

Régis PELTIER<sup>1</sup>  
Clément NJITI FORKONG<sup>2</sup>  
Mama NTOUPKA<sup>2</sup>  
Raphaël MANLAY<sup>3</sup>  
Matieu HENRY<sup>3</sup>  
Vincent MORILLON<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Cirad, TA C-36/D  
Département Environnements  
et sociétés  
Upr Ressources forestières  
et politiques publiques  
Campus international de Baillarguet  
34398 Montpellier Cedex 5  
France

<sup>2</sup> Irad, programme Agroforesterie  
BP 222  
Maroua  
Cameroun

<sup>3</sup> AgroParisTech-Engref  
Gestion environnementale  
des écosystèmes  
et forêts tropicales  
648, rue J.-F. Breton  
BP 7355  
34086 Montpellier Cedex 4  
France

# Évaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc à karités du Nord-Cameroun

**Une gestion éligible** au Mécanisme pour un développement propre, Mdp, est recherchée pour un parc à karités, au Nord-Cameroun. Après les évaluations de la productivité en bois et du carbone stocké dans la biomasse aérienne, une densification du peuplement est proposée qui prend en compte les pratiques paysannes. Il s'agit d'optimiser l'adéquation entre activités agricoles et usages de la ressource arborée.



Vue du parc à karités, depuis la colline de Mafa Kilda.  
Photo R. Peltier.

Régis PELTIER,  
Clément NJITI FORKONG,  
Mama NTOUPKA, Raphaël MANLAY,  
Matieu HENRY, Vincent MORILLON

## RÉSUMÉ

### ÉVALUATION DU STOCK DE CARBONE ET DE LA PRODUCTIVITÉ EN BOIS D'UN PARC À KARITÉS DU NORD-CAMEROUN

Dans les zones soudaniennes du Nord-Cameroun, l'arrivée continue de migrants entraîne le défrichement de vastes étendues de savanes. La densification du parc arboré relictuel répondrait, à la fois, à des besoins agronomiques, économiques et environnementaux. Une méthode d'évaluation du carbone stocké dans la biomasse aérienne est proposée, pour un parc à karités, *Vitellaria paradoxa*, sur un terroir villageois. Il s'agit de mettre en place des projets agroforestiers éligibles au Mécanisme pour un développement propre (Mdp), à partir de 2012. De plus, une évaluation de la productivité en bois du parc à karités, géré par émondage, a été réalisée durant trois années, pour une trentaine d'arbres. Une série d'équations allométriques a été développée (sur six individus pour le karité et sur un seul arbre pour *Anogeissus leiocarpus* et *Combretum nigricans*), qui met en relation la biomasse aérienne en fonction du diamètre (du tronc à hauteur de poitrine ou de la base des branches) ou de la surface du houppier. Ainsi, les stocks de carbone par arbre, puis par parcelle ont pu être estimés. Face à la pression anthropique exercée sur ces parcs, il a été établi qu'une rotation de huit ans entre les émondages serait un bon compromis entre les divers intérêts. Ces travaux constituent une première approche qui devra être consolidée avec le recul du temps.

**Mots-clés :** *Vitellaria paradoxa*, Mécanisme pour un développement propre (Mdp), émondage, productivité en bois de feu, carbone, agroforesterie, zone soudanienne, Cameroun.

## ABSTRACT

### EVALUATION OF CARBON STOCKS AND FUELWOOD PRODUCTIVITY IN A SHEA TREE ZONE IN NORTHERN CAMEROON

In the sudanian zones of northern Cameroon, the steady influx of migrants is causing much land clearance in large swathes of savannah lands. Creating denser stands of relict tree populations would be of value at once for agronomic, economic and environmental reasons. A method for evaluating the carbon stored in aerial biomass is proposed here for a village area of shea trees (*Vitellaria paradoxa*). The aim is to introduce agroforestry projects that will be eligible for the Clean Development Mechanism (CDM) as from 2012. In addition, an evaluation of fuelwood productivity in the area, using pollarding methods, was conducted for about thirty trees over a three-year period. A series of allometric equations was developed (for six shea specimens and one specimen each of *Anogeissus leiocarpus* and *Combretum nigricans*), establishing a ratio between aerial biomass and the diameter of the trunk (at chest height or at the branch base) or the surface area of the crown. This provided an estimation of carbon stocks per tree, and then per plot. Given the human pressure exerted on the tree zone, it was established that an 8-year rotation between pollarding operations would offer a healthy trade-off between the various interests involved. These studies offer a preliminary approach that will need to be consolidated with hindsight.

**Keywords:** *Vitellaria paradoxa*, Clean Development Mechanism (CDM), pollarding, fuelwood productivity, carbon, agroforestry, sudanian zone, Cameroon.

## RESUMEN

### EVALUACIÓN DE LAS EXISTENCIAS DE CARBONO Y DE LA PRODUCTIVIDAD MADERERA DE UN PARQUE DE BUTIROSPERMOS DEL NORTE DE CAMERÚN

En las zonas sudanesas del Camerún Norte, la continua llegada de emigrantes conlleva el desbroce de amplias extensiones de sabana. La densificación de la sabana arbolada relictiva respondería, a la vez, a necesidades agronómicas, económicas y medioambientales. Se propone un método de evaluación del carbono almacenado en la biomasa aérea de un parque de butirospermos, *Vitellaria paradoxa*, dentro de un área municipal. Se trata de establecer proyectos agroforestales elegibles dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), a partir de 2012. Además, se realizó una evaluación de la productividad maderera del parque de butirospermos, manejado con desrame, durante tres años y en unos treinta árboles. Se desarrolló una serie de ecuaciones alométricas (en seis individuos de butirospermo y en un solo árbol de *Anogeissus leiocarpus* y de *Combretum nigricans*), que relacionan la biomasa aérea en función del diámetro (del tronco a la altura de pecho o en la base de las ramas) o de la superficie de la copa. De esta forma se pudieron estimar las existencias de carbono por árbol y, seguidamente, por parcela. Se estableció que, frente a la presión antrópica que sufren estos parques, una rotación de ocho años entre las podas de desrame supondría un buen compromiso entre los distintos intereses. Estos trabajos constituyen un primer enfoque que deberá consolidarse con el tiempo.

**Palabras clave:** *Vitellaria paradoxa*, Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), desrame, productividad de leña, carbono, agroforestería, zona sudanesa, Camerún.

## Introduction

Depuis 2000, les étudiants de la formation Foresterie rurale et tropicale (Frt) de l'École nationale du génie rural, des eaux et des forêts (Engref) de Montpellier réalisent des études de terrain, dans le nord du Cameroun, en collaboration avec le Pôle régional de recherche appliquée au développement des savanes d'Afrique centrale (Prasac) ainsi qu'avec l'Institut de la recherche agricole pour le développement (Irad). En février 2005, un groupe d'étudiants, basé au village de Mafa Kilda, a mis au point une méthodologie pour évaluer le carbone stocké au sein d'un parc à karités (*Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertn.). Cette étude s'inscrit comme élément de réflexion pour une meilleure gestion des parcs arborés en région soudanienne afin de mettre en place un projet éligible au Mécanisme pour un développement propre (Mdp), dans le cadre du protocole de Kyoto (FRIEDEN *et al.*, 2005).

## Contexte

### Situation géographique

Dans la province du Nord-Cameroun, le village de Mafa Kilda est localisé au sein du département de la Bénoué, à 20 km au sud de la ville de Garoua (BELLIDO DIAZ *et al.*, 2003).

### Milieu naturel

Le village se situe en zone de bioclimat soudano-guinéen (AUBRÉVILLE, 1950), caractérisée par des conditions climatiques semi-arides avec une pluviosité annuelle monomodale qui varie entre 900 et 1 200 mm (JAMIN *et al.*, 2004).

La végétation est éparse et composée de savanes arborées et de forêts claires sèches. Le paysage est fortement marqué par l'activité agricole qui a créé des parcs arborés dominés par l'extension des espèces *Vitellaria paradoxa*, *Combretum* spp. et *Terminalia* spp. Dans les zones de pression agricole importante, la brousse devient très réduite et les densités dans les parcs arborés n'atteignent que six arbres par hectare en

zone de culture alors qu'en zone de piémont et de collines (non cultivées mais fortement exploitées) les densités peuvent atteindre 556 arbres par hectare (CASSAGNAUD, 2001).

### Milieu humain

Les villages sont en majorité habités par des agriculteurs sahéliens migrants (Mafa, Laka, etc.), installés à partir de 1976, et par des éleveurs (Peuls) sédentarisés depuis les années 1990. La population de Mafa Kilda ne cesse de s'accroître depuis la création du village en 1984 : en 1994, elle comptait 500 habitants (BRETENOUX *et al.*, 2001), et 1 100 habitants en 2002 (BONNERAT *et al.*, 2002). Cette progression s'explique par la croissance démographique du village mais surtout par l'arrivée de nouveaux migrants. La zone est aujourd'hui dans une situation de saturation foncière, avec une densité de population de 60 habitants au km<sup>2</sup>.

### Contexte socio-économique

L'activité agricole, qui est la principale activité économique, se différencie en fonction de l'appartenance ethnique. Les Mafa, à l'origine sédentaires et agriculteurs dans les monts Mandara, s'orientent vers la culture du coton, de l'arachide, du sorgho, du maïs et du niébé. Les Laka, originaires du Tchad et de tradition agricole, travaillent également la terre mais leurs femmes récoltent les noix de karité et les transforment en beurre. Enfin, les Peuls, pasteurs nomades à l'origine, sont devenus des sédentaires à troupeaux transhumants, essentiellement bovins. Les agriculteurs, lorsqu'ils le peuvent, possèdent également du bétail (principalement des chèvres et des bovins), tandis que les éleveurs cherchent l'autosuffisance en céréales (maïs). Une majorité des habitants de la région peut donc être considérée comme des « néo-agropasteurs ».



Troupeau peul dans le parc à karités.  
Photo R. Peltier.

## Problématique

### La durabilité de la ressource

La durabilité de la ressource des parcs arborés est remise en question par l'augmentation de la pression démographique et par les modes de gestion agricole et pastorale. En effet, 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 les karités : les Peuls prélèvent essentiellement du fourrage (les arbres sont émondés en fin de période sèche car leurs feuilles, peu appétantes, ne sont broutées qu'en période de soudure), les Mafa et les Laka utilisent et commercialisent le bois, les femmes laka prélèvent principalement les fruits et les transforment en beurre. Les espèces émondées à Mafa Kilda, pour diverses raisons, sont les suivantes : *Burkea africana*, *Daniellia oliveri*, *Vitellaria paradoxa*, *Afrormosia laxiflora* et *Terminalia glaucescens* (NDOUTOUME *et al.*, 2000). Sur les terres cultivées par les Peuls, 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.

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

Différents intérêts et modes de gestion propres à chaque ethnie concernent la ressource arborée. Des négociations ont eu lieu entre les différents groupes (éleveurs, agriculteurs, récolteurs) impliqués pour la mise en place d'une gestion communautaire durable des brousses et des parcs à karités (BONNERAT *et al.*, 2002). Une des solutions négociées était un émondage des karités tous les huit ans afin



Émondage pastoral d'un caïlcédrat.  
Photo R. Peltier.

de satisfaire les différents usagers. Cependant, 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 mais, malgré la promulgation de la loi de 1994, la création de forêts communautaires n'a pas vraiment commencé au Nord-Cameroun.

### Le Mdp, mécanisme de promotion de l'arbre ?

Dans le cadre du protocole de Kyoto (1997) de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (1992), le Mécanisme pour un développement propre (Mdp) permet aux pays développés ayant ratifié ce protocole « pays annexe 1 » de procéder à des investissements visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre ou à fixer du carbone atmosphérique dans un pays dit « non annexe 1 » (pays en développement ayant ratifié le protocole de Kyoto) et de bénéficier des crédits d'émission générés par les réductions ainsi obtenues.

Les projets éligibles au Mdp peuvent être de type énergétique (réduction d'émissions) ou de type fixation de carbone. Parmi ces der-

niers, seuls les projets de boisement et de reboisement sont éligibles au Mdp pour la première période d'engagement (passage d'un état non forestier constaté au 31 décembre 1989 à un état forestier).

Les plantations à usages multiples, la création de systèmes agroforestiers et les reboisements sur terrains dégradés sont théoriquement éligibles si le couvert végétal, la hauteur et la surface du système installé en fin de projet leur permettent d'entrer dans la définition de forêt choisie par le pays pour le Mdp. Cela risque de ne pas être le cas dans plusieurs pays d'Afrique centrale, car ils envisagent de choisir des normes qui correspondent aux reboisements de zone humide mais qui excluent les parcs arborés soudanais ou sahéliens (seule la République démocratique du Congo a déjà fixé ses limites).

Les activités de conservation et de gestion des massifs forestiers, des plantations à usages multiples et des systèmes agroforestiers déjà existants ne sont pas éligibles mais pourraient l'être, lors de la seconde période d'engagement qui débutera en 2012.

Les projets éligibles au Mdp constituent donc une source de financement, parmi d'autres, envisageable pour des actions de promotion de l'arbre, dans les systèmes agraires soudanais.

## Mesure du carbone dans la biomasse aérienne : méthodologie

La réalisation d'une méthodologie de mesure ou d'estimation du carbone, pour un projet éligible au Mdp, peut passer par la mise en place d'équations allométriques permettant d'évaluer la biomasse stockée dans les troncs et les houppiers d'un parc arboré à karités, à partir de paramètres simples tels que le diamètre à hauteur de poitrine ou la surface du houppier (absorption de carbone). Elle peut aussi passer par le calcul de la production annuelle de biomasse récoltable par émondage (donc sans destruction du tronc et de la majeure partie du houppier), pour éviter de faire appel à l'énergie fossile (réduction d'émission de carbone). Dans ce dernier cas, il faudra prouver que la combustion de ce bois vient se substituer à celle d'énergie fossile, ce qui ne peut être le cas que dans les villes. Il faut noter qu'un projet ne peut pas combiner absorption et réduction d'émission de carbone.



Karité brûlé à la base par un agriculteur qui souhaite enlever cet arbre pour récolter le bois et réduire l'ombrage sur les cultures.  
Photo R. Peltier.



Arbre émondé après une rotation courte : le bois récolté est de petit diamètre.  
Photo R. Peltier.

### Objectifs

Cette étude s'est attachée à l'élaboration et à la vérification de tarifs de biomasse et de productivité pour les étendre à de grandes surfaces, grâce à des outils du type système d'information géographique, télédétection et inventaires, avec mesures rapides de diamètres des arbres sur le terrain. Parallèlement à ces travaux biométriques, agriculteurs, éleveurs et cueilleurs ont été interrogés, afin de définir une méthode de récolte du bois et du fourrage, durable et acceptable par tous, qui encouragerait 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 souvent le cas.

Si de tels travaux ont souvent été menés sur des formations naturelles à travers le monde, il existe peu de références sur les systèmes agroforestiers traditionnels tropicaux de type « parc arboré ».

Au Mali, des chercheurs ont récemment calculé le volume de plusieurs karités, mais ils n'ont pas mesuré précisément le volume de chaque tronçon de l'arbre et ont reconnu que le volume qu'ils avaient estimé était certainement inférieur au volume réel. D'autre part, ils n'ont pas mesuré la biomasse exploitable, ni la productivité annuelle (NOUVELLET *et al.*, 2006).

### Choix du matériel végétal émondable

La pratique de l'émondage est répandue dans la zone d'étude ; chaque utilisateur choisit la durée de rotation en fonction de ses besoins propres, sans tenir compte des besoins des autres groupes d'intérêts (exemple : rotation très courte pour les éleveurs).

Afin d'estimer la productivité des karités, le travail a porté sur des mesures d'arbres déjà émondés à des dates connues.

L'émondage a été mené à bien par deux anciens « émondeurs », selon leurs pratiques habituelles : conservation d'un tronçon de jeune bois à la base de chaque branche pour faciliter l'émission de rejets et conservation de quelques branches non émondées pour « tirer la sève » et construire un houppier équilibré. Ce travail a été réalisé sur environ dix karités chaque année, pendant trois ans, et sur un *Anogeissus leiocarpus* et un *Combretum nigricans*.

### Mesures de terrain pour estimer les tarifs de biomasse

Sur chaque arbre, les paramètres suivants ont été mesurés : circonférence (en cm) à 1,30 m ; hauteur totale (en m) ; deux diamètres perpendiculaires (en m) de la projection du houppier sur le sol (d1 et d2).



Karité avant et après émondage.  
Photos R. Peltier.

Cela a permis de calculer le diamètre à hauteur de poitrine (Dbh) et la surface du houppier (en m<sup>2</sup>) qui sera assimilée à une ellipse par la formule :  $S_{\text{houppier}} = (\pi/4) \times d1 \times d2$ .

La phase d'évaluation de la biomasse fraîche aérienne (en kg) peut être divisée en deux parties : calculs de la biomasse fraîche émondée et de celle non émondée (figure 1).

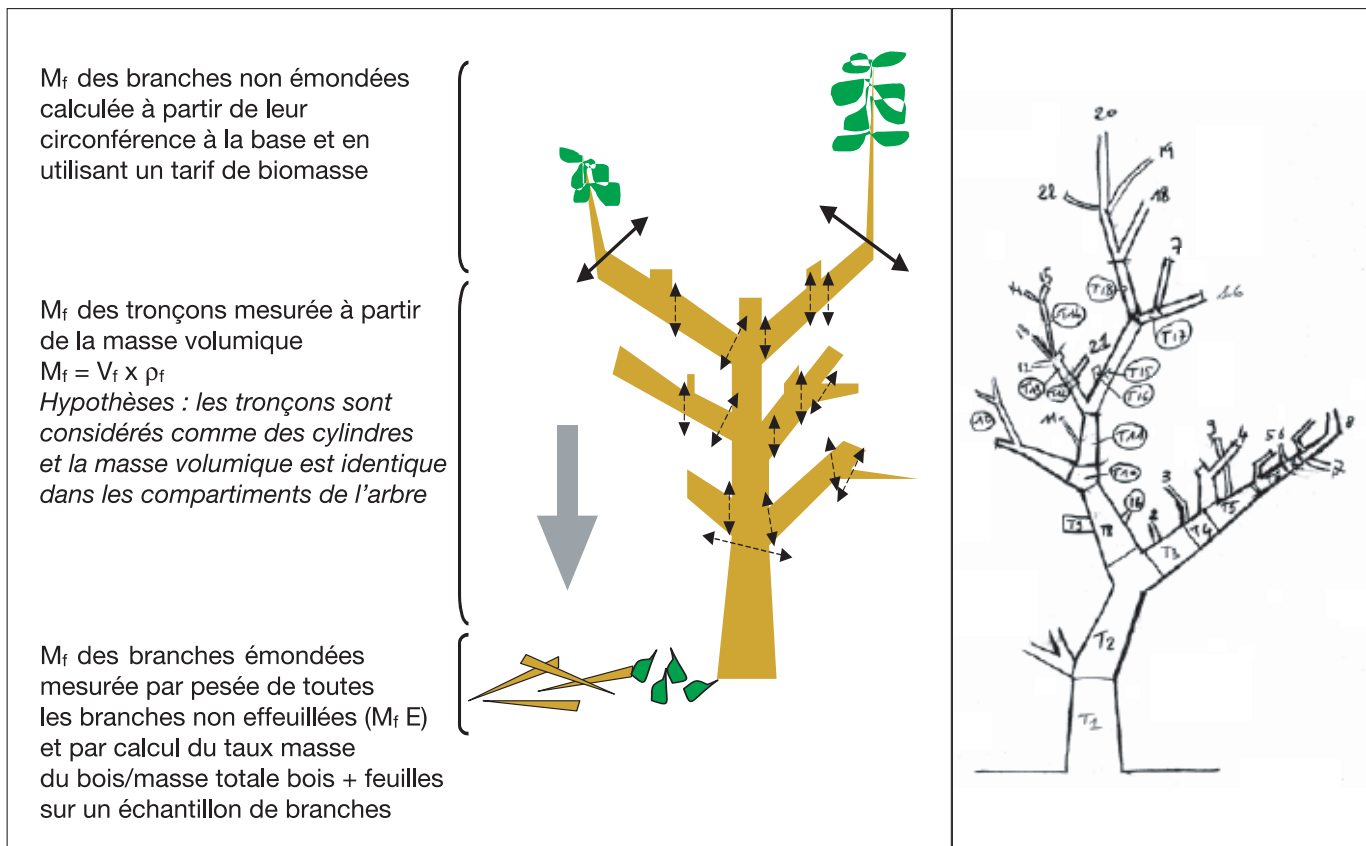
### Biomasse fraîche émondée

Les différentes ramifications de l'arbre ont été repérées et les branches numérotées (figure 2). La masse fraîche des branches émondées a été mesurée par pesée, à l'aide de pesons de précision. Les diamètres à la base de toutes les branches (émondées ou non) ont été mesurés. Afin d'estimer la biomasse des branches non émondées, une relation entre le diamètre à la base des branches et leur masse (tarif de biomasse branche) a été établie.

### Biomasse fraîche non émondée

La biomasse des compartiments non émondés a été estimée à partir des mesures de volume et de densité, et des relations obtenues entre le diamètre et la masse des branches. Les mesures suivantes ont été effectuées.

La biomasse des branches non émondées a été calculée à partir de leur circonférence mesurée à leur base, à laquelle a été appliqué le tarif de biomasse.



**Figure 1.**  
Schéma récapitulatif de la détermination de la biomasse fraîche totale.



**Figure 2.**  
Numérotations des tronçons et des branches mesurés sur l'arbre émondé de la photo ci-dessus.

Pour le fût et les branches majeures, la longueur (L en m) et la circonférence médiane (C en m) des tronçons de l'arbre ont été mesurées à l'aide d'un mètre ruban. Les tronçons de l'arbre étant assimilés à des cylindres, le volume (V en m<sup>3</sup>) a été estimé par la formule suivante :

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

La biomasse fraîche (M<sub>f</sub> en kg) des tronçons a été calculée à partir de ce volume frais (V<sub>f</sub> en m<sup>3</sup>) et de la masse volumique fraîche (ρ<sub>f</sub> en kg/m<sup>3</sup>). Pour calculer ce dernier paramètre, des échantillons de bois, d'une masse totale d'environ 5 kg/arbre, ont été prélevés au hasard dans l'architecture de l'arbre, sans enlever l'écorce. La masse volumique fraîche fut déterminée grâce à la formule : ρ<sub>f</sub> = M<sub>f</sub>/V<sub>f</sub>.

La masse fraîche (M<sub>f</sub> en kg) des échantillons a été mesurée aussitôt après la coupe. Le volume frais (V<sub>f</sub> en m<sup>3</sup>) a été estimé par immersion dans un récipient d'eau et mesure du volume déplacé. Les échantillons ont ensuite été placés dans l'étuve à 103 °C ± 2 °C. Après 24 h, temps nécessaire pour stabiliser la masse des échantillons de 1 à 2 kg, ceux-ci ont été sortis de l'étuve et pesés. La masse sèche a été mesurée (M<sub>0</sub> en kg). Le taux d'humidité (H) a été calculé à partir de la formule : H = (M<sub>f</sub> - M<sub>0</sub>) / M<sub>f</sub>.

La masse volumique étant difficile à calculer pour le compartiment tronc (la destruction des arbres utiles a voulu être évitée), cette donnée a été estimée comme étant égale à celle des branches. L'estimation de la biomasse du tronc se base sur l'hypothèse que la densité du compartiment tronc est identique à celle du compartiment branche.

### Stock de carbone contenu dans le compartiment bois aérien non émondé

En estimant la teneur en carbone à 45 g pour 100 g de matière sèche (PONCE-HERNANDEZ, 2004), le carbone stocké peut être évalué à partir de la formule suivante :

$$C_{\text{stocké}} (t) = (M_f \text{ non E} (t) \times (1 - H)) \times 0,45.$$

### Productivité en bois émondable

La contribution des compartiments feuille et branche à la biomasse raméale a été mesurée sur dix échantillons par espèce, par pesée individuelle après effeuillage des branches. Par lecture des cernes des branches émondées, l'âge des branches a été estimé en se basant sur l'hypothèse que les cernes sont annuels.

Productivité foliaire = Σ (M<sub>f</sub> E / âge) × f (f = masse des feuilles / masse des branches non effeuillées).

Productivité raméale = Σ (M<sub>f</sub> E / âge) × (1 - f).

### Construction de tarifs de biomasse

Les tarifs de biomasse permettent une estimation de la biomasse d'un arbre à partir d'un ou plusieurs paramètres mesurables, dans des conditions bien définies (espèce, âge, lieu, etc.). La FaO propose des formules globales applicables pour tous les arbres de la planète, en utilisant un facteur de forme de 0,5 (PONCE-HERNANDEZ, 2004) : volume = G × H × 0,5 (avec : G = surface du tronc à 1,30 m et H = hauteur totale de l'arbre).

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

### Estimation de la biomasse totale moyenne

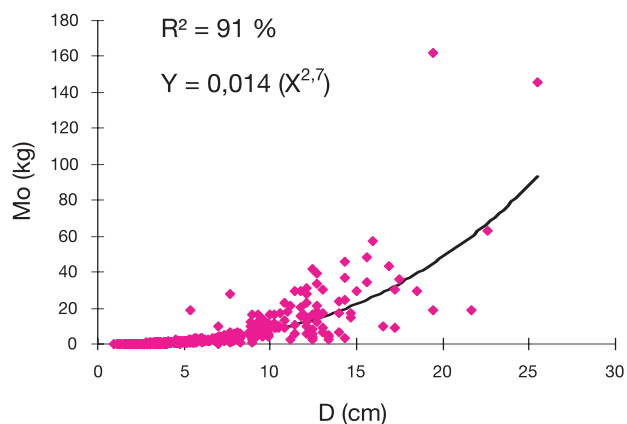
Pour une rotation de huit ans entre deux émondages, la biomasse moyenne du bois de la partie aérienne des arbres dans un parc arboré peut être grossièrement estimée par la somme de la biomasse non émondée à laquelle on ajoute la masse des branches après quatre ans de croissance (moitié de la rotation). Ainsi : biomasse totale moyenne = biomasse non émondée + 4 × productivité raméale.

### Traitement des données

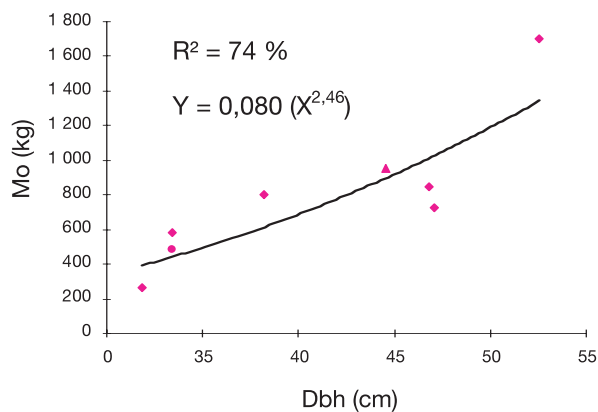
Les données de terrain ont été saisies sous tableur pour chaque arbre, en séparant les différents compartiments (branches émondées, branches non émondées et tronçons). Les modèles théoriques choisis sont du type Y = a.X<sup>b</sup>, où a et b sont des constantes. Le coefficient de détermination est calculé afin de rendre compte du pourcentage explicatif de la variable X dans le modèle sélectionné. Le risque d'erreur quant à l'utilisation d'un tel modèle par rapport à un modèle de type : Y = constante a été évalué par un test de Fisher. Le risque de première espèce a été fixé à 5 %.



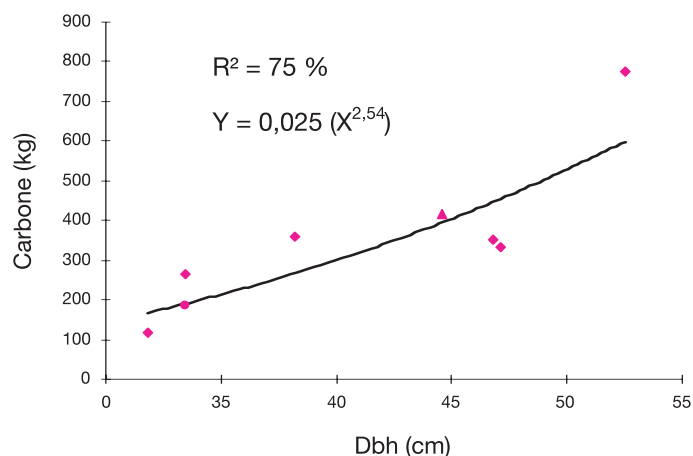
Lecture des cernes sur une branche de *Vitellaria paradoxa*.  
Photo R. Peltier.



**Figure 3.** Biomasse sèche ( $M_o$ ) du bois des branches de ramification 1 et des branches émondées, en fonction de leur diamètre à la base ( $D$ ), pour *Vitellaria paradoxa*.



**Figure 4.** Masse sèche totale ( $M_o$ ) du bois de la partie aérienne de l'arbre (partie émondée et non émondée) en fonction du Dbh (les losanges représentent les karités, le triangle l'*Anogeissus* et le rond le *Combretum*).



**Figure 5.** Masse de carbone contenue dans la partie aérienne en fonction du Dbh de l'arbre (les losanges représentent les karités, le triangle l'*Anogeissus* et le rond le *Combretum*).

## Résultats

### Élaboration d'un tarif de biomasse pour les compartiments branches

L'analyse graphique 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 branche 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 % la variabilité.

Afin d'améliorer la relation dans les classes de gros diamètres, une analyse conjointe des branches émondées (en fonction de leur diamètre à la base) et des branches regroupées issues d'une même ramification 1 (en fonction du diamètre en dessous de la ramification) a été réalisée (figure 3). Cela permet de prendre en compte les branches de gros diamètre. La corrélation est bonne car  $R^2 = 91$  %. Le modèle utilisé est toujours du type puissance et permet d'avoir une équation intermédiaire prenant en compte les petites et les grosses branches.

### Estimation du tarif de biomasse

Il existe une certaine relation entre la biomasse sèche du bois de la partie aérienne ( $M_o$ ) et le diamètre à hauteur de poitrine (Dbh) pour les trois essences étudiées (six *Vitellaria paradoxa*, un *Anogeissus leiocarpus*, un *Combretum nigricans*) (figure 4). Il en est de même pour la masse de carbone (figure 5). Cependant, 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). Cela peut s'expliquer par la forte hétérogénéité des formes architecturales et par la variabilité



des précédentes méthodes d'émondage. Bien que le test de Fisher montre que le modèle est acceptable au risque de 0,60 % d'erreur, du fait de l'échantillonnage restreint, la relation obtenue est peu précise.

D'autre part, 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'Engref en 2001 et en 2005 montrent bien que la rotation théorique calculée s'accorde avec le délai réel depuis les derniers émondages, pour la plupart des arbres mesurés. Cela confirme l'hypothèse de l'annualité des cernes chez le karité.

Il existe une bonne relation entre la productivité annuelle des branches émondées et la surface du houppier ( $R^2 = 88\%$ ). Les intervalles de confiance à 95 % montrent qu'il n'y a qu'un seul arbre pour lequel le modèle est peu significatif, c'est-à-dire en dehors de l'intervalle de confiance (figure 6).

Le taux d'humidité moyen du bois de karité est de 38 % (taux calculé sur 13 échantillons provenant de 6 karités). Cependant, l'écart-type est relativement important (5,6). *Anogeissus leiocarpus* (33 %) et *Combretum glutinosum* (43 %) ont des taux d'humidité du bois comparables.

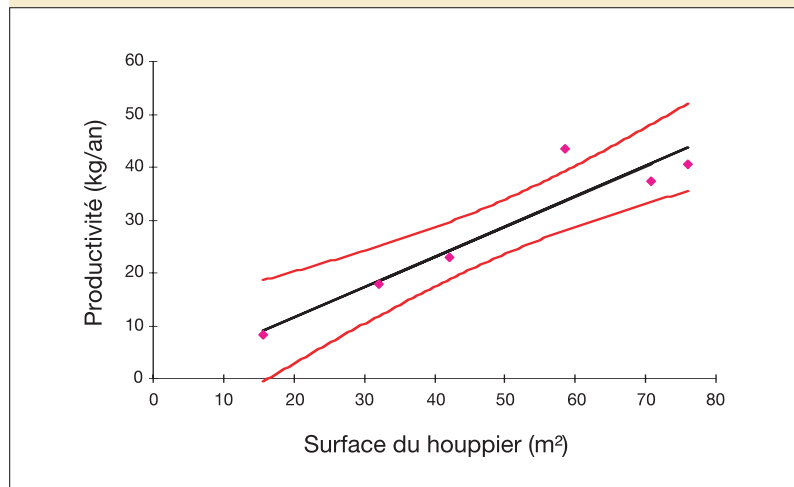


Figure 6.

Productivité raméale en fonction de la surface du houppier du karité ( $R^2 = 88\%$  ; courbes rouges : intervalles de confiance à 95 %).

La masse sèche totale du bois de la partie aérienne des arbres est ajustable à un modèle linéaire de la surface du houppier. Le coefficient de détermination de 74 % montre que la relation est correcte (figure 7).

Les quantités de carbone maintenues sur pied ou récoltées ont été estimées en appliquant les tarifs de stockage et de productivité aux inventaires des arbres réalisés dans les champs d'Ouro Bouba Rarou, en 2002 (tableau I).

Il apparaît qu'environ 5 t/ha de carbone sont stockées et 0,4 t/ha/an récoltée (tableau I).

### Analyse des sources d'erreur

#### Les mesures de masse

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).

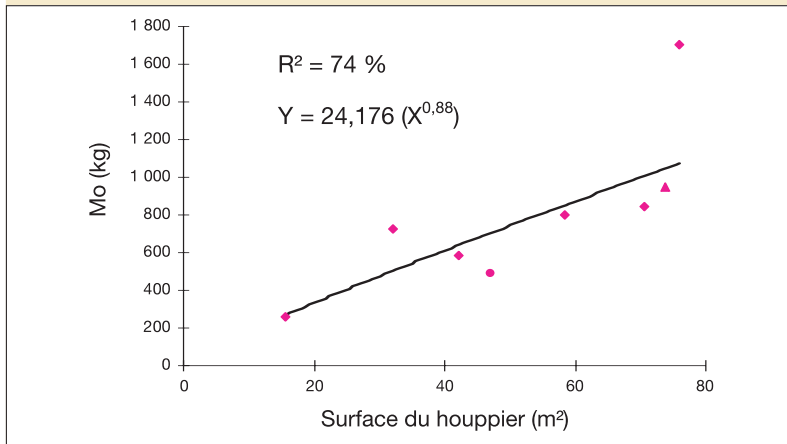
#### L'estimation de la masse volumique

L'hypothèse d'homogénéité de la densité du bois quels que soient les compartiments aériens de l'arbre n'est pas vérifiée statistiquement mais semble correcte. Le rapport moyen entre la masse anhydre et la masse fraîche est de 0,62 pour le karité.

Tableau I.

Estimation du carbone stocké sur pied et récolté annuellement dans la parcelle d'Ouro Bouba Rarou (31 arbres/ha).

Classe de C (cm)	Densité (arbres/ha)	Stock de C non émondé moyen/arbre (kg)	C récolté moyen/arbre (kg/an)	Stock de C non émondé total (kg/ha)	C récolté total (kg/ha/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	1 100,2	63,8
135-155	2,48	431,4	20,6	1 069,8	51,2
155 et +	1,24	599,2	24,9	743,0	30,8
Total C/ha				5 046	399



**Figure 7.** Masse sèche totale (Mo) du bois de la partie aérienne en fonction de la surface du houppier (les losanges représentent les karités, le triangle l'*Anogeissus* et le rond le *Combretum*).

La variabilité observée peut être expliquée par l'erreur liée à la pesée des échantillons (moyenne : 0,38 ; écart-type : 5,6) qui a été réalisée à l'aide du peson de 2 kg. De plus, seulement 13 échantillons ont été prélevés.

#### La productivité raméale

En 2005, la précision de la lecture et l'annualité des cernes semblent confirmées car les biomasses raméales théoriques calculées pour un accroissement de quatre ans sont similaires à celles mesurées sur le terrain, sur des arbres effectivement émondés à un intervalle de quatre ans. Mais les mesures de productivité raméale sont très différentes d'une année de mesure à l'autre et sont difficilement comparables. Cela 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. Il peut aussi y avoir eu des incertitudes dans le calcul de l'âge des branches, suivant l'observateur qui a changé chaque année.

#### L'évaluation du carbone stocké

Les estimations de stock de carbone au niveau de la parcelle sont peu précises car elles assimilent le peuplement du parc arboré à l'échantillonnage réalisé. En effet, l'erreur due à l'échantillonnage n'a pas été calculée dans le cadre de cette première étude.

## Discussion et conclusion

### Élaboration d'un tarif de biomasse pour le Mdp

La méthode de quantification du carbone stocké dans la biomasse aérienne proposée par la Fao (2004) se base sur une formule qui sous-estime le volume des arbres soudaniens régulièrement émondés ( $V = G \times H \times 0,5$ ) et donc leur biomasse. 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 du tronc et des branches. Les formules présentées dans la bibliographie sont adaptées pour des arbres dont le fût se rapproche d'un paraboloïde, 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. La densité des arbres est certes faible mais une sous-estimation de la quantité de carbone stockée pourrait exclure l'éligibilité des programmes Mdp 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 res-



Pesée des branches émondées.  
Photo R. Peltier.

treint ne permet pas une validation statistique. Des études complémentaires se justifient donc.

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 de photos aériennes ou d'images satellitaires de haute résolution, 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 agroécosystème, 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 de l'émondage affecte de manière importante le houppier, et sa surface peut donc être fortement réduite.

En ce qui concerne la réalisation de projets éligibles au Mdp, il est nécessaire d'estimer le carbone contenu dans les compartiments souterrains et au niveau de la litière et des strates herbacées, lorsque celles-ci existent. Par ailleurs, les cultures annuelles ne sont pas prises en compte. L'estimation du carbone contenu dans le compartiment racinaire est complexe et nécessite un investissement lourd. Aussi, son estimation est souvent faite en se référant aux informations issues de la bibliographie, pour des essences similaires.

Pour la productivité raméale émondable, la surface du houppier est la variable qui semble le mieux expliquer les variations de productivité, parmi les arbres mesurés.

## Mdp et pratiques paysannes

La mise en place d'un projet agroforestier éligible au Mdp implique une densification du peuplement de karités ou d'autres espèces éventuelles. Celle-ci ne peut être faite sans la création d'une filière pour la commercialisation du beurre. En effet, le karité n'est pas une espèce très recherchée, en matière de fourrage, par les Peuls ou, en matière de bois combustible ou de bois d'œuvre, par l'ensemble des usagers. D'autres essences semblent plus convoitées, comme *Azzeria africana* et *Khaya senegalensis* pour les Peuls et divers fruitiers locaux ou exotiques pour les autres ethnies.

Il s'agirait donc de densifier le peuplement arboré, tout en maintenant une diversification, et non pas de favoriser une essence parmi d'autres, au risque de provoquer son déclin en cas de disparition du marché. La densification d'un peuplement arboré doit être envisagée 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 de grandeur approximatif, il a été estimé que le carbone stocké dans la biomasse aérienne d'un parc à karités de densité moyenne (30 arbres/ha) est d'environ 5 t/ha. Une évaluation du stock total de carbone avec le sol et les racines pourrait être de 7,5 t/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, permettrait de stocker 7,5 t/ha en supplément. En supposant que ce stockage additionnel soit rémunéré par des crédits temporaires, un projet Mdp pourrait recevoir des paiements réguliers pendant la période d'accréditation du projet (entre 20 et 60 ans). En supposant, pour simplifier, que la valeur d'une série de crédits temporaires est similaire à la valeur d'un crédit permanent (3 \$ US par tonne de CO<sub>2</sub>, soit

environ 10 \$ US par tonne de carbone), les paiements ne représenteraient qu'un gain de 75 dollars par hectare, gain unique pendant toute la période d'accréditation.

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 Dpgt, pour *Faidherbia albida*, dans la province de l'Extrême-Nord, avec des primes de seulement 0,2 \$ US par arbre.

D'autre part, le volet du Mdp ayant trait à la substitution des énergies fossiles est actuellement éligible et pourrait s'orienter vers l'utilisation du compartiment bois combustible émondé, en substitution au gaz ou au pétrole, en particulier en milieu urbain. Pour y répondre, il est nécessaire de légaliser le marché de ce type de bois et de réviser les lois concernant la pratique de l'émondage des espèces agroforestières, aujourd'hui interdite. Les résultats concernant la productivité des arbres montrent que les méthodes d'émondage basées sur une rotation de huit ans sont un bon compromis, afin de permettre aux différents usagers de pouvoir prélever de manière durable les produits qui conditionnent leurs activités. Pour que cette production se prolonge dans l'avenir, il est nécessaire de considérer la régénération de la ressource arborée.

Il est envisageable de prendre en compte le volet substitution d'énergies fossiles des projets éligibles au Mdp, en calculant la production de bois émondable. En supposant qu'une récolte, correspondant à 0,4 t de carbone par hectare et par an, permette de réduire les émissions de carbone d'une quantité équivalente et en considérant une valeur des crédits de carbone à 10 \$ US par tonne, le montant pour le volet substitution correspondrait à un gain de 4 \$ US/ha/an. Ce volet pourrait ainsi représenter des sommes considé-



Branches émondées après une rotation longue : le bois récolté a un diamètre supérieur à 12 cm. Photo R. Peltier.

rables pour une commune (de l'ordre de 10 000 ha) ou pour une préfecture (de l'ordre de 100 000 ha), ce qui 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 si la substitution ne sera pas facile à justifier.

La création d'un marché s'avère indispensable puisqu'elle conditionne à la fois le développement de filières telles que le beurre de karité, les produits pharmacologiques, ou la vente du bois de feu. Par ailleurs, des études de marché pourraient permettre d'estimer la valeur économique des produits non ligneux, dont l'importance peut assurer la survie des parcs arborés, en cas d'un repli des financements du Mdp qui résulterait, par exemple, d'une chute du prix du carbone sur le marché international.

Enfin, il faut bien considérer que la réalisation d'un projet éligible au Mdp implique des coûts et qu'il est nécessaire de savoir estimer la surface à partir de laquelle la réalisation d'un tel projet deviendrait viable. Il faut aussi savoir comment le conduire dès le départ pour le mener à terme sans écueils, ce qui exigera en général l'appui de partenaires extérieurs.

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'équipe de l'Irad-Forêt de Garoua et Maroua pour leur enthousiasme, leur disponibilité et leur intérêt porté aux études réalisées. Ainsi, les étudiants souhaitent plus particulièrement remercier Tapsou, Oumarou Palou Madi et Aboubakar Njiemoun, pour les avoir encadrés sur le terrain.

Ils remercient également tous les habitants de Mafa Kilda pour leur accueil chaleureux et en particulier le chef de village, son fils Jérémie Djekaya et son épouse Marceline, ainsi que l'Irad et le projet Ardesac pour leur appui matériel et humain et, en particulier, à Yaoundé, N'Djamena et Maroua : A. Njoya, L. Seiny-Boukar, H. Guerin, N. Woin et C. Klassou.



Préparation du beurre de karité par une femme laka : la valorisation de la filière serait une source de revenu important et contribuerait à la protection du parc arboré.  
Photo R. Peltier.

## Références bibliographiques

AUBRÉVILLE A., 1950. Flore forestière soudano-guinéenne. Paris, France, Société d'éditions géographiques, maritimes et coloniales, 524 p.

BELLIDO DIAZ M.-T., MBARO T., METAIS A., MEUDEC J., VAN COUWENBERGHE L., PELTIER R., 2003. Appui à la gestion communautaire de la ressource ligneuse dans la région de Mafa-Kilda, province du Nord, Cameroun. Montpellier, France, Engref, 69 p.

BONNERAT A. D., DE MIGUEL S., EDJOLO A., LOUVET S., VIONNET FUASSET P., NJITI C.-F., NTOUPKA M., DAWAY M., PELTIER R., 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, France, Engref-Frt/Prasac/Irad/Cirad, 48 p.

BRETENOUX J.-G., COULMIER X., SAMBE I., SMETS K., VERDIER F., MANLAY R., PELTIER R., 2001. Gestion des ligneux dans la région de Mafa-Kilda, Nord-Cameroun. Montpellier, France, 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, France, Engref-Frt/Prasac/Irad/Cirad, 113 p.

FRIEDEN D., HENRY M., MORILLON V., NIEULLET N., NJITI C.-F., PELTIER R., 2005. Évaluation du stock de carbone et de la productivité en bois d'un parc arboré à karité en zone soudanienne du Nord-Cameroun. Montpellier, France, Engref-Frt/Prasac/Irad/Cirad, 39 p.

JAMIN J.-Y., GOUNEL C., BOIS C. (éd.), 2004. Atlas. Agriculture et développement rural des savanes d'Afrique centrale. N'Djamena, Tchad, Montpellier, France, Prasac/Cirad, 100 p. et cédérom.

NOUVELLET Y., KASSAMBARA A., BESSE F., 2006. Le parc à karité au Mali : inventaire, volume, houppier et production fruitière. Bois et Forêts des Tropiques, 287 : 5-20.

NDOUTOUME R., O'HEIX B. C., ROCQUENCOURT A., ZANFINI A., FIGUIE M., KOKOU K., PELTIER R., SMEKTALA G., GAUTIER D., NJITI 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, France, 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, Italie, Fao.