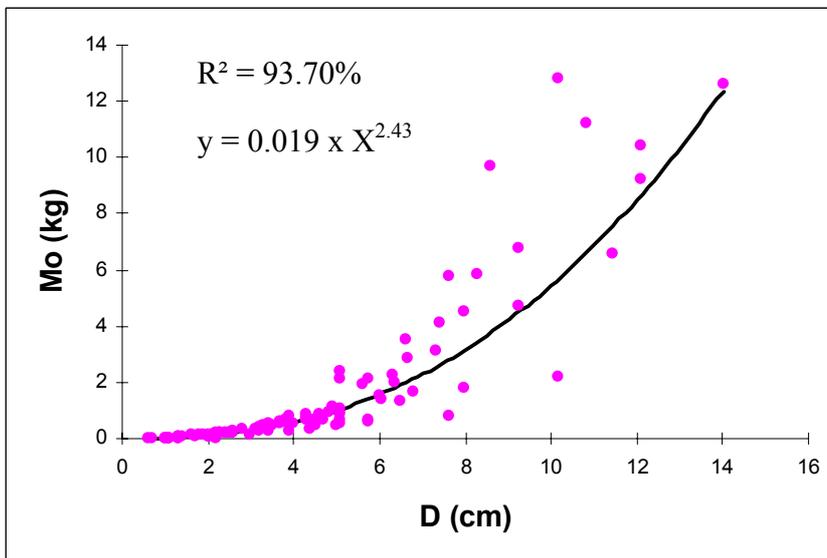
Figure 16 : *Combretum nigricans* : Biomasse sèche du bois des branches en fonction de son diamètre à la base

L'analyse graphique (Figure 16) montre qu'il existe une bonne corrélation entre la biomasse sèche des branches et leurs diamètres respectifs pour *Combretum nigricans*. Le modèle utilisé ( $y = a.X^b$ ) semble performant pour l'ensemble des données. Les diamètres des branches expliquent à 95 % la variabilité de la biomasse sèche. Le modèle est significatif par un test de Fisher (risque = 0,01 %).



**Figure 17 : Masse sèche du bois des branches émondées en fonction du diamètre à la base des ramification 1 pour *Combreton nigricans***

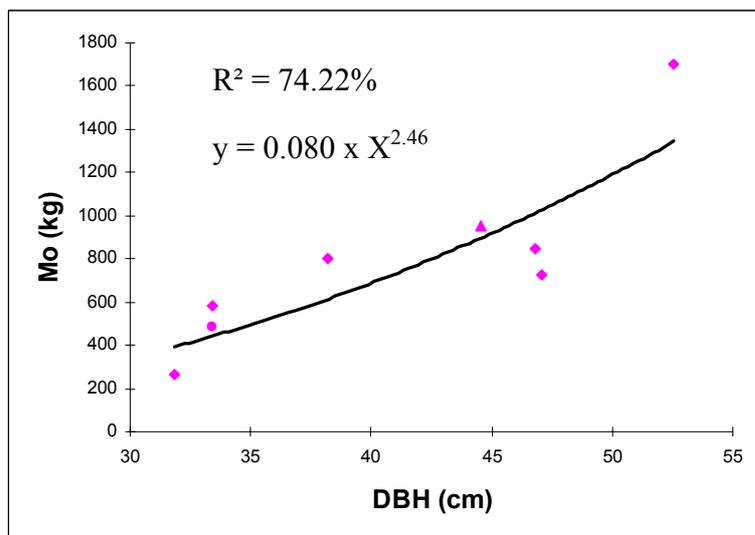
Le graphique (Figure 17) présente la biomasse sèche de ces branches en fonction de leur diamètre à la base des ramifications 1. La corrélation est beaucoup plus faible que le graphique précédent ( $R^2 = 63\%$ ).



**Figure 18 : Masse sèche du bois des branches non émondées en fonction du diamètre à la base des ramification 1 et des branches émondées pour *Combreton nigricans***

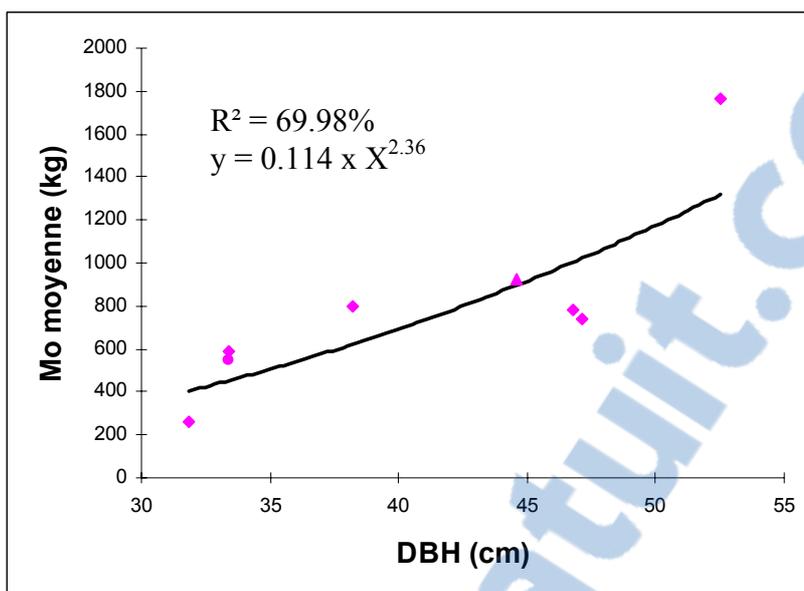
Puis, le regroupement des branches émondées en fonction de leur diamètre, ainsi que les branches issues d'une même ramification 1, en fonction du diamètre à la base permet d'introduire des branches de gros diamètre dans le modèle (Figure 18). La corrélation est correcte (93%).

### 3.2 ESTIMATION DE TARIF DE BIOMASSE



**Figure 19 : Masse sèche totale du bois de la partie aérienne de l'arbre (partie émondée et non émondée) en fonction du DBH**

La représentation graphique (Figure 19) de la biomasse sèche ( $M_0$ ) en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DBH) pour les 3 essences étudiées (6 *Vitellaria paradoxa*, 1 *Anogeissus leiocarpus*, 1 *Combretum nigricans*) montre qu'il existe une certaine corrélation  $R^2 = 74\%$ . Les écarts observés ne peuvent pas être seulement expliqués par le fait que l'échantillonnage comprend différentes essences. En effet, il existe aussi une grande variabilité de biomasse chez le Karité (notamment pour les gros diamètres). Ceci s'explique par la forte hétérogénéité de formes architecturales et de la variabilité de la date du dernier émondage. Bien que le test de Fisher montre que le modèle est acceptable au risque de 0.60 %, l'échantillonnage restreint ne permet pas de valider la relation obtenue pour le moment.



**Figure 20 : Masse sèche totale moyenne du bois de la partie aérienne des arbres en fonction du DBH (masse moyenne = biomasse non émondée + 4 x productivité annuelle)**

La représentation graphique (Figure 20) de la biomasse sèche moyenne du bois de la partie aérienne des arbres pour une rotation de 8 ans ( $M_0$  moyenne) en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DBH) pour les 3 essences étudiées (6 *Vitellaria paradoxa*, 1 *Anogeissus leiocarpus*, 1 *Combretum nigricans*) montre une relation dont la corrélation est  $R^2 = 70\%$ . On observe une grande variabilité de biomasse chez le Karité. Bien que le test de Fisher montre que le modèle est acceptable au risque de 0.96 %, l'échantillonnage restreint ne permet pas de valider la relation obtenue pour le moment. Cependant, il semble que le calcul fait à partir de la productivité multiplié par un même nombre d'années, permet d'améliorer la relation par rapport à la précédente, calculée sur des arbres ayant subi des émondages à des taux et à des dates variables.

**Tableau 2: biomasse sèche totale des arbres**

Arbre	Espèce	Mo totale (kg)	Mo totale moyenne (kg)
a-1	Karité	798	795
a-2	Karité	725	736
a-3	Karité	1704	1764
a-4	Karité	585	589
a-5	Karité	261	260
a-6	Anogeissus	952	927
a-7	Combretum	487	544
a-8	Karité	847	782

Les similitudes observées entre la biomasse sèche moyenne calculée pour un arbre après quatre années de croissance et la biomasse sèche des arbres effectivement émondés par l'E.N.G.R.E.F. en 2001 et en 2005 (Tableau 2) montrent bien que la rotation théorique calculée s'accorde bien avec le délai réel depuis les derniers émondages pour la plupart des arbres mesurés. Ceci confirme l'hypothèse de l'annualité des cernes chez le Karité.

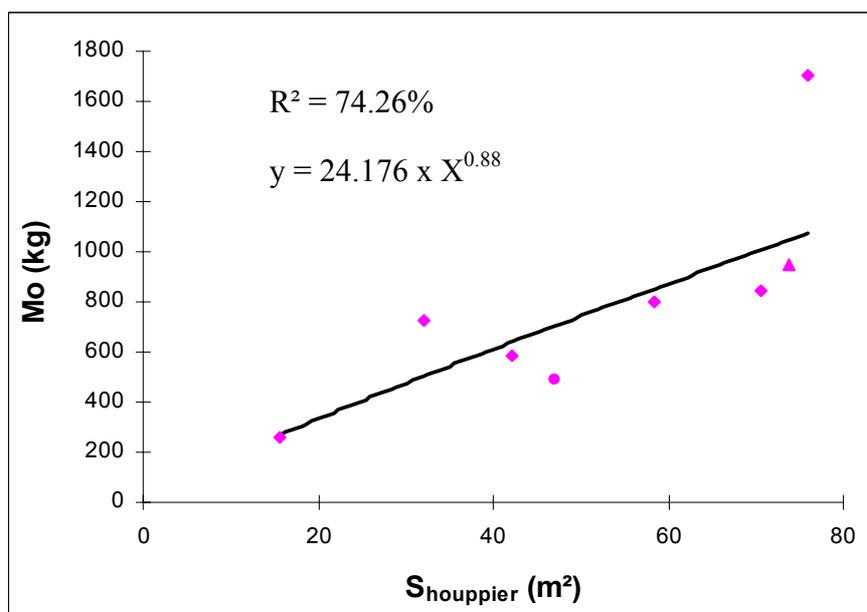


Figure 21 : Masse sèche totale du bois de la partie aérienne en fonction de la surface de houppier.

L'équation issue de l'analyse de la masse sèche en fonction de la surface du houppier est proche d'un modèle linéaire (Figure 21). Le coefficient de détermination de 74% montre que la relation est correcte.

Tableau 3 : Biomasse sèche des branches en fonction de leur diamètre à la base (Rappel)

	<i>Vitellaria paradoxa</i> (Karité)	<i>Anogeissus leiocarpus</i>	<i>Combretum nigricans</i>
Équation	$y = 0,014 * x^{2.86}$	$y = 0,021 * x^{3.01}$	$y = 0,022 * x^{2.41}$
Coefficient de détermination (R²)	94,41%	98,25%	94,95%
Risque (F>Pr)	0,01 %	0,01 %	0,01 %

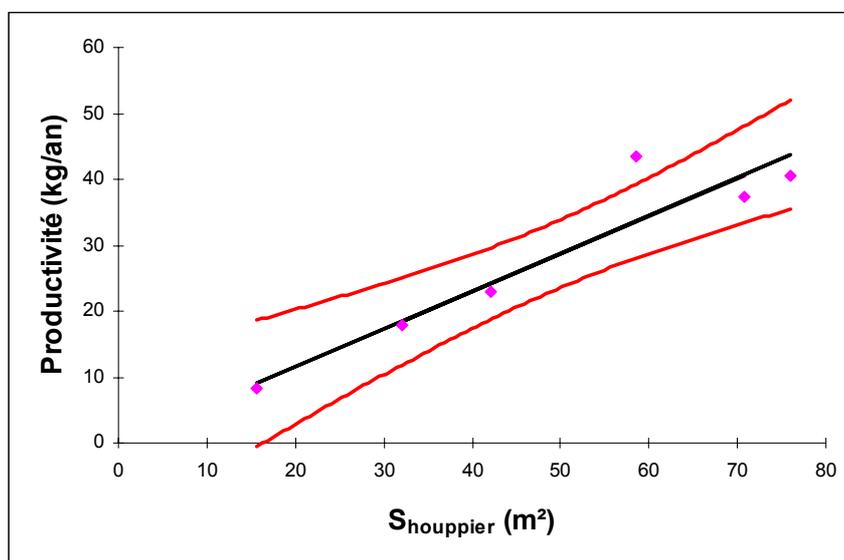
On entend ici par risque la probabilité qu'un modèle plus simple explique aussi bien la variabilité des données que le modèle utilisé ( $y = a \times X^b$ ). Ce risque est ici de 0.01% (Tableau 3).

**Tableau 4 : Productivité raméale du Karité, de l'*Anogeissus leiocarpus* et du *Combretum nigricans***

Arbre	Espèce	Productivité en bois (kg/an)	Mo/Mh moyen	Mo bois E (kg)
a-1	Karité	43	0.62	176
a-2	Karité	18	0.62	61
a-3	Karité	41	0.62	101
a-4	Karité	23	0.62	87
a-5	Karité	8	0.62	34
a-6	Anogeissus	13	0.67	77
a-7	Combretum	30	0.57	64
a-8	Karité	37	0.62	214

La productivité en bois ( $\text{kg}\cdot\text{an}^{-1}$ ) est très hétérogène pour le Karité (Tableau 4). Aucune corrélation entre productivité / DBH et productivité / hauteur de l'arbre n'a pu être mise en évidence. Il n'est pas encore possible d'analyser les données provenant de l'*Anogeissus leiocarpus* et du *Combretum nigricans* (un seul arbre émondé).

**Figure 22 : Productivité raméale en fonction de la surface du houppier du Karité**



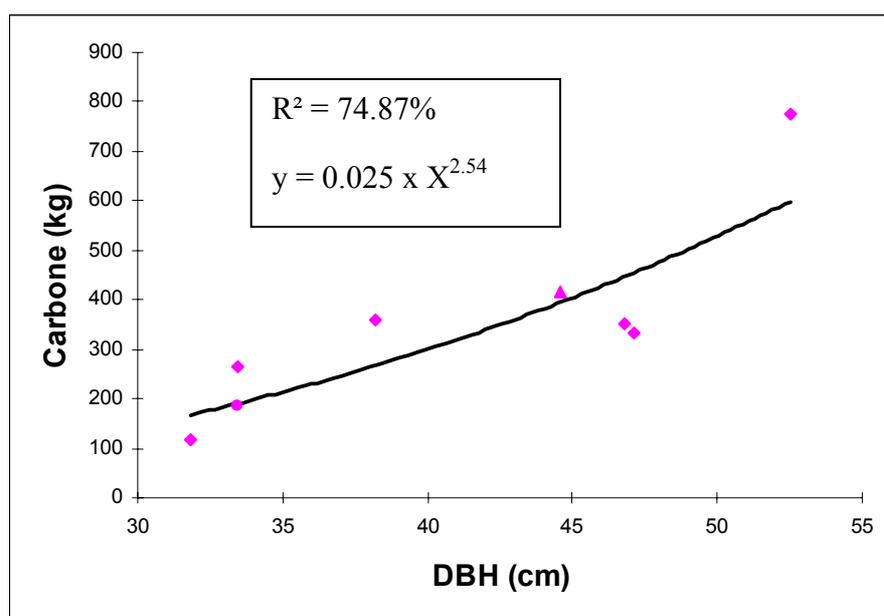
Il existe une assez bonne relation entre productivité et surface du houppier ( $R^2 = 88\%$ ) (Figure 22). Les intervalles de confiance à 95 % (en rouge sur le graphique)

montrent qu'il n'y a qu'un seul arbre pour lequel le modèle est peu significatif (en dehors de l'intervalle de confiance).

**Tableau 5 : Humidité moyenne (%) des essences étudiées**

Espèce	Humidité moyenne (%)	Ecart-type
Karité	38	5.6
Anogeissus	33	
Combretum	43	

Le tableau ci-dessus montre que l'humidité moyenne du Karité est de 38 % (taux calculé sur 13 échantillons provenant de 6 Karités). L'écart-type est relativement important (5,6). *Anogeissus leiocarpus* a un taux d'humidité plus faible (33 % calculé sur 3 échantillons) ; *Combretum nigricans* a un taux d'humidité de 43 % (calculé sur 2 échantillons). Les taux d'humidité d'*Anogeissus leiocarpus* et de *Combretum nigricans* ne sont ici qu'à titre indicatif, et ne peuvent être validés dans cette étude (échantillonnage trop restreint).



**Figure 23 : Stock moyen de carbone de la partie aérienne des arbres en fonction du DBH**

L'analyse graphique (Figure 23) montre qu'il existe une bonne corrélation entre le stock moyen de carbone par arbre et le DBH pour tous nos arbres ( $R^2 = 75\%$ ). Le modèle utilisé ( $y = a.X^b$ ) semble performant pour l'ensemble des données. Test de Fisher : risque de 0,55 %.

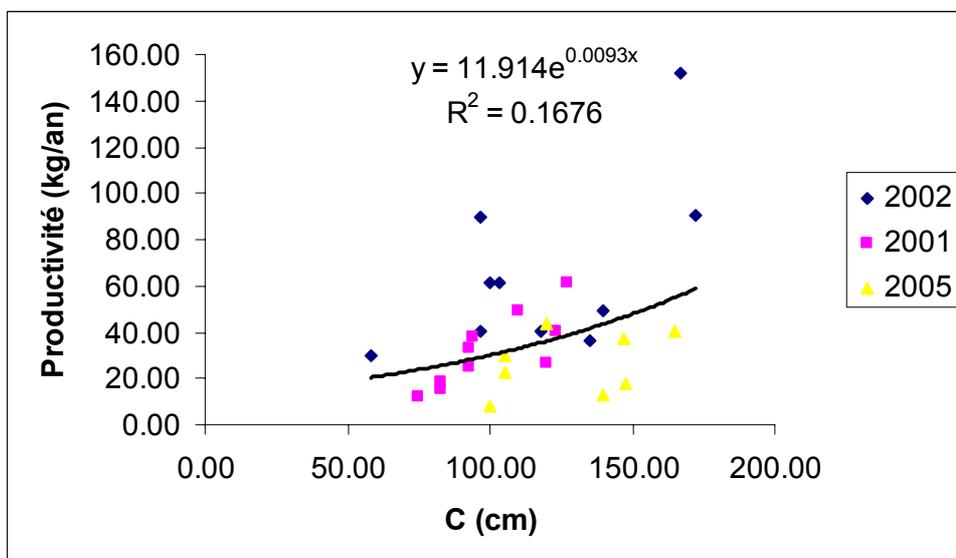


Figure 24 : Productivité raméale (bois sec) pour le Karité issue des études menées

Les résultats issus des travaux des années précédentes ont été convertis en masse sèche avec les résultats obtenus cette année. Les résultats concernant la productivité raméale sont alors comparables (Figure 24). Il apparaît une grande variabilité entre les résultats obtenus lors des différents travaux.

Tableau 6 : Estimation du carbone stocké sur pieds et récolté annuellement au niveau de la parcelle d'Ouro Bouba Rarou (31 arbres/ ha)					
Classe de C (cm)	Densité (arbre/ha)	Stock C non émondé moyen/arbre (kg)	C récolté moyen/arbre (kg/an)	Stock C non émondé total (kg)	C récolté total (kg/an)
[0;15[	1.24	0.1	5.6	0.1	6.9
[15;35[	1.24	4.9	6.7	6.1	8.4
[35;55[	3.72	22.0	8.1	81.9	30.3
[55;75[	4.96	56.1	9.8	278.2	48.7
[75;95[	7.44	110.9	11.8	825.3	87.9
[95;115[	4.96	189.8	14.2	941.6	70.6
[115;135[	3.72	295.8	17.1	1100.2	63.8
[135;155[	2.48	431.4	20.6	1069.8	51.2
[155;+[	1.24	599.2	24.9	743.0	30.8
TOTAL carbone/ ha				5046	399

Le carbone stocké et récolté a été calculé à partir des données concernant la densité des arbres au niveau des champs d'Ouro Bouba Rarou obtenues en 2002 par les étudiants de l'E.N.G.R.E.F. En se référant aux relations reliant le DBH au carbone stocké et récolté, il apparaît qu'environ 5000 kg de carbone sont stockés par ha et 400 kg récoltés par ha/an.

## 4 ANALYSE

### 4.1 LES MESURES DE POIDS

Les différents pesons utilisés sur le terrain ont des précisions variables (peson de 50 kg :  $\pm 1$  kg, peson de 5 kg :  $\pm 25$  g, peson de 2 kg :  $\pm 10$  g). Il ne semble pas que l'erreur liée aux mesures à l'aide de pesons soit importante pour les mesures des branches. L'erreur est considérée comme négligeable par rapport à la masse totale des branches par arbre.

### 4.2 L'ESTIMATION DE LA MASSE VOLUMIQUE

L'hypothèse d'homogénéité de la densité du bois quelque soient les compartiments aériens de l'arbre n'est pas vérifiée statistiquement mais paraît correcte. Le rapport entre la masse anhydre et la masse humide est de 0,62 pour le Karité, pour *Anogeissus leiocarpus* il est plus élevé (0,67) et plus faible pour le *Combretum nigricans* (0,57). La variabilité observée pour les résultats concernant le taux d'humidité peut être expliquée par l'erreur liée à la pesée des échantillons (moyenne : 38% ; écart-type : 5,6) qui a été réalisée à l'aide du peson de 2 kg. De plus, seulement 13 échantillons ont été prélevés et ils ne peuvent pas justifier statistiquement la moyenne utilisée.

### 4.3 RECHERCHE D'UN MODELE PLUS AJUSTE POUR LE TARIF DES BRANCHES

La modélisation par une fonction puissance de la relation entre le diamètre des branches et la biomasse ne peut être appliquée pour des diamètres importants. L'échantillonnage plus important des branches de petit diamètre tend à écraser la courbe et à sous estimer le poids des branches de diamètre important. Le modèle est validé statistiquement car les échantillons de petit diamètre sont nombreux mais la relation ne semble pas expliquer les variations observées pour des diamètres importants.

D'autre part, les résidus issus de la régression semblent se structurer pour des diamètres importants. L'ensemble des résidus sont positifs (Annexe n°1, Figure 25). Cette observation n'est pas validée par un test statistique car les échantillons de diamètre important sont peu nombreux. Mais il semble que le modèle proposé par une fonction puissance est donc mal ajusté et ne peut pas être utilisé pour des diamètres importants. La réalisation de deux modèles, l'un pour les petits diamètre et l'autre pour les diamètres importants ne peut être justifié d'un point de vue biologique. Aussi, il a semblé plus intéressant d'établir une relation linéaire entre le diamètre et la racine cubique du poids. En effet, il y a une relation évidente entre une longueur et une variable volume qu'il faut ramener à une longueur pour pouvoir

obtenir une relation linéaire. Aussi la relation linéaire  $\sqrt[3]{y} = ax + b$  (avec  $b = 0$ ) a été établie (annexe 1, Figure 26). La relation obtenue, même si la corrélation observée est moins correcte que celle observée avec un modèle puissance, est plus logique et les résidus ne sont pas structurés. Une relation du type  $Mh = 0.008 \times D^3$  a été obtenue.

#### **4.4 LA PRODUCTIVITE RAMEALE**

La précision de la lecture et de l'annualité des cernes est vérifiée par la similitude des équations entre biomasse sèche totale et biomasse sèche totale moyenne. En effet, les résultats théoriques calculés pour un accroissement de quatre ans sont similaires à ceux mesurés sur le terrain sur des arbres émondés en 2001 puis en 2005. Par contre, les mesures de productivité raméale sont très différentes des résultats obtenus les années précédentes (BONNERAT 2002) et sont être difficilement comparables. Ceci peut être expliqué par un calcul différent du rapport masse de bois/ masse totale des branches. En effet, en 2002, la masse des petits rameaux n'avait pas été prise en compte dans les compartiments branches. Pour certaines données, il peut aussi y avoir eu des incertitudes dans le calcul de l'âge des branches. La variable qui semble le mieux expliquer les variations de productivité au sein des arbres mesurés est la surface du houppier.

#### **4.5 L'EVALUATION DU CARBONE STOCKE**

Les estimations de stock de carbone au niveau de la parcelle sont peu précises et assimilent le peuplement du parc arboré à l'échantillonnage réalisée (6 karités, 1 *Combretum nigricans* et 1 *Anogeissus leiocarpus*). Il est difficile de comparer les résultats d'étude avec des données issues de la bibliographie car les stocks de carbone mesurés ne correspondent qu'au compartiment aérien.

## 5 DISCUSSION

### 5.1 ÉLABORATION D'UN TARIF DE BIOMASSE POUR LA MISE EN PLACE DE MDP : UNE NECESSITE D'AFFINER LES TARIFS DE BIOMASSE PRESENTS DANS LA LITTERATURE

Les méthodes de quantification du carbone stocké dans la biomasse aérienne proposées par la FAO (2004) se basent sur un facteur de forme qui tend à sous estimer la biomasse des arbres émondés ( $f = 0.5$ ). En effet, l'architecture des arbres se développant dans des zones où la pression de broutage et d'émondage est forte, implique une structure complexe des différents compartiments et le tronc ne peut donc être assimilé à un cylindre droit. Les formules présentées par la bibliographie sont adaptées pour des arbres comme l'Épicéa ou l'Eucalyptus mais lorsqu'elles sont appliquées à des arbres comme le Karité les écarts entre la biomasse théorique et celle mesurée sur le terrain sont importants.

Ainsi, les tarifs de biomasse nécessitent d'être affinés pour les différentes essences soudaniennes. Il est important de ne pas sous estimer la quantité de carbone contenue dans les parcs arborés de ces régions. La densité des arbres est certes faible mais une sous estimation de la quantité de carbone stocké pourrait exclure l'éligibilité des programmes M.D.P. de ces systèmes agroforestiers.

D'après les mesures qui ont été réalisées sur le terrain, la relation entre le DBH et la biomasse sèche est correcte mais l'échantillonnage restreint ne permet pas une validation statistique. Ainsi, il serait nécessaire pour les prochaines études de valider cette relation. En effet, il s'agit d'une relation qui permettrait une estimation rapide et applicable sur le terrain du stock sur pied.

D'autre part, la relation entre la surface du houppier et la biomasse sèche est également correcte mais l'échantillonnage restreint ne permet pas de validation statistique. La validation de cette relation pourrait permettre, à partir d'images satellite, une estimation de la biomasse totale stockée sur pied, à l'échelle d'une parcelle, voire d'une région. Cependant, il faut bien identifier, pour chaque groupe d'espèces, la relation entre surface du houppier et biomasse aérienne, en se référant aux pratiques locales ou à des pratiques normalisées, qui pourraient être négociées puis appliquées dans le cadre de forêts communautaires. En effet, la pratique d'émondage affecte de manière importante le houppier et sa surface peut en être parfois fortement réduite. Aussi, les individus de la même espèce qui sont non-émondés ont des surfaces de houppier plus importantes.

En ce qui concerne la réalisation de projets M.D.P., il est nécessaire d'estimer le carbone contenu dans les parties souterraines et au niveau des strates herbacées

lorsque celles-ci existent. Il est important de noter que les cultures annuelles ne doivent pas être prise en compte. L'estimation du carbone contenu dans ces compartiments est complexe. En effet, les mesures de carbone stocké dans la biomasse racinaire sont destructives. Leurs réalisations vont à l'encontre des intérêts des agriculteurs et nécessitent un investissement lourd. Aussi, l'estimation de la biomasse du compartiment racinaire doit être fait en se référant aux informations issues de la bibliographie. Il conviendrait mieux d'utiliser des données concernant la proportion de biomasse racinaire par rapport à la biomasse aérienne pour des essences similaires.

## 5.2 ENTRE M.D.P. ET PRATIQUES PAYSANNES

La mise en place d'un projet M.D.P. concernant les pratiques agroforestières implique une densification du peuplement de Karité ou d'autres espèces éventuelles. Pour ce qui est du Karité, il est important de noter que les densités de la zone étudiée sont importantes et qu'une densification ne peut être faite sans création d'une filière pour la commercialisation du beurre par exemple. En effet, le Karité n'est pas une espèce très recherchée, en matière de fourrage par les Peul ou, en matière de bois combustible ou de bois d'œuvre par l'ensemble des usagers. D'autres essences semblent plus convoitées par les populations comme *Azelia africana* et *Khaya senegalensis* pour les Peul et divers fruitiers locaux ou exotiques par les autres ethnies.

Il est donc nécessaire d'analyser les autres espèces potentiellement implantables dans ces environnements. Il s'agirait de densifier le peuplement arboré, tout en maintenant une diversification et non pas de favoriser une essence parmi d'autres, au risque de créer son déclin en cas de disparition du marché. La densification d'un peuplement arboré doit être réfléchi en fonction des pratiques paysannes, afin d'optimiser l'adéquation entre les activités agricoles et les usages de la ressource arborée.

Afin de donner un ordre d'idée très grossier, il a été estimé que les carbone stocké dans la biomasse aérienne d'un parc à karité de densité moyenne (30 arbres / ha) est d'environ 5 tonnes/ ha. Une évaluation du stock total de carbone avec le sol et les racines pourrait être de 7,5 tonnes / ha. Le doublement de la densité d'un tel parc ou la création d'un parc par sélection ou plantation de jeunes arbres, dans les zones où il n'en existe pas (près de la route nationale par exemple), permettrait de stocker 7,5 tonnes / ha. Si la tonne de carbone stockée était payée, sous forme de crédits de carbone temporaires, à 10 dollars /T, ceci ne représenterait qu'un gain de 75 dollars soit 37 500 FCFA par hectare, pour une période de 50 ans. Ce montant peut sembler dérisoire mais il pourrait permettre de verser des primes suffisantes pour encourager les agriculteurs à enrichir leurs parcs, comme cela a été fait avec succès par le projet D.P.G.T., pour le *Faidherbia albida*, dans la province de l'Extrême-Nord, avec des primes de seulement 100 FCFA/ arbres.

D'autre part, le volet substitution des énergies fossiles prévue par les M.D.P. est actuellement éligible et pourrait s'orienter vers l'utilisation du compartiment bois combustible émondé. Pour cela il est nécessaire de légaliser un marché concernant une pratique d'émondage aujourd'hui interdite. Une révision des lois concernant les pratiques d'émondage des espèces protégées nécessite d'être étudiée, afin de pouvoir prendre en compte le volet substitution. Il est également important de noter que la durée de rotation d'un émondage tous les huit ans semblent un bon compromis alliant les différents intérêts.

Il peut être envisageable d'ajouter le volet substitution d'énergies fossiles des M.D.P. en prenant en compte la production de bois émondable. Les crédits de carbone pour le volet substitution semblent avoir une valeur économique plus importante, de l'ordre de 30 dollars/ T. Une récolte de 0.4 T/ha/an correspondrait alors à un crédit de 6000 FCFA/ha/an. C'est ainsi que ce volet pourrait représenter des sommes considérables au niveau d'une commune ou d'une préfecture et cela pourrait largement financer de manière durable les actions de soutien à l'agroforesterie (encadrement, primes, formation...). Cette hypothèse mérite donc d'être explorée à l'avenir, même s'il ne sera pas facile de prouver qu'il y a bien substitution.

Enfin, la création d'un marché est indispensable puisqu'elle conditionne à la fois le développement de filières comme par exemple le beurre de karité ou les produits pharmacologiques ainsi que la vente du bois de feu. Des études de marché pourraient permettre d'estimer la valeur économique des produits non ligneux. Leur importance, dans un contexte M.D.P., peut conditionner la survie des parcs arborés, en cas de replis des financements M.D.P. suite, par exemple, à une chute du prix du carbone sur le marché international.

Pour finir, la réalisation d'un projet M.D.P. implique des coûts quand à la réalisation d'une méthodologie. Il est nécessaire de pouvoir estimer la viabilité d'un projet M.D.P., c'est-à-dire de connaître à partir de quelle surface la réalisation d'un projet M.D.P. est viable. Un autre groupe d'étudiants de l'E.N.G.R.E.F. s'est plus particulièrement intéressé à l'applicabilité d'un projet M.D.P.

## CONCLUSION

L'application de la méthodologie nous a permis de valider son applicabilité et, malgré des mesures longues et fastidieuses, nous a permis d'obtenir des résultats fiables. L'étude montre que la réalisation de tarifs de biomasse à partir du DBH et de la surface du houppier est intéressante et pourraient permettre la mise en place de système d'évaluation du stockage du carbone, au niveau d'un parc arboré, voire d'une région. Cependant, cette étude ne prend pas en compte le stockage du carbone au niveau du sol, des racines et de la strate herbacée spontanée ou cultivée. De plus, l'éventail d'essences étudiées reste faible (peu de gros et de petits arbres). D'autres études sont nécessaires pour estimer d'un point de vue global la quantité de carbone totale d'un parc arboré et son accroissement annuel.

La réalisation des projets M.D.P. ne peut être envisageable sans la création de filières pour les produits ligneux et non ligneux. En effet, les projets M.D.P. sont à leurs balbutiements, puisque la tonne de carbone n'est entrée en bourse qu'en février 2005 : ainsi, les revenus occasionnés par ces projets ne sont pas encore bien connus. Par ailleurs, les sources de revenus issus du stockage du carbone ne doivent pas perturber les pratiques locales, d'autant plus qu'elles dépendent d'un marché international sur lequel ne peuvent intervenir les paysans.

Les résultats concernant la productivité des arbres montrent que les méthodes d'émondage basées sur une rotation de huit ans semblent être un bon compromis, afin de permettre aux différents usagers de pouvoir prélever de manière durable les produits qui conditionnent leurs activités. Pour que ceci se prolonge dans l'avenir, il est nécessaire de réfléchir à la régénération de la ressource arborée.

Cependant, très peu de données concernent les produits ligneux et non ligneux. La valeur économique et sociale ainsi que les potentialités en matière de création de marché sont à estimer.

## ANNEXES

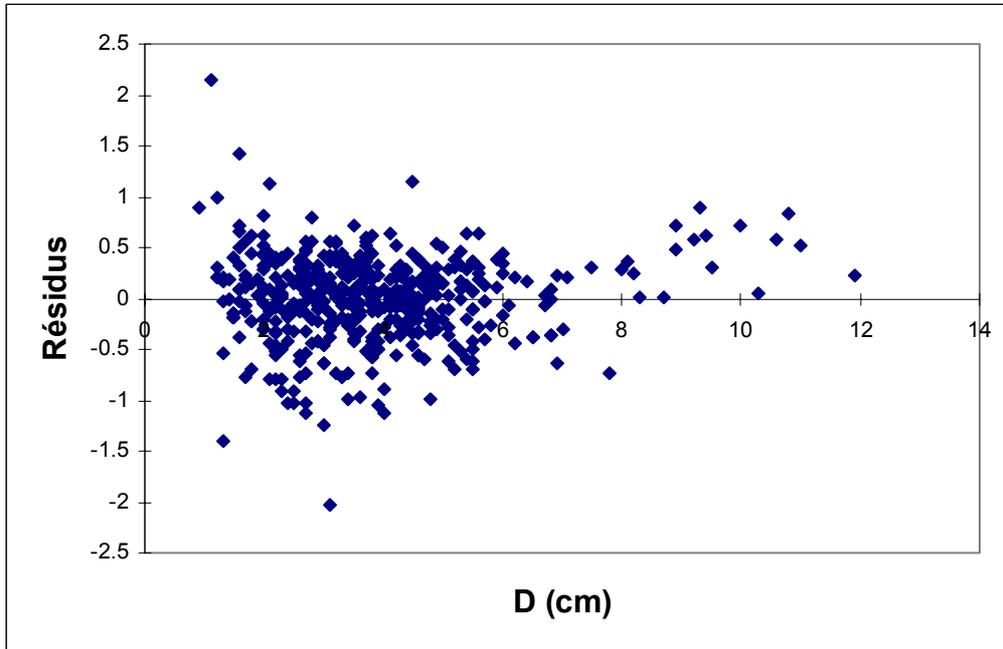


Figure 25 : Résidus de la variable Diamètre (D)

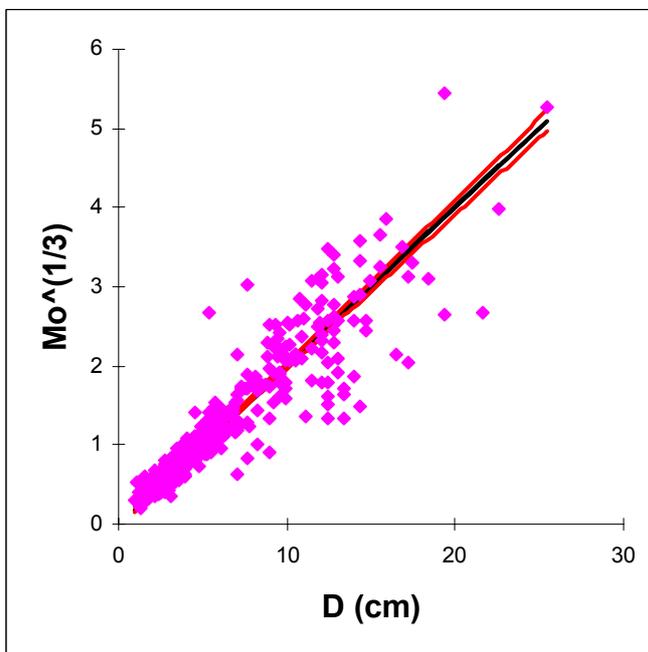


Figure 26 : Régression linéaire issue de la transformation de la variable Mo

**AUBREVILLE, A. (1950). Flore Forestière Soudano-Guinéenne. Paris, Société d'Editions Géographiques, Maritimes et Coloniales.**

**BELLIDO DIAZ, M.-T., MBARO, T., METAIS, A., MEUDEC, J., VAN COUWENBERGHE, L., (2003). Appui à la gestion communautaire de la ressource ligneuse dans la région de Mafa-Kilda, province du Nord, Cameroun. Montpellier, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts: 69 p.**

**BONNERAT, A. D., A.; DE MIGUEL, S.; EDJOLO, A.; LOUVET, S.; VIONNET FUASSET, P. (2002). Aide à la mise en place d'une structure de gestion communautaire de la ressource ligneuse dans la région de Mafa Kilda, province du Nord, Cameroun. Montpellier, ENGREF FRT- PRASAC-IRAD-CIRAD: 48 p.**

**BRETENOUX, J. G. C., M.; COULMIER, X.; SAMBE, I.; SMETS, K.; VERDIER, F. (2001). Gestion des ligneux dans la région de Mafa-Kilda, Nord-Cameroun. Montpellier, ENGREF FRT- PRASAC-IRAD-CIRAD: 55 p.**

**CASSAGNAUD, M. (2001). Déterminants de la gestion et de l'évolution des parcs arborés dans un territoire villageois. Cas du Village de Mafa-Kilda. Montpellier, ENGREF FRT- PRASAC-IRAD-CIRAD: 113 p.**

**NTOUTOUME, R., O'HEIX, B.C., ROCQUENCOURT, A., ZANFINI, A., FIGUIE, M. Ed., KOKOU, K. Ed., PELTIER, R. Ed., SMEKTALA, G. Ed., GAUTIER, D., NIJITI, C.F., (2000). Contribution à la mise au point d'une méthode pour évaluer la ressource arborée d'un territoire villageois et l'utilisation qui en est faite par sa population. Cas d'une zone saturée: terroir de Mafa-Kilda province du Nord, Cameroun. Montpellier, ENGREF FRT- PRASAC-IRAD-CIRAD: 113 p.**

**PONCE-HERNANDEZ, R. (2004). Assessing carbon stocks and modelling win-win scenarios of carbon sequestration through land-use changes. Rome, FAO.**