



COMITE PERMANENT INTER-ETATS DE LUTTE CONTRE LA SECHERESSE DANS LE SAHEL
PERMANENT INTERSTATE COMMITTEE FOR DROUGHT CONTROL IN THE SAHEL
COMITÉ PERMANENTE INTER-ESTADOS DE LUTA CONTRA A SECA NO SAHEL
اللجنة الدائمة المشتركة لمحاربة التصحر في الساحل



Centre Régional AGRHYMET

DEPARTEMENT FORMATION ET RECHERCHE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER II EN GESTION DURABLE DES TERRES

3^{ème} PROMOTION

Présenté par : Ibitoyé BIAH

Evaluation du stock de carbone des peuplements d'anacardiens (*Anacardium occidentale*) : cas de la plantation domaniale de la commune de Bantè au centre du Bénin.

Soutenu publiquement le 05/01/2017 devant le jury composé de :

Président : Dr Atta SANOUSSI, Centre Régional AGRHYMET, Niamey-Niger

Membres : Dr Maguette KAIRE, Centre Régional AGRHYMET Niamey-Niger

Dr Amani ADBOU, Institut National de Recherche Agronomique du Niger

Directeur de mémoire :

Prof. Dr. Ir. Brice SINSIN
Laboratoire d'Ecologie Appliquée,
Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

Co-superviseurs :

Dr Sabin G. H. GUENDEHOU
Chargé de Recherches au CAMES
Laboratoire d'Ecologie Appliquée,
Université d'Abomey Calavi (Bénin)

&

Dr Maguette KAIRE,
Centre Régional AGRHYMET
Niamey-Niger

Janvier 2017

SECRETARIAT EXECUTIF: 03 BP 7049 Ouagadougou 03, Burkina Faso - Tél (+226) 25 37 41 25/26 - 25 49 96 00 - Fax (+226) 25 37 41 32 Courriel: cilss.se@cilss.bf - www.cilss.bf

CENTRE REGIONAL AGRHYMET: BP 11011 Niamey, Niger - Tél (+227) 20 31 53 16 / 20 31 54 36 - Fax (+227) 20 31 59 79 – Courriel : admin@agrhytmet.ne - www.agrhymet.ne

INSTITUT DU SAHEL : BP 1530 Bamako, Mali - Tél (+223) 20.22.21.48 / 20.22.30.43 / 20.22.47.06 - Fax: (+223) 20.22.78.31- Courriel : administration@insah.org - www.insah.org

Dédicace

A mes parents Yacoubou BIAH et Awa KOSSOU,
mes frères et sœurs, vos peines seront
récompensées.

A mon épouse Philomène A. IFENOU, pour sa patience
et son endurance pour avoir supporté mes absences
durant ma formation, que ceci te soit une source de
réconfort.

A ma fille Ganiyatou Omonladé BIAH, qu'Allah te
bénisse, t'accorde longue vie et que ce document te
soit une source d'inspiration.

Remerciements

Louange à ALLAH, le Glorieux et l'Exalté, Garant du succès, pour la réalisation de cette œuvre tout en espérant qu'elle soit utile pour la communauté. Qu'il me soit également permis de remercier tous ceux et celles qui y ont contribué par leurs efforts physiques, intellectuels et affectifs. Mes sincères remerciements :

- Au Prof. Brice SINSIN, Recteur de l'Université d'Abomey-Calavi, Directeur du Laboratoire d'Ecologie Appliquée, mon Directeur de mémoire, pour m'avoir accueilli dans le laboratoire et accepté d'encadrer ce travail malgré son agenda très chargé ;
- Au Dr Sabin G. H. GUENDEHOU, qui a répondu favorablement pour l'encadrement technique et scientifique de ce travail. Qu'il reçoive spécialement ici ma profonde gratitude pour l'accueil, l'assistance, la disponibilité, la confiance, l'encouragement. Sa sollicitude et ses grandes qualités humaines m'ont profondément marqué ;
- Au Dr Maguette KAIRE, Coordonnateur du Master, pour sa contribution à l'amélioration de la qualité scientifique du document et pour tous ses conseils malgré nos caprices tout au long de notre formation ;
- Au personnel enseignant du Centre Régional AGRHYMET pour avoir contribué à notre formation, à travers les enseignements de qualité qu'il nous a transmis ;
- Au personnel administratif du Centre Régional AGRHYMET pour son assistance ;
- A l'Union Européenne à travers le Programme PRGDT qui a financé le Master GDT.
- Aux sieurs Cédric GOUSSANOU et Hamzath KORA pour leur disponibilité et leur accompagnement technique et scientifique constant tout au long de mon stage. Infiniment merci.
- Aux forestiers en poste dans la Commune de Bantè qui nous ont facilité l'accès à la plantation domaniale de la forêt classée d'Agoua ;
- Aux sieurs Zakari OGBE, Bertin HOUNGBONON, Nouroudine BIAH, Bruno OGANANTOU, membres de l'équipe de collecte des données sur le terrain ;
- Aux Chef d'Arrondissement d'Agoua et Chef Village de Cloubou, pour l'hospitalité et leur accompagnement durant les travaux de terrain ;
- A mes oncles Comlan KOSSOU et Radji BIAOU, mes frères et sœurs, cousins et cousines ;
- A ma belle-famille IFENOU pour toute l'assistance morale ;
- A feu Arouna ANCRO, dans l'au-delà où tu es, reçois toute ma reconnaissance et qu'Allah t'accepte dans son Paradis Eternel ;

- Aux sieurs Djamiou AGBADJI, Colla OGNONDOUN et Lambert DOGO pour leur soutien à ma famille et à moi-même ;
- A mes amis, leurs soucis pour moi et leur encouragement ont été sources de motivation ;
- A tous mes camarades étudiants du master GDT pour la convivialité qui a régné durant notre passage à AGRHYMET.

Que tous ceux qui, d'une quelconque manière ont contribué à cette œuvre et que je n'ai pas pu citer, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude à leur égard.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Pédologie de la commune de Bantè	20
Tableau 2 : Outils et utilisation sur le terrain.....	23
Tableau 3 : Modèles de volume, paramètres des modèles, erreurs standard des paramètres, coefficients de détermination ajustés (R^2), Erreur résiduelle relative à la prédiction (RMSE) et facteur de correction.....	31
Tableau 4 : Modèles de biomasse, paramètres des modèles, erreurs standard des paramètres, coefficients de détermination ajustés (R^2), Erreur résiduelle relative à la prédiction (RMSE) et facteur de correction.....	31
Tableau 5 : Estimation de la biomasse des fûts par application des équations (1) et (2) et des fûts et branches par application des équations (3) et (4).	34
Tableau 6 : stock de carbone par hectare et stock global de la plantation suivant les différentes équations	35

Liste des figures

Figure 1 : Aptitude climatique à la culture de l'anacardier au Bénin	10
Figure 2 : Carte de la localisation de la commune de Bantè.....	17
Figure 3 : Variation des températures minimum, maximum et moyenne dans la Commune de Bantè (1984-2014).....	18
Figure 4 : Variation interannuelle des précipitations dans la Commune de Bantè de 1985-2015	18
Figure 5 : Diagramme ombrothermique de la commune de Bantè (1984 à 2014).....	19
Figure 6 : Carte de la plantation domaniale d' <i>Anacardium occidentale</i> réalisée à partir des données enregistrées lors du 'tracking'.	22
Figure 7 : Variation de la densité ligneuse en fonction des classes de DBH	30
Figure 8 : Modèle de prédiction de la biomasse des fûts avec l'intervalle de confiance	32
Figure 9 : Modèle de prédiction de la biomasse des fûts et branches avec l'intervalle de confiance	32
Figure 10 : Modèle de prédiction de volume des fûts avec l'intervalle de confiance.....	33
Figure 11 : Modèle de prédiction du volume des fûts et branches avec l'intervalle de confiance	33
Figure 12 : Niveau de biomasse en fonction du type d'équation appliquée.....	35

Liste des photos

Photo 1 : Plantation privée de <i>A. occidentale</i> à Agoua	9
Photo 2 : Tronc de <i>A. occidentale</i> à hauteur de poitrine dans une plantation privée à Atokolibé.....	9
Photo 3: Mesure de l'azimut pour définir une direction lors de l'installation d'une placette .	24
Photo 4: Layonnage pour la mesure de distance lors de l'installation d'une placette.....	24
Photo 5 : Mesure du diamètre au collet d'un arbre	25
Photo 6 : Mesure du diamètre à 1,3 m (DBH).....	25
Photo 7 : Mesure de la hauteur d'un pied de <i>A. occidentale</i>	26
Photo 8 : Collecte d'échantillon de bois à l'aide de la vrille.....	26
Photo 9 : Séchage des échantillons à l'étuve à 75°C pendant 72 heures.....	27
Photo 10 : Prise de poids sec des échantillons	27

Sigles et Abréviations

AFAT	:	Agriculture, Foresterie et autres Affectations des Terres
AGRHYMET	:	Centre Régional de Formation et d'Application en Agrométéorologie et Hydrologie Opérationnelle.
AIC	:	Akaike Information Criterion (Critère d'Information d'Akaike)
ASECNA	:	Agence de Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et au Madagascar
CARDER	:	Centre d'Action Régional pour le Développement Agricole
CASPA	:	Composante Appui au Secteur Privé
CCIB	:	Chambre du Commerce et de l'Industrie du Bénin
CCNUCC	:	Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CILSS	:	Comité Permanent Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
PADSA	:	Programme d'Appui au Développement du Secteur Agricole
CeCPA	:	Centre Communal de la Promotion Agricole
CeRPA	:	Centre Régional pour la Promotion Agricole
COP	:	Conférence des Parties
DBH	:	Diameter at Breast Height at 1.3 m aboveground (Diamètre à hauteur de poitrine à 1,3 m au-dessus du sol)
DGFRN	:	Direction Générale des Forêts et des Ressources Naturelles
EIDE	:	Echange International des Droits d'Emission
FAO	:	Fonds des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GDT	:	Gestion Durable des Terres
GES	:	Gaz à Effet de Serre
GIC	:	Groupement Intercommunal des Collines

GIEC	:	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
GIZ	:	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (coopération internationale allemande)
GPS	:	Global Positioning System
IDH	:	Indice de Développement Humain
INRAB	:	Institut National des Recherches Agricoles du Bénin
INSAE	:	Institut National de la Statistique et de l'Analyse Economique
IRRT	:	Institut Royal des Régions Tropicales
MAEP	:	Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche
MDP	:	Mécanisme pour un Développement Propre
MOC	:	mécanisme de Mise en Œuvre Conjointe
ONS	:	Office National de Soutien des revenus agricoles
ONU	:	Organisation des Nations Unies
PAMF	:	Projet d'Aménagement des Massifs Forestiers d'Agoua, des Monts Kouffè et de Wari-Marô
PASREA	:	Projet d'Appui à la Sécurisation des Revenus des Exploitants Agricoles
PDC	:	Plan de Développement Communal
PIB	:	Produit Intérieur Brut
PNUD	:	Programme des Nations Unies pour le Développement
REDD+	:	Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts, la conservation, la gestion durable des forêts et l'augmentation des stocks carbonés des forêts
RGPH	:	Recensement Général de la Population et de l'Habitation
RMSE	:	Root Mean Square Error (Erreur résiduelle liée à la Prédiction)

- RPFNE : Rapport du Premier Forum National sur l'Exportation
- RSE : Residual Standard Error (Erreur résiduelle standard du modèle)
- SADAIC-Bénin : Société pour le Développement de l'Agro-Industrie et le Commerce du Bénin.
- SCDA : Secteur Communal pour le Développement Agricole
- SDAC : Schéma Directeur d'Aménagement Communal
- SNAFOR : Société Nationale pour le Développement Forestier
- SONAFEL : Société Nationale des Fruits et Légumes.
- SONAPRA : Société Nationale de la Promotion Agricole

Formules chimiques

- CO₂ : Dioxyde de carbone
- CH₄ : Méthane
- SF₆ : Hexafluorure de soufre
- HFC : Hydrofluorocarbones
- PFC : Hydrocarbures perfluorés
- N₂O : Oxyde nitreux

Table de matières

Dédicace.....	i
Remerciements	ii
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	iv
Liste des photos.....	v
Sigles et Abréviations	vi
Formules chimiques	viii
Table de matières	1
Résumé	3
Abstract	4
Introduction	5
CHAPITRE I : ETAT DES CONNAISSANCES	9
1.1. Caractéristiques de <i>Anacardium occidentale</i>	9
1.1.1. Description	9
1.1.2. Ecologie de l'espèce <i>Anacardium occidentale</i>	10
1.1.3. Historique de l'introduction et pratique culturelle de l'espèce <i>A. occidentale</i> ...	11
1.2. Séquestration de carbone en foresterie	12
1.2.1. Phénomènes des Changements climatiques	12
1.2.2. Séquestration du carbone	13
CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES	17
2.1. Présentation de la zone d'étude	17
2.1.1. Situation géographique	17
2.1.2. Facteurs climatiques et édaphiques.....	17
2.1.3. Végétation	20
2.1.4. Facteurs humains et socio- économiques.....	22
2.1.5. Justification du choix de la zone d'étude	23
2.2. Matériel	23
2.3. Méthodes	24
2.3.1. Dispositif d'inventaire	24

2.3.2. Mesures dendrométriques et de laboratoire pour l'élaboration de modèles de volume et de biomasse de l' <i>Anacardium occidentale</i>	25
2.3.3. Inventaire pour l'estimation des stocks de biomasse et de carbone.....	27
2.3.4. Analyse des données	28
CHAPITRE III : RESULTATS	30
3.1. Densité de bois	30
3.2. Modèles de volume et de biomasse	30
3.3. Stock de Biomasse aérienne et de carbone.....	34
CHAPITRE IV : DISCUSSION.....	37
4.1. Densité de bois	37
4.2. Modèles de volume et de biomasse	37
4.3. Stocks de Biomasse et de carbone.....	38
4.4. Services environnementaux des plantations d' <i>Anacardium occidentale</i>	39
Conclusion.....	41
Bibliographie.....	42
ANNEXES.....	49

Résumé

Le phénomène des changements climatiques est devenu une préoccupation majeure pour la communauté internationale du fait des nombreuses implications qui compromettent le développement durable. La lutte contre les changements climatiques passant par l'atténuation a mis un accent particulier sur le renforcement des puits de carbone tels que les forêts naturelles et les plantations. Le Bénin dispose de milliers d'hectares de plantations d'anacardiens (*Anacardium occidentale* L.) et il est devenu intéressant de montrer l'importance de ces plantations en matière de lutte contre les changements climatiques. Cette étude, menée dans la commune de Bantè au centre du Bénin s'est fixée comme objectif de contribuer à la promotion des plantations d'anacardiens dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques. Plus spécifiquement, il s'agissait de développer des modèles allométriques spécifiques à *A. occidentale*, d'estimer la biomasse et le stock de carbone au niveau des plantations et d'identifier les opportunités dans le cadre du marché du carbone pour les services environnementaux de ces plantations. La méthode d'échantillonnage non destructif a été utilisée pour les mesures dendrométriques nécessaires à l'élaboration des modèles. Pour l'estimation des stocks de biomasse et de carbone de la plantation domaniale de la forêt classée d'Agoua, trente-deux (32) placettes carrées de 50 m x 50 m ont été installées. Les données collectées sur cinquante-deux (52) arbres ayant des DBH compris entre 3 et 69 cm ont permis de développer les modèles. Deux modèles allométriques de type logarithmique ont été développés : l'un utilise le DBH seul comme variable et l'autre combine le DBH et la hauteur des fûts. Les deux modèles ont été développés pour les fûts seuls d'une part et pour les fûts et branches d'autre part. L'analyse des critères de validation a montré que le modèle à deux variables est plus performant mais le modèle à une seule variable peut être utilisé en absence de la hauteur des fûts. L'application de l'équation à deux variables a donné 1894,56 tonnes de carbone dans les fûts et branches pour une superficie de 214 ha avec une densité moyenne de 107 arbres à l'hectare. Cela fait 8,85 tonnes à l'hectare. Les plantations d'anacardier possèdent un véritable service environnemental pouvant être valorisé sur le marché du carbone.

Mots clés : changement climatique, *Anacardium occidentale*, équation allométrique, stock de carbone, Bénin.

Abstract

Climate change became a major concern for the international community because of the diverse implications that compromise the sustainable development. The fight against climate change through mitigation placed particular emphasis on enhancement of carbon sinks such as natural forests and plantations. Benin has thousands of hectares of cashew plantations (*Anacardium occidentale* L.) and it has become interesting to show the importance of these plantations in climate change mitigation. The objective of this study carried out in the commune of Bantè in central Benin was to contribute to the promotion of cashew plantations in fighting against climate change. Specifically, the study intends to develop allometric models specific to *A. occidentale*, estimate biomass and carbon stock at the plantation level, and assess opportunities in the carbon market for environmental services of these plantations. Non-destructive sampling method was implemented in thirty-two (32) square plots of 50 m x 50 m to measure the parameters (e.g. diameter at breast height (DBH), stem height) required to develop volume and biomass models and estimate biomass and carbon stocks in the cashew plantation of Agoua National Forest Estate. The data collected on fifty-two (52) trees with DBH between 3 and 69 cm allowed to develop the models. Two allometric logarithmic models had been developed: one uses DBH as a single predictor and the other combines DBH and stem height. Both models were developed for stems only and for stems and branches. The analysis of the validation criteria showed that the model with two variables had a better predictive capacity. However, the model using DBH only can be applied in the absence of data on stem height. The application of two variables equation gave 1894,56 tons of carbon in stems and branches for 214 ha with a mean of 107 trees per hectare. That correspond to 8,85 tons per hectare. The plantations of cashew had an important environmental service that can be valued in carbon markets.

Key words : Climate change, *Anacardium occidentale*, allometric equation, carbon stock, Bénin.

Introduction

Les émissions accrues de gaz à effet de serre (GES) résultant des activités humaines ont entraîné une augmentation de 0,85 °C de la température moyenne de la Planète au cours du siècle écoulé. Celle-ci est prévue monter de plus de 1,5 °C au cours des cent (100) prochaines années si des mesures appropriées ne sont pas prises (GIEC, 2013). De légers changements de la température moyenne de la planète peuvent se traduire en changements climatiques et météorologiques importants et dangereux (FAO, 2016). Ces modifications des températures terrestres sont du fait de l'effet de serre causé par certains gaz appelés GES tels que CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆. L'accroissement des concentrations atmosphériques de ces GES, en particulier du CO₂, est essentiellement lié aux activités anthropiques (GIEC, 2013) dans les secteurs de l'industrie, de l'Agriculture, la Foresterie et autres Affectations des Terres (AFAT), de l'énergie, du transport, etc. (GIEC, 2014). Ces mêmes secteurs subissent en retour les impacts des changements climatiques qui affectent tous les secteurs de la vie économique et sociale des populations (Mbow, 2009) du fait que le profit et les services qu'on peut tirer des ressources naturelles représentent les principaux fondements de leurs modes de vies surtout en Afrique subsaharienne. Les changements climatiques affectent par conséquent les bases du développement durable, constituant ainsi un facteur central dans l'appauvrissement des populations locales.

Consciente de la nécessité de lutter contre le réchauffement du climat, la communauté internationale a engagé en 1990 un processus de limitation de la concentration des GES dans l'atmosphère. Une des étapes importantes de ce processus a été la conférence de Rio de Janeiro, qui a donné lieu à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) en 1992. Cette convention a pour objectif de stabiliser les concentrations de GES dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable (Nations Unies, 1992). Dans sa mise en œuvre, il a été élaboré le Protocole de Kyoto en 1997 qui a défini des mécanismes pour atteindre l'objectif ultime de la convention en fixant des objectifs chiffrés de limitation ou de réduction de GES aux pays industrialisés. Pour aider ces pays à atteindre leurs objectifs au moindre coût, le Protocole a introduit trois mécanismes de flexibilité qui sont : (i) le Mécanisme pour un Développement Propre (MDP), (ii) le mécanisme de Mise en Œuvre

Conjointe (MOC) et (iii) l'Echange International de Droits d'Emissions (EIDE). Le MDP est le seul mécanisme qui implique les pays en développement dans la lutte contre les changements climatiques en accueillant des projets de réduction des émissions sur leurs territoires (Alioui, 2011). Le MDP est destiné à aider les pays industrialisés (Parties de l'annexe I) à remplir leurs engagements chiffrés de limitation des émissions, en réalisant des réductions d'émissions dans d'autres pays, à un coût inférieur à ce qu'ils auraient pu réaliser au niveau national. Le MDP porte un grand intérêt aux projets liés au secteur de l'AFAT qui représente l'une des principales sources d'émission des GES. En effet, le GIEC (2014), a estimé qu'au total, 25 % des émissions de CO₂ proviennent du secteur de l'AFAT. La séquestration de CO₂ par boisement rentre ainsi théoriquement dans le marché de carbone. Aukland *et al.* (2002) cités par Mbow (2009) ont souligné que le MDP vise la promotion de la fixation des gaz par des puits naturels pour résorber le surplus et ramener les taux de gaz net de l'atmosphère au minimum acceptable. Ils ajoutent que les orientations de ce MDP au niveau des écosystèmes de savanes consistent à promouvoir des puits substantiels de carbone par la foresterie et la restauration des écosystèmes dégradés. Selon Dayabou (2014), les techniques de Gestion Durable des Terres (GDT) et les interventions de boisement comme les plantations peuvent être des actions qui, en plus des bénéfices directs dans la préservation de l'environnement et de l'aide aux populations par création de sources de revenu complémentaires, peuvent avoir aussi une valeur ajoutée dans le marché du carbone à travers la séquestration. En effet, la GDT accroît non seulement le stockage de carbone dans le sol avec de meilleures pratiques agricoles, mais elle utilise aussi les arbres et autres plantes vivaces qui stockent du carbone dans les exploitations agricoles (TerrAfrica, 2009).

Au Bénin, le secteur AFAT représente un poids stratégique dans le tissu social et économique du pays, en termes de contribution à la sécurité alimentaire, d'emplois, de formation des revenus et de création des biens et services. En 2011, plus de 60% des actifs masculins et 36% des actifs féminins réellement occupés exercent une profession agricole. L'Agriculture génère globalement 70% des emplois, procure environ 70 à 80% des recettes d'exportation et participe à hauteur de 15% aux recettes de l'Etat et à 38% du PIB (PNUD-IDH 2011, cité par FAO BENIN, 2012). Ce secteur est essentiellement basé sur la production de l'anacarde, de coton et de l'ananas qui sont aujourd'hui les principaux produits d'exportation. Mais cette agriculture reste encore traditionnelle dans la plupart des régions du pays malgré quelques efforts de sa mécanisation ces dernières années. Elle est pratiquée par la technique de culture itinérante sur brûlis et extensive. Elle consiste à défricher un lopin de terre de superficie

variable, en abattant et en brûlant la plus grande partie de la végétation, dans les forêts primaires et les savanes boisées (Biaou, 1995 cité par Koumaï, 2012). Dans ces conditions, les forêts reculent, la savanisation s'intensifie, les écosystèmes naturels sont dégradés (Yabi, 2008) et une importante quantité de CO₂ est émise dans l'atmosphère. Depuis 1991, Mama et Houndagba ont estimé que 10 000 hectares de végétation naturelle sont détruits chaque année au Bénin du fait des défrichements agricoles. Selon FAO (2015), au Bénin la superficie forestière était de 5,761 million d'hectares en 1990. Cette superficie est passée successivement à 4,811 millions en 2005 et à 4,311 millions d'hectares en 2015 ; soit un taux moyen de 58 000 hectares de perte par an.

En réponse à cette situation, les exploitants agricoles ont adopté des systèmes agroforestiers en pratiquant des cultures annuelles telles que le coton (*Gossypium barbadense*), l'igname (*Dioscorea spp.*), le manioc (*Manihot esculenta*), les céréales et les légumineuses aux côtés des plantes agricoles pérennes de rente comme le cacaoyer (*Theobroma cacao*), le caféier (*Coffea arabica*), le karité (*Vitellaria paradoxa*), l'anacardier (*Anacardium occidentale*), l'hévéa (*Hevea brasiliensis*) (Tandjiékpon, 2005 ; Balogoun *et al.*, 2014). En ce qui concerne l'agroforesterie à base d'anacardier, l'Etat béninois, à partir de 1963, a développé des champs collectifs d'anacardiens dont l'objectif était de protéger l'environnement (Lemaître *et al.*, 2003). Compte tenu de son importance du point de vue production fruitière et protection de l'environnement, plusieurs projets et institutions se sont lancés dans la promotion de sa culture. Les actions conjuguées des uns et des autres ont suscité l'engouement des producteurs qui installent chaque année des centaines d'hectares. Les estimations statistiques ont souligné que les superficies des plantations d'anacardiens au Bénin étaient de 10 000 hectares en 1990 et plus de 190 000 hectares en 2010 distribués sur l'ensemble du territoire national (Tandjiékpon *et al.*, 2010). De même, les exportations des produits anacardes se sont accrues passant de 116 398 tonnes de noix brutes en 2008 à 138 470 tonnes en 2011 (FaoStat, 2011 cité par MAEP, 2013). A Bantè, les superficies emblavées par les producteurs ont augmenté au fil du temps et sont passées de 18 000 hectares en 2005 à 31 200 hectares en 2015 ; pour une production passant de 8 550 tonnes à 14 820 tonnes au cours de la même période (CeCPA Bantè, 2016).

Le GIEC, dans son Résumé à l'intention des Décideurs en matière de l'atténuation des changements climatiques en 2014, a reconnu le boisement, la gestion durable des forêts, la réduction du déboisement, la gestion des terres cultivées et la restauration des sols organiques comme des mesures d'atténuation présentant le meilleur rapport coût-efficacité. Dans ce

contexte, et vu les défis actuels en matière du renforcement des puits de carbone, il est donc important d'étudier le potentiel de séquestration de carbone des peuplements d'anacardiens afin de montrer leur importance dans la lutte contre les changements climatiques au Bénin. D'un point de vue climatique, la connaissance du potentiel d'atténuation des changements climatiques des agroforêts à anacardiens constitue un nouvel axe de recherche à explorer au regard de l'importance et de propagation rapide de cette espèce au Bénin et des défis actuels en matière de la réduction des émissions de GES dont le principal est le CO₂. C'est dans ce cadre que s'inscrit cette étude intitulée « **Evaluation du stock de carbone des peuplements d'anacardiens (*Anacardium occidentale* L.) : cas de la plantation domaniale de la commune de Bantè au centre du Bénin** ».

L'objectif global de la présente étude est de contribuer à la promotion des plantations d'anacardiens dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques.

De façon spécifique il s'agit de :

- élaborer les équations allométriques correspondantes à *A. occidentale* ;
- estimer la biomasse aérienne (contenue dans les fûts et branches) des arbres et le stock de carbone au niveau de la plantation domaniale de *A. occidentale* de la forêt classée d'Agoua dans la commune de Bantè ;
- analyser les opportunités de compensation financière des services environnementaux des plantations de *A. occidentale*.

Pour atteindre ces objectifs, l'étude s'est basée sur les hypothèses selon lesquelles :

- les équations allométriques permettent de faire une bonne estimation de la biomasse et du stock de carbone de *A. occidentale* ;
- les plantations de *A. occidentale* constituent une opportunité de séquestration de carbone ;
- le stock de carbone des plantations de *A. occidentale* représente un service environnemental à valoriser.

CHAPITRE I : ETAT DES CONNAISSANCES

1.1. Caractéristiques de *Anacardium occidentale*

1.1.1. Description

Anacardier ou acajou ou cajou en français, cashew tree en anglais, *Anacardium occidentale* est une espèce diploïde (Purseglove, 1968). C'est une angiosperme de la classe des dicotylédones, de l'ordre des sapindacées et de la famille des anacardiées qui renferme 73 genres et environ 600 espèces. Le genre *Anacardium* contient 8 espèces natives de l'Amérique tropicale parmi lesquelles *A. occidentale* est cultivée au Bénin (Tandjiékpon, 2005).

L'anacardier (photo 1) est un arbre fruitier. Sa hauteur totale dépasse rarement 8 à 10 mètres. Dans son aire d'origine, il peut atteindre 20 mètres de haut mais sa hauteur avoisine généralement 10 mètres à Bassila (Bénin) selon une étude réalisée par Lacroix (2003). Son tronc peut atteindre un mètre de diamètre (à hauteur de poitrine soit 1,3m au-dessus du sol) (photo 2). Le Port de l'arbre est globuleux, soit un hémisphère un peu aplati avec une frondaison large descendant jusqu'au sol lorsque l'arbre n'a pas de concurrence arborée et herbacée. La concurrence arborée fait qu'il se bat pour obtenir un maximum de place à la lumière et va pousser ses branches le plus loin possible dans la cime de son concurrent, mais jamais à l'intérieur car ses bourgeons ont besoin de lumière pour se développer. Son port est tourmenté, avec un fût tortueux (Lacroix, 2003). Les branches, nombreuses, sont extrêmement sensibles au feu et lorsqu'elles sont détruites par le feu, il faut de longues années avant que l'arbre ne refasse sa couronne et plus encore lorsque l'arbre est âgé. L'écorce est grise et en général assez lisse. Les feuilles sont simples, alternes, avec une couleur verte foncée sur sa face supérieure et plus claire sur la face inférieure (Lacroix, 2003 ; Adégbola et Ofio, 2005 ; Tandjiékpon, 2005).



Photo 1 : Plantation privée de *A. occidentale* à Agoua



Photo 2 : Tronc de *A. occidentale* à hauteur de poitrine dans une plantation privée à Atokolibé

1.1.2. Ecologie de l'espèce *Anacardium occidentale*

Selon plusieurs auteurs (FAO, 1988 ; French *et al.*, 1994 ; Gupta, 1993 ; Nair *et al.*, 1979 ; Nambiar *et al.*, 1990 ; Ohler, 1979 ; Webb *et al.*, 1984) cités par Tandjiékpon (2005), *A. occidentale* se développe bien depuis le niveau de la mer jusqu'à l'altitude de 1200 mètres en climat chaud et humide mais donne de meilleurs résultats dans de basses altitudes. Elle s'adapte bien aux régions semi-arides et arides avec une période sèche de 4 à 6 mois, et peut se développer sous une pluviométrie annuelle comprise entre 500 et 3700 mm. *A. occidentale* tolère des régimes pluviométriques de type uni et bimodal. Toutefois, les pluies et temps nuageux durant la floraison affectent la production de noix. La moyenne de température annuelle acceptée par l'anacardier est comprise entre 22 et 35°C. Celle des mois les plus chauds se situe entre 35 - 48°C, tandis que pour les mois frais, elle est de 16 - 24°C.

Odidi (2000) et Djaha *et al.* (2008) ont souligné que l'anacardier est une plante qui tolère les fortes chaleurs et résiste aux vents mêmes les plus violents bien que ces derniers soient mauvais en période de fructification. Il pousse sur les sols les plus pauvres et dégradés par l'érosion.

L'INRAB (1995) a réalisé le découpage des zones agro-écologiques favorables à la culture de l'anacardier au Bénin. Ce découpage détermine trois (3) zones. Il s'agit de la zone Centre (Zone 1), de la zone Nord-Est (Zone 2) et de la zone Nord-Ouest (Zone 3) du Bénin (Figure 1). La commune de Bantè, située dans le département des Collines (Zone 1), appartient intégralement à la zone qualifiée de très favorable. Cette zone est caractérisée par un climat soudano-guinéen avec des sols ferrugineux tropicaux lessivés ou appauvris (INRAB, 1995).

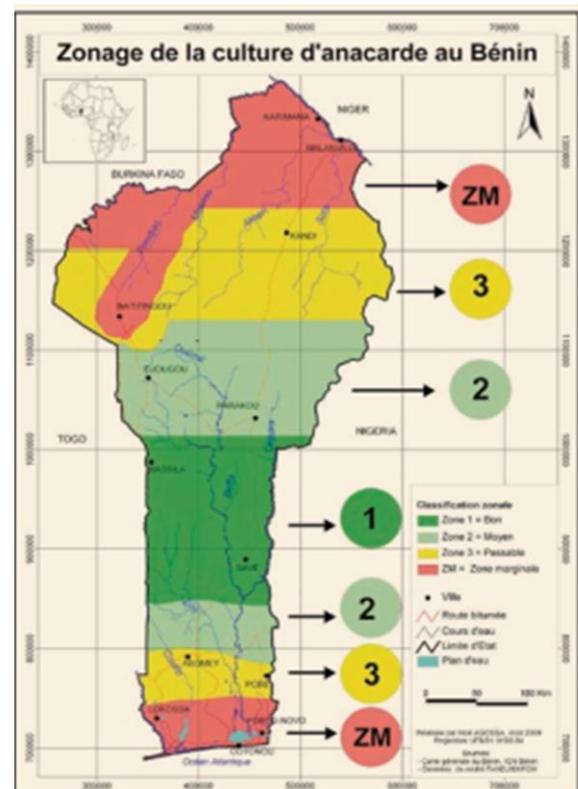


Figure 1 : Aptitude climatique à la culture de l'anacardier au Bénin

Source : Tandjiékpon, (2010) modifié.

1.1.3. Historique de l'introduction et pratique culturelle de l'espèce *A. occidentale*

Les premières graines d'anacardier auraient été importées du Brésil et introduites au Bénin dans les années 60. La plantation d'anacardiers a démarré en 1960 au niveau des champs collectifs dans lesquels les paysans plantaient quelques plants qu'ils se procuraient gratuitement. L'introduction de cette nouvelle plantation a été irrégulièrement adoptée d'un village à un autre. Les premières plantations d'anacardiers à grande échelle ont été réalisées entre 1962 et 1965. Les plantations industrielles ont été financées par les deuxième et troisième Fonds Européen pour le Développement (FED) de 1967 à 1976. Ces financements ont permis à la Société Nationale pour le Développement Forestier (SNAFOR) d'installer 5 323,45 ha de plantations domaniales et de construire à Parakou l'usine de traitement de noix d'anacarde en 1974. Ce même financement a permis l'installation de 4 503 ha de plantations privées.

La SNAFOR ayant été liquidée en 1982 suite à des problèmes de gestion, la Société Nationale des Fruits et Légumes (SONAFEL) a repris l'activité de la filière dans un contexte plus porteur. Cependant la SONAFEL a dû être liquidée à son tour et la gestion des vergers a été confiée aux Centres d'Action Régional pour le Développement Agricole (CARDER) du Zou, du Borgou et de l'Atacora selon un cahier de charges établi par le Ministère du Plan et des Affaires Economiques. Les CARDER (actuel Centre Régional pour la Promotion Agricole, CeRPA) ont adopté une stratégie de gestion communautaire qui associe les communautés au partage des revenus issus de la vente des noix. De 1982 à 1983, les CARDER ont connu des difficultés financières et les plantations ont été abandonnées et laissées sans entretien de 1982 à 1984.

Entre 1985 et 1995, les plantations dont les superficies encore exploitables étaient estimées à 3.000 ha ont connu les mêmes expériences, sans succès, réalisées successivement avec la SONAFEL, la SONAPRA et la Direction des Eaux, des Forêts et de la Chasse. Ainsi, en 1995, les plantations longtemps abandonnées ont été mises en affermage à deux sociétés : la SADAIC-Bénin et AGRICAL-Bénin qui ont reçu respectivement 20 plantations et deux plantations. Ces contrats d'affermage ont rencontré quelques problèmes dans leur exécution et les sociétés adjudicataires n'ont pas pu honorer leurs engagements contractuels (Adégbola et ofio, 2005 ; Yabi, 2008 ; PASREA-ONS, 2009). Ces situations ont fait que les plantations ont été en grande partie converties en des terres agricoles ou dévastées par les feux de brousse. De nos jours, ces plantations domaniales sont laissées à la libre gestion des communautés. Il est à noter qu'actuellement les plantations privées dépassent de loin celles domaniales (Yabi, 2008).

En ce qui concerne la pratique culturale, la culture associée est le mode de culture généralisé au Bénin. La durée des associations cultures annuelles-anacardières peut atteindre 10 ans et varie selon la densité de plantation d'anacardières. Les cultures généralement associées à l'anacardier sont l'igname (*Dioscorea spp.*), le coton (*Gossypium barbadense*), le maïs (*Zea mays*), le manioc (*Manihot esculenta*), le niébé (*Vigna unguiculata*), le soja (*Glycine max*), l'arachide (*Arachis hypogea*), etc. (Tandjiékpon, 2005 ; Yabi, 2008 ; PASREA-ONS, 2009 ; Balogoun *et al.*, 2014). Elle est adoptée par la grande majorité des producteurs qui installent des plantations individuelles. Cette association de la culture d'anacarde aux cultures annuelles s'explique non seulement par la nécessité d'une exploitation rationnelle des terres qui de plus en plus sont soumises à une forte pression mais aussi compte tenu de son importance socio-économique (PASREA-ONS, 2009).

1.2. Séquestration de carbone en foresterie

1.2.1. Phénomènes des Changements climatiques

Selon la CCNUCC (Nations Unies, 1992), on entend par « changements climatiques » des changements de climat qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables. On note déjà, à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer. Les observations effectuées sur tous les continents et dans la plupart des océans montrent qu'une multitude de systèmes naturels sont touchés par les changements climatiques régionaux, en particulier par la hausse des températures (GIEC, 2007 ; GIEC, 2013).

En effet, la modification des températures terrestres est du fait de l'effet de serre causé par les GES qui retiennent la chaleur restituée par la terre et entraînent ainsi une augmentation sensible et progressive des températures terrestres émises.

Les risques liés au réchauffement planétaire n'épargnent aucun continent et affectent tous les secteurs de la vie économique et sociale des populations. Mbow (2009) a souligné que les impacts des changements climatiques affectent les secteurs agricoles, forestiers, énergétiques, les établissements humains et autres conditions de vie des populations. Selon le quatrième rapport du GIEC (2007), en Afrique, d'ici 2020, 75 à 250 millions de personnes devraient souffrir d'un stress hydrique accentué par les changements climatiques. Dans certains pays, le rendement de l'agriculture pluviale pourrait chuter de 50 % d'ici 2020. On anticipe que la

production agricole et l'accès à la nourriture seront durement touchés dans de nombreux pays, avec de lourdes conséquences en matière de sécurité alimentaire et de malnutrition. Selon plusieurs scénarios climatiques, la superficie des terres arides et semi-arides pourrait augmenter de 5 à 8 % d'ici à 2080. Ces conséquences néfastes des changements climatiques nécessitent une lutte concertée sur le plan régional et international car l'environnement n'a pas de frontière.

Pour faire face au réchauffement de la planète, les Nations Unies ont signé en 1992 la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) dont l'objectif est la stabilité des émissions de gaz à effet de serre. Cette stabilité passe par la réduction des émissions et la séquestration du carbone.

1.2.2. Séquestration du carbone

Dans le cadre de la mise en œuvre de la CCNUCC, la communauté internationale a élaboré un traité, le Protocole de Kyoto, signé en 1997 et entré en vigueur en 2005, qui vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre en définissant des mécanismes de flexibilité. Le MDP est l'un des trois mécanismes coopératifs du Protocole de Kyoto destinés à aider les pays industrialisés (Parties de l'annexe I) à remplir leurs engagements chiffrés de limitation des émissions, en réalisant des réductions d'émissions dans d'autres pays, à un coût inférieur à ce qu'ils auraient pu réaliser au niveau national (Nations Unies, 1998). Le MDP vise à aider les pays en développement à parvenir au développement durable tout en contribuant à stabiliser les concentrations de Gaz à Effet de Serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Ce mécanisme permet de limiter les émissions dans l'atmosphère et/ou d'accroître les capacités de séquestration par la biosphère de six GES (CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, SF₆).

Après 2005, il est apparu nécessaire de prendre en compte la lutte contre la déforestation et la dégradation des forêts dans le cadre de la réduction des émissions des GES. Les concepts de REDD et de REDD+ firent alors leur apparition. Le mécanisme REDD+ vise à encourager les pays en voie de développement couverts par des grandes étendues de forêts, à conserver intact leur massif forestier moyennant une rémunération financière issue des crédits carbone (ONU-REDD, 2011 ; Moundounga, 2012). MDP et REDD+ ont donc pour objectif la limitation des sources et le renforcement des puits de carbone.

La CCNUCC, en mettant les pays industrialisés (Annexe I du Protocole de Kyoto) « à l'avant-garde de la lutte contre les changements climatiques et leurs effets néfastes », a imposé le

transfert des fonds et des technologies vers les pays en développement (PED) dans le cadre des mécanismes MDP et REDD+. Mais, au lieu d'assister à une stabilisation des émissions, les PED ont vu accroître leurs émissions. En effet, entre 1990 et 2005, les émissions des pays développés ont diminué de 1 % alors que celles des PED ont crû de plus de 60 % ; et cette tendance devrait encore s'accroître dans les années à venir (World Resource Institute, sans date cité par Morel et Delbosc, 2012). Il est alors apparu l'urgence d'inciter les PED à intégrer dans leur politique de développement un effort de limitation des émissions qui constitue donc l'un des enjeux majeurs des engagements climatiques internationaux post-Kyoto. C'est dans ce contexte qu'est né un nouveau mécanisme appelé « mesures d'atténuation appropriées au niveau national » (ou NAMA pour *Nationally Appropriate Mitigation Actions*). Des offres d'engagements nationaux volontaires de réduction des émissions ont été faites par les pays émergents et les pays développés ont collectivement promis d'apporter un « appui renforcé » à la mise en place de ces NAMA. Parallèlement, ils se sont engagés à mobiliser des financements significatifs à l'horizon 2020, destinés, entre autres, à soutenir les politiques climatiques plus larges des pays en développement (Delbosc et Jeulin, 2011). Dans tous les cas, MDP, REDD+ et NAMA accordent une importance capitale au renforcement des puits carbone.

La question de la séquestration du carbone a été officiellement reconnue comme une option pertinente pour atténuer le taux de carbone dans l'atmosphère à la COP7 de Marrakech en 2001. A partir des estimations fournies par la recherche, il a été montré que cette séquestration pourrait contribuer à une réduction de 25 % de carbone si des mécanismes efficaces étaient mis en œuvre. Il faut aussi noter que 40 % des émissions totales de carbone sont absorbées par la végétation terrestre (Campagna, 1996; Ciesla, 1997; Lippke *et al.*, 2003 cités par Mbow, 2009) et 50 % de la végétation forestière est constituée de carbone (Brown, 1997).

La séquestration de carbone dans les écosystèmes est la résultante de la photosynthèse (fixation de carbone) et la respiration (émission de carbone).

Les plantes assimilent le CO₂ atmosphérique et le transforment en sucres (matières organiques). Pour Waring *et al.* (1998) cité par Tsoumou (2014) la majorité de la photosynthèse se fait dans le feuillage mais aussi (très peu) dans les tiges, les branches, l'écorce, les cotylédons, les bourgeons et les fruits. Cependant, plus de 35 à 60 % de carbone fixé est réémis sous forme de CO₂ par la respiration liée à la croissance et à l'entretien des tissus des végétaux, la moyenne étant d'environ 50 %. La respiration est le processus métabolique qui permet à l'arbre de libérer et d'utiliser l'énergie emmagasinée dans les glucides synthétisés durant la

photosynthèse. Ces auteurs concluent alors que la différence entre la quantité de carbone fixée en photosynthèse et celle émise par la respiration des plantes constitue la production primaire nette, c'est-à-dire la quantité de carbone contenue dans les branches, feuilles, racines et réserves énergétiques produites. Mais de cette production primaire nette, il convient de déduire les pertes directes (matière organique brûlée ou mangée) et indirectes (matières organiques mortes) pour obtenir un bilan appelé production nette de l'écosystème. Cette production représente la partie quantifiée dans les estimations de stock de carbone. Ainsi la végétation terrestre, aussi bien les forêts naturelles que les plantations, constitue un espoir de réduction significative des GES, d'où sa prise en compte dans les marchés de carbone. Cependant, pour tirer le meilleur profit de ces marchés, il faut se soumettre à une comptabilité précise des stocks et des processus qui influencent le bilan du carbone.

1.2.3. Méthodes d'évaluation de stock de carbone et les modèles allométriques

En écologie, la biomasse désigne la masse totale de matière vivante de toutes les espèces présente dans un milieu donné. En foresterie, plusieurs auteurs (Brown, 1997 ; Kairé *et al.*, 2013 ; Tsoumou, 2014 ; Laminou-Manzo *et al.*, 2015) ont réparti la biomasse végétale en deux catégories : biomasse épigée et biomasse hypogée. La biomasse épigée est la masse végétale des parties aériennes (feuilles, branches et tronc) des végétaux vivants ou morts alors que la biomasse hypogée est la masse végétale de la partie souterraine constituée des racines. Brown (1997) a souligné que la biomasse permet d'estimer la quantité potentielle de carbone pouvant être libérée dans l'atmosphère sous forme de CO₂ en cas de destruction de la surface forestière et la quantité de carbone pouvant être captée à travers les plantations ou la reforestation. En effet, il a été signalé dans les études pantropicales de Brown (1997) que le carbone contenu dans la biomasse sèche d'un arbre est de 50 % alors que le GIEC (2006) a indiqué une valeur par défaut de 47%. Mais les travaux de Guendehou *et al.* (2012), réalisés localement (au Bénin), ont montré une valeur égale à 49,05% comme facteur de conversion de la biomasse au carbone. Ce qui signifie que l'utilisation de la valeur de Brown (1997) surestime le stock de carbone alors que la valeur par défaut du GIEC le sous-estime. Dans tous les cas, l'estimation de la biomasse devient une étape essentielle dans l'évaluation du stock de carbone et les approches utilisées varient en fonction de plusieurs facteurs : types de végétation, objectifs initiaux, méthodes statistiques d'échantillonnage, techniques de mesures, etc. (Mbow, 2009). Mais globalement, il existe deux méthodes d'évaluation de la biomasse et le stock de carbone : la méthode destructive et la méthode non destructive.

La méthode destructive consiste à l'abattage des arbres. L'échantillon est coupé et chaque pied est compartimenté en tronc, branches, feuilles et racines. Les troncs, les branches et les racines sont découpés en billons et pesés à l'aide d'une balance. Des prélèvements (aliquotes) sont faits pour les travaux de laboratoire (Kairé *et al.*, 2013 ; Laminou-Manzo, 2015 ; Moundounga, 2012). Mais pour Guendehou et Lehtonen (2014), cette méthode ne semble pas être appropriée car elle implique une importante perte de carbone et donc apparaît comme une source d'émission de CO₂ dans l'atmosphère. Elle contribue également à la destruction des écosystèmes forestiers. Pour eux, la recherche scientifique traitant de la biomasse forestière et de la quantification de carbone devrait être orientée vers des approches, qui causent des blessures mineures aux arbres et limitent la perturbation des écosystèmes tout en fournissant des résultats scientifiques précis. D'où la deuxième méthode basée sur des équations ou modèles mathématiques, dits allométriques, qui permettent de prédire la biomasse d'un arbre à partir de paramètres dendrométriques tels que le diamètre et la hauteur ou la combinaison des deux (Brown, 1997 ; Guendehou *et al.* 2012, Guendehou et Lehtonen, 2014). Cette méthode a l'avantage d'être utilisée dans les écosystèmes protégés et dans les plantations comme celles de *A. occidentale*.

Pour estimer les stocks de carbone dans les forêts surtout en Afrique, les modèles allométriques développés par Chave *et al.* (2005) sont les plus utilisés alors que ces équations ont été développées à partir des données de biomasse provenant des forêts tropicales d'Amérique, d'Asie et d'Océanie. Conscients de cette situation, Chave *et al.* (2014) ont amélioré les modèles en incluant cette fois-ci des données provenant des forêts tropicales africaines. Cependant, ces modèles restent génériques et pantropicaux. Mais avec le défi actuel en matière des changements climatiques, il y a eu un regain d'intérêt pour cet axe de recherche et plusieurs travaux sur la quantification de la biomasse des arbres de forêts africaines ont été menés afin de combler cette lacune (Djomo *et al.* 2010; Moundounga, 2012; Guendehou *et al.*, 2012 ; Chabi *et al.*, 2016 ; Goussanou *et al.*, 2016, Laminou-Manzo, 2015 et Ichaou, 2010 cité par Dayabou, 2014). Toutefois, les équations allométriques issues de ces études sont pour certaines spécifiques à des espèces données et pour d'autres génériques. Aucun modèle spécifique à *A. occidentale* n'est rencontré au cours de cette revue de littérature.

CHAPITRE II: MATERIEL ET METHODES

2.1. Présentation de la zone d'étude

2.1.1. Situation géographique

La Commune de Bantè est située à l'extrême nord-ouest du Département des Collines (Centre-Bénin) et est limitée par les Communes de Savalou au sud, de Bassila au nord, de Glazoué à l'est et la République du Togo à l'ouest (figure 2). Elle se trouve entre les parallèles 8°0' et 8°40' de latitude Nord et les méridiens 1°38' et 2°10' de longitude Est. D'une superficie de 2 695 km², elle occupe environ 19,44% du territoire du Département des Collines, et 2,49% du territoire national. Bantè, chef-lieu de la commune est situé à 296 km de Cotonou, capitale économique du Bénin (PDC2 Bantè, 2010).

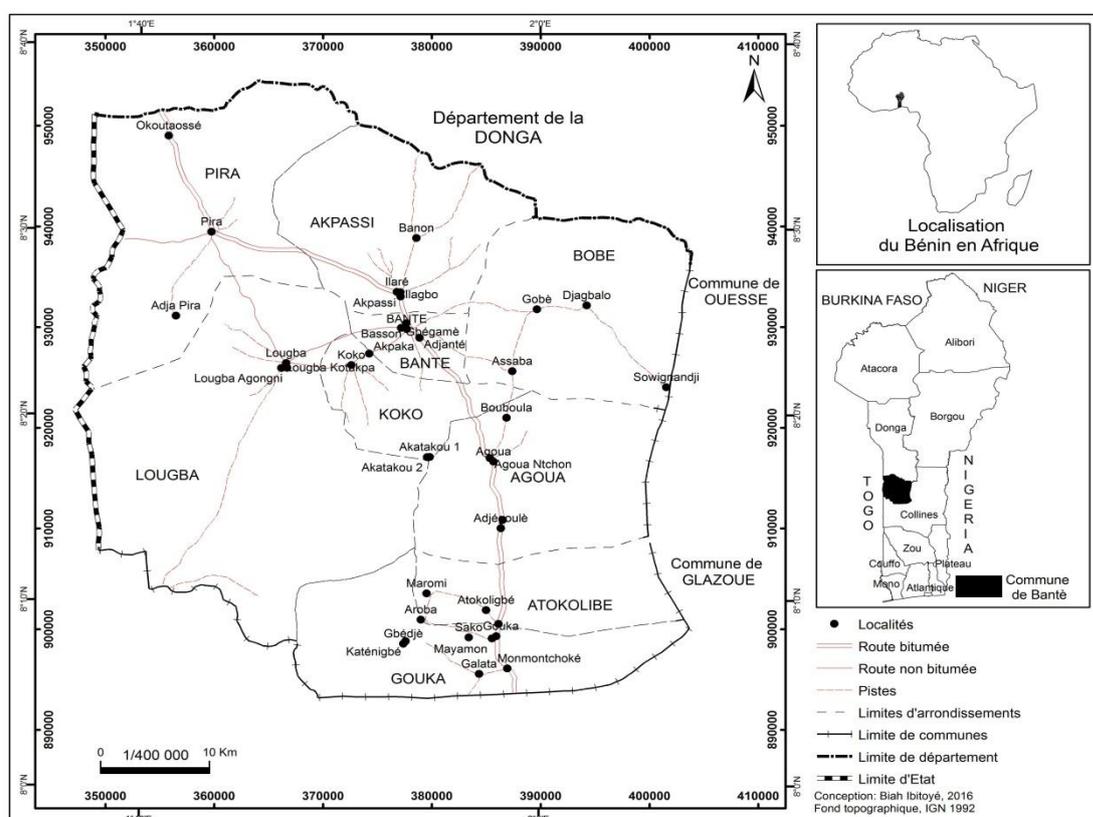


Figure 2: Carte de la localisation de la commune de Bantè

2.1.2. Facteurs climatiques et édaphiques

Le milieu d'étude se trouve dans la zone de transition entre le climat subéquatorial du Bénin méridional et le climat soudanien du Bénin septentrional. C'est la zone où s'estompent les influences de la mousson du sud-Ouest et de l'alizé continental appelé harmattan du nord-Est. La saison pluvieuse couvre la période d'avril à octobre et la saison sèche de novembre à mars.

- **Température**

Dans la région de Bantè, la température varie selon les mois de l'année (figure 3). Ainsi l'évolution des températures moyennes mensuelles de 1984 à 2013 montre que les températures les plus élevées s'enregistrent en février, où elles dépassent 37°C, alors que les plus faibles s'observent en août (21,63°C). Généralement, les maxima avoisinent 32°C, tandis que les minima tournent autour de 23°C. Les maxima varient entre 29,34°C et 37,15°C, les minima varient entre 21,63°C et 24,10°C et les moyennes varient entre 25,49°C et 30,35°C. Ces valeurs constituent un atout pour la production de l'anacardier (voir écologie de l'espèce).

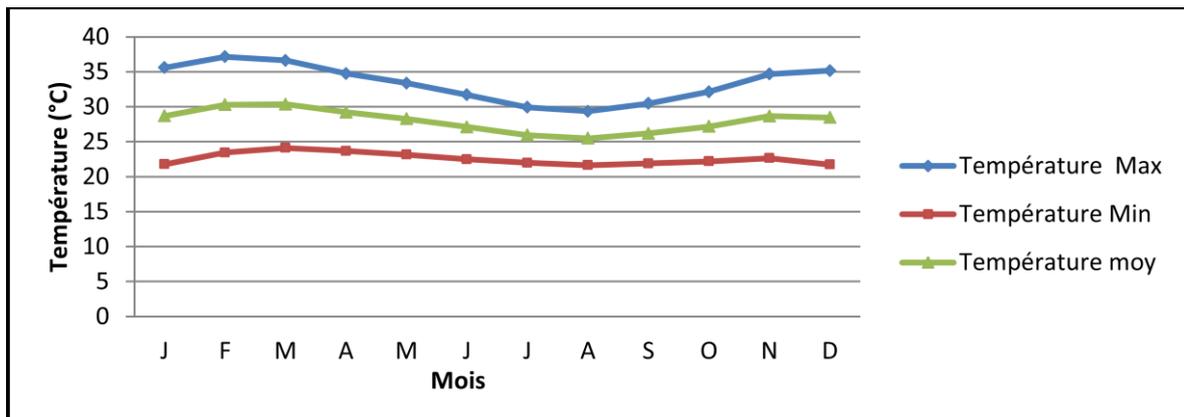


Figure 3: Variation des températures minimum, maximum et moyenne dans la Commune de Bantè (1984-2014)
Source : ASECNA, 2016

- **Pluviométrie**

Les données pluviométriques de la zone d'étude calculées sur une période de 30 ans (1985-2015), montrent une hauteur moyenne annuelle de 1 126 mm de pluie avec une tendance globale légèrement à la hausse (figure 4). Les minima sont de l'ordre de 600 mm, tandis que les maxima sont de 1 600 mm de pluie.

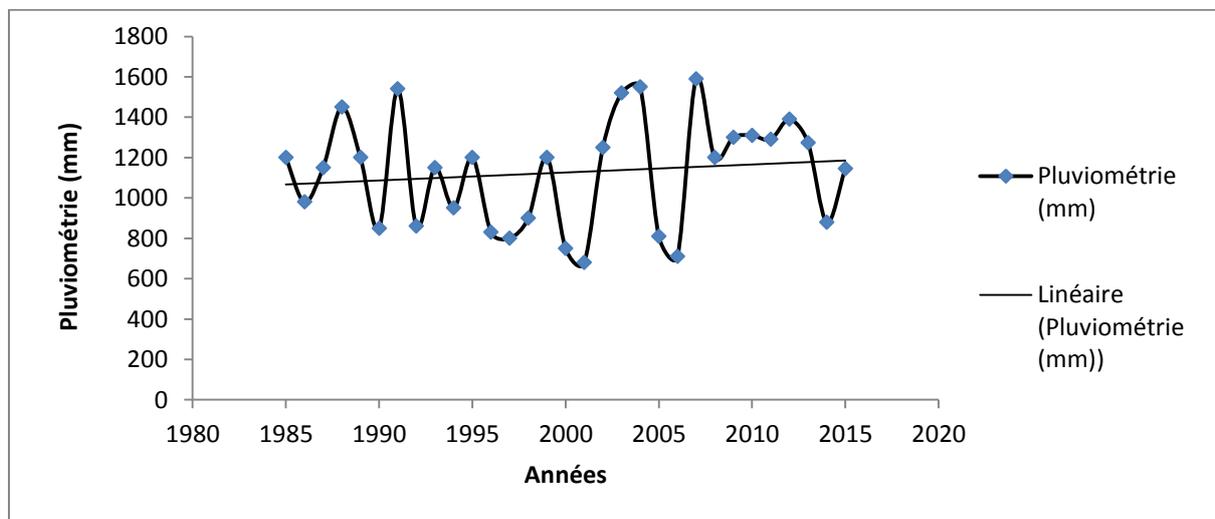


Figure 4: Variation interannuelle des précipitations dans la Commune de Bantè de 1985-2015

L'intérêt de l'étude de la répartition des pluies réside dans la connaissance de la période humide de l'année favorable à la végétation, mais surtout, de la période sèche au cours de laquelle les plantes sont soumises à des conditions de vie difficiles. En effet, selon le principe de Franquin (1969), un mois est sec, si la hauteur des pluies enregistrée est inférieure au double de la moyenne thermique de ce mois. Suivant ce principe, cinq (5) mois sont considérés comme secs à Bantè à savoir les mois de novembre, décembre, janvier, février et mars (figure 5). Les précipitations sont plus abondantes en mois d'avril et entre les mois de août et de septembre qui paraissent les mois les plus arrosés et humides de l'année, alors que les mois de décembre et de janvier sont les plus secs. Ces données favorisent la croissance, le développement végétatif et la bonne fructification de l'anacardier.

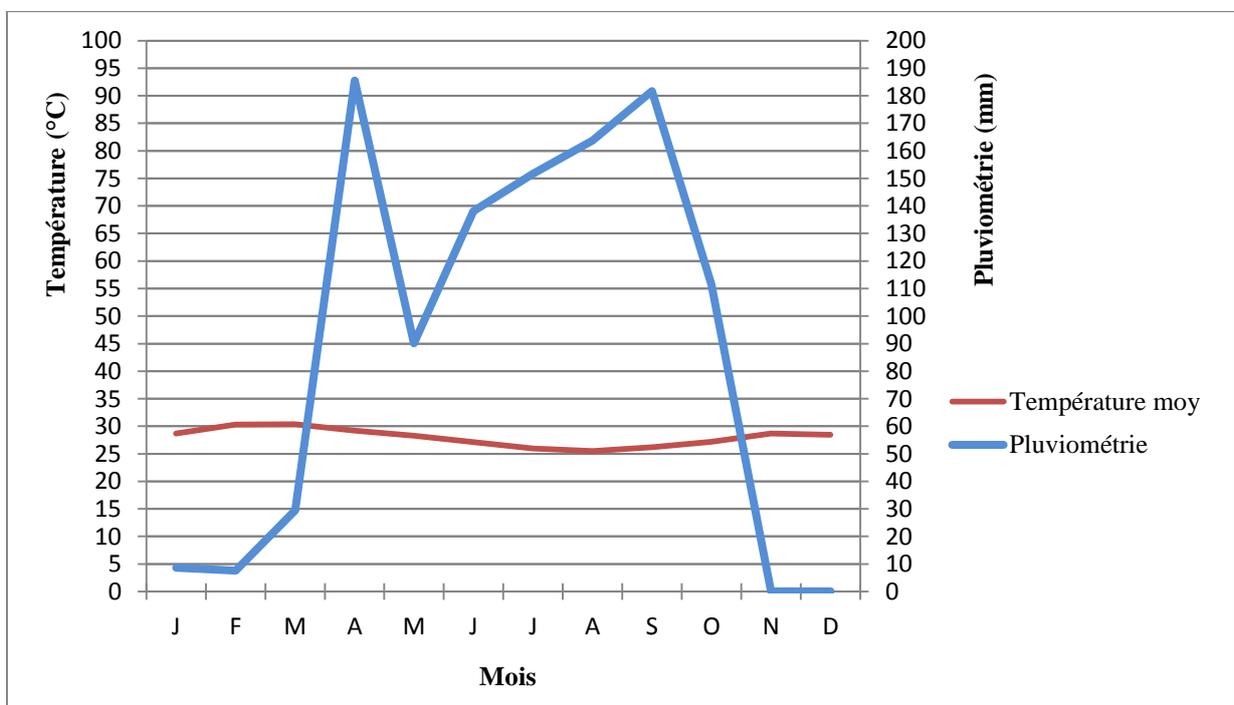


Figure 5 : Diagramme ombrothermique de la commune de Bantè (1984 à 2014)

- **Sols**

Quatre principaux types de sols sont identifiés dans la zone. Il s'agit des sols ferrugineux (prédominants), sols ferrallitiques, des sols hydromorphes et des sols minéraux (tableau 1).

Tableau 1 : Pédologie de la commune de Bantè

Sols	Recouvrement	
	Km ²	%
Sols ferrugineux tropicaux à concrétions sur embréchite	465,3	17,3
Sols ferrugineux tropicaux lessivés sans concrétions	529,7	19,6
Sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions	1039,9	38,7
Sols ferrugineux tropicaux indurés	270,5	10,1
Sols ferrugineux tropicaux lessivés indurés sur embréchite	124,1	4,6
Sols ferrugineux tropicaux appauvris sans concrétions	92,5	3,4
Sols ferrugineux tropicaux hydromorphes sur embréchite et granite	14,1	0,5
Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériau kaolinique	6,2	0,2
Sols ferralitiques faiblement désaturés	64,1	2,4
Sols ferralitiques moyennement désaturés sur gneiss à biotite	6,2	0,2
Sols minéraux bruts sur roche affleurante ou subaffleurante	1,4	0,1
Sols minéraux bruts sur cuirasse	22,4	0,8
Sols hydromorphes a gley lessivés sur embréchite	53	2

Source : SDAC Bantè, 2012 modifié

Une grande proportion de ces sols est aujourd'hui occupée par les plantations d'anacardiens.

- **Relief et hydrographie**

Le relief de la commune est caractérisé par un plateau au nord et une plaine au sud. Le dénivelé est d'environ 238 m entre le point le plus haut situé dans la portion nord-Ouest de la commune et le point le plus bas au sud-Est. Dans l'ensemble, le relief est peu accidenté et favorable au maintien d'une stabilité relative des terres fertiles (SDAC Bantè, 2012).

La commune se retrouve sur trois bassins versants. Plus des trois-quarts de la commune (2 702 km²) se drainent vers le fleuve Zou et le reste s'écoule soit vers la rivière Couffo (293 km²) et Ouémé (316 km²). À la seule rivière Odjouro, s'ajoutent quelques affluents du fleuve Zou dont Omimi, Otcho. Ces cours d'eau présentent dans l'ensemble des potentialités exploitables à des fins agricoles (SDAC Bantè, 2012).

2.1.3. Végétation

Zone de forêts denses et humides avant l'installation de la scierie d'Agoua par les colons dans les années 50 (Tomety, 1996), la commune de Bantè est aujourd'hui une zone de savane arborée avec les essences telles que le caïlcédrat (*Khaya senegalensis*), le néré (*Parkia biglobosa*), le karité (*vitellaria Paradoxa*), l'ébène (*Diospyros crassiflora*) le samba (*Triplochiton scleroxylon*), le fromager (*Ceiba pentandra*). Il existe également quelques

savanes et forêts denses soumises à une exploitation abusive. La plus importante de ces forêts, reste la forêt classée d'Agoua qui couvre environ 75 000 hectares dans laquelle est installée la plantation domaniale d'anacardiens (PDC2, 2010).

- ***Forêt classée d'Agoua et plantation domaniale***

La forêt classée d'Agoua est située au plan administratif dans la commune de Bantè mais dont les ressources sont également partagées par une partie des populations de la commune de Savalou. Elle se trouve entre 8°25' et 8°50' de latitude Nord et 1°40' et 2°15' de longitude Est. D'une superficie théorique de 75 300 ha selon l'Arrêté Classement n°8104 SE du 04 novembre 1953, cette forêt couvre, selon les cartes élaborées par interprétation des orthophotoplans, environs 68 848,43 ha. Sa gestion a toujours été du ressort de l'administration forestière (actuellement la DGFRN). C'est une forêt largement déboisée due à la conversion d'une grande partie en terres agricoles et en habitations. Les principaux utilisateurs de la forêt sont les agriculteurs, les éleveurs, les exploitants forestiers, les chasseurs. Elle renferme différents types de formations végétales notamment la forêt dense sèche, la forêt claire, la savane boisée, la savane arborée, la savane arbustive, quelques galeries forestières. Elle abrite également des plantations d'anacardiens, des champs et des jachères (PAMF, 2007).

Dans sa politique de gestion forestière, l'Etat a fait un effort de transformation d'une partie de la forêt en plantations productives d'anacardiens (figure 6) dans les années 60 par l'ex SNAFOR. Le PAMF (2007) a évoqué que la superficie de ces plantations est d'environ 323 ha alors que le PDC2 Bantè (2010) a mentionné 482,5 ha. Après des essais de transfert vers des structures de gestion privée, ces plantations sont maintenant exploitées par des populations riveraines. Avec le temps, les plantations ont été en grande partie converties en des terres agricoles. La délimitation du contour de la plantation domaniale à l'aide du GPS (technique dénommée "tracking") réalisée au cours de la phase de terrain a permis de calculer la superficie actuelle de la plantation qui est estimée à 214 ha.

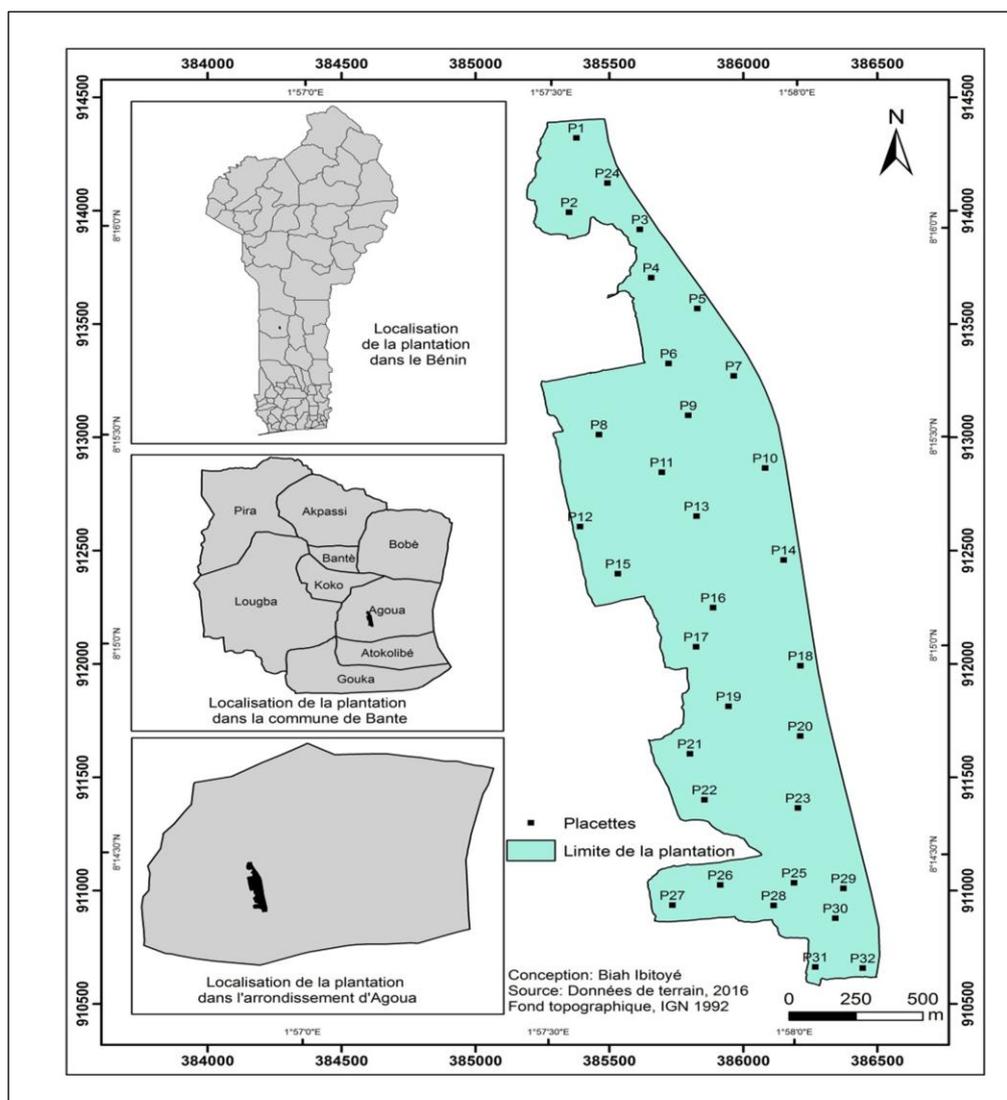


Figure 6: Carte de la plantation domaniale d'*Anacardium occidentale* réalisée à partir des données enregistrées lors du 'tracking'.

2.1.4. Facteurs humains et socio- économiques

- **Facteurs humains**

Au recensement général de la population et de l'habitation de 2002 la population de la commune de Bantè comptait 82 129 habitants et en 2013 cette population passe à 107 181 habitants dont 49% hommes et 51% femmes (INSAE, 2015). L'agriculture occupe la plus grande partie de la population de la commune. Le principal mode d'accès à la terre est l'héritage (patrilineaire).

- **Activités économiques**

L'agriculture constitue la principale activité économique des villages et hameaux de la commune. La population agricole dans l'ensemble de la commune atteint une proportion de 78,3 % (INSAE, 2004). Il s'agit d'une agriculture sur brûlis de type traditionnel portant sur les cultures vivrières telles que le maïs, le manioc, l'igname, le niébé, le voandzou, le riz

produit à petite échelle dans les bas-fonds, les produits maraîchers (tomate, piment, gombo, sésame) et les cultures de rente (arachide, coton, cajou). La superficie cultivable de la commune est évaluée à 192 300 ha (SDAC Bantè, 2012).

La chasse est également pratiquée pendant la saison sèche par les braconniers. Elle constitue la principale cause des feux de végétation, très nuisibles à la régénération naturelle de la flore en général et des essences de valeur (surtout les plantations d'anacardiens) en particulier. La chasse détruit la faune et son habitat.

2.1.5. Justification du choix de la zone d'étude

Le choix de la commune de Bantè comme milieu d'étude pour ce travail repose sur les principales considérations suivantes:

- La commune de Bantè est située dans la meilleure aire de culture de l'anacardier ; c'est la zone où la culture est plus importante au Bénin. Il s'agit de la zone Centre (zone 1) du pays (INRAB, 1995);
- Présence d'une plantation domaniale dans la forêt classée d'Agoua dans la commune, propice pour circonscrire l'étude.

2.2. Matériel

Pour la réalisation des travaux de collecte des données pour la construction des modèles allométriques et l'évaluation du stock de carbone, les outils ci-dessous ont été utilisés (tableau 2) :

Tableau 2 : Outils et utilisation sur le terrain.

Outils	Utilisation sur le terrain
GPS (Global Positioning System)	Détermination de coordonnées géographiques, des placettes, délimitation du contour de la plantation, etc.
Rubans pi	Mesure de diamètre des arbres
Paires de gants	Protection des mains
penta décimètre (100m)	installation des placettes
Fiches d'inventaire	relevés des données dendrométriques
Ecritoires	prises de note
Clinomètre	Hauteur des arbres, azimuth pour orthogonalité des placettes
Machettes	Coupe des piquets et layonnage
Appareil photo numérique	Illustrations
Peinture couleur rouge	marquage des arbres
Tarière de Pressler	prélèvement des carottes
Sachets d'emballage et sacs	emballage et transport des carottes
Rouleaux de papier adhésif	Etiquetage
Bottes	Protection des pieds et jambes dans la forêt
Règle graduée	mesure de la longueur des carottes

2.3. Méthodes

2.3.1. Dispositif d'inventaire

- *Identification du nombre de placettes*

Pour la détermination du nombre de placettes, la formule de Dagnelie (1998) suivante a été utilisée :

$$n = t_{1-\alpha/2}^2 C_v^2 / e^2$$

Avec n le nombre de placettes ; $t_{1-\alpha/2}$ ($\alpha = 5\%$) la valeur critique de la distribution t convergeant vers une distribution normale équivalent à 1,96 ; C_v est le coefficient de variation de la surface terrière (G); e est la marge d'erreur de l'estimation fixée à une valeur de 10%.

$$\text{Où } G = \frac{\pi}{40000} \sum_{i=1}^n d_i^2 \text{ avec } d_i, \text{ le diamètre de l'arbre } i.$$

Pour déterminer le coefficient de variation de la surface terrière, un sondage sur une population de 136 individus pris au hasard a permis de mesurer leurs DBH. Le C_v déterminé est de 28,53%. L'application de la formule avec ces différentes valeurs porte le nombre de placettes (n) à trente-deux(32). La superficie totale échantillonnée était de 8 ha et représente 3,74% de la superficie totale (214 ha) en lien avec la fourchette indiquée par Chave *et al.* (2003; 2004) et GFOI (2013).

- *Géoréférencement et installation des placettes*

Les placettes ont été d'abord réparties de façon aléatoire sur la carte de la plantation réalisée (figure 6). Les coordonnées géographiques des centres des placettes (annexe 3) ont été enregistrées à l'aide d'un GPS. Sur le terrain, les centres des placettes ont été recherchés à l'aide du GPS. Pour cette étude, les placettes de formes carrées de 50 m de côté ont été adoptées. A partir du centre de la placette, il a été procédé à la mesure d'une distance de 25 m suivant une direction (azimut ou angle de direction) à la recherche du milieu de l'un des quatre côtés. Ensuite, grâce au clinomètre, les nouveaux azimuts sont mesurés en faisant plus ou moins 90° selon la nouvelle direction (Photo3). Des mesures de 25 m de part et d'autre du milieu précédemment défini ont permis d'identifier les deux premiers sommets de la placette.



Photo 4: Mesure de l'azimut pour définir une direction lors de l'installation d'une placette



Photo 3: Layonnage pour la mesure de distance lors de l'installation d'une placette

A partir de chacun de ces sommets, les angles droits ont été à nouveau pris, les distances de 50 m mesurées et les deux autres sommets sont retrouvés. Les différentes longueurs (25 m ou 50 m) ont été définies à l'aide d'un penta décimètre après des ouvertures si nécessaires (Photo4). Les coordonnées géographiques des quatre sommets des parcelles ont également été enregistrées.

2.3.2. Mesures dendrométriques et de laboratoire pour l'élaboration de modèles de volume et de biomasse de *Anacardium occidentale*

La mesure des données dendrométriques et de biomasse pour le développement des modèles est basée sur l'échantillonnage non destructif des arbres (Guendehou *et al.*, 2012 ; Guendehou et Lehtonen, 2014 ; Goussanou *et al.*, 2016).

La méthode d'échantillonnage a été menée sur des arbres vivants sur pied. Les mesures ont été faites suivant un échantillonnage stratifié suivant des classes de diamètre de 5cm d'amplitude. L'intention est de mesurer des individus dans toutes les classes de diamètre disponibles. Les mesures sont portées sur 52 arbres. Le DBH varie de 3 à 69cm, répartis sur 14 classes de diamètre. Dans chacune des dix premières classes de diamètre (i.e. DBH compris entre 1 à 49 cm), les mesures dendrométriques et les carottages ont été effectués sur 5 arbres. 2 arbres seulement ont un DBH supérieur à 50 cm. Tous les arbres mesurés ont été recherchés aussi bien dans la plantation domaniale que celles privées (avec l'hypothèse que la plantation domaniale et les plantations privées se situent dans les mêmes conditions édapho-climatiques), afin de collecter les observations dans toutes les classes de DBH.

- **Mesures de diamètres et de hauteurs**

Sur chaque arbre échantillonné, la mesure du diamètre a été effectuée d'abord au collet (Dcol) (photo 5), puis à 1,30 mètre au-dessus du sol (diamètre à hauteur de poitrine DBH) (photo 6) et à chaque mètre le long de la tige (Guendehou *et al.*, 2012 ; Goussanou *et al.*, 2016) depuis 1,3 m jusqu'à la fin du fût en grimpant l'arbre (annexe 1). Les branches des arbres ont été aussi mesurées par pas de 1 m puisqu'elles sont accessibles.



Photo 5 : Mesure du diamètre au collet d'un arbre



Photo 6 : Mesure du DBH

La hauteur du fût (HF) et la hauteur totale (HT) ont été estimées. L'utilisation d'un clinomètre Suunto-optique a permis d'enregistrer des observations au collet, au sommet du fût principal et à la cime des arbres (photo 7) en se mettant à une certaine distance de l'arbre (minimum de 10m).



Photo 7 : Mesure de la hauteur d'un pied de *A. occidentale*

- **Prélèvement des échantillons de bois**

Des échantillons de bois (carottes) ont été prélevés sur les arbres à l'aide de la tarière de Pressler de 5 mm de diamètre (photo 8). Les échantillons de bois sont prélevés en deux points diamétralement opposés du fût à 1,3 mètre au-dessus du sol sans enlever l'écorce à l'exception des arbres appartenant aux classes de DBH inférieures à 5 cm (DBH < 5 cm) dont un échantillon a été prélevé (Guendehou et Lehtonen, 2014 ; Goussanou *et al.*, 2016). Pour des arbres ayant un DBH supérieur ou égal à 25 cm, quatre carottes ont été prélevées en quatre points diamétralement opposés deux à deux. Au total, 153 échantillons ont été prélevés. Sur la base du diamètre de la vrille de la tarière (5 mm) et de la longueur de l'échantillon frais collecté, le volume de l'échantillon frais a été estimé suivant la formule de volume du cylindre :

$$V = \pi r^2 H$$

Avec V : volume de l'échantillon frais (en cm³), r : rayon de la vrille de la tarière (en cm), H : longueur de l'échantillon frais (en cm).



Photo 8 : Collecte d'échantillon de bois à l'aide de la vrille

- **Mesure de densité**

Les échantillons collectés ont été séchés à l'étuve à 75°C jusqu'à poids constant (pendant 72 heures) au laboratoire (photo 9). Le poids sec des échantillons a été mesuré en utilisant une balance électronique (Ohaus Pioneer) (photo 10) et la densité de bois a été calculée en faisant le rapport du poids sec (g) au volume frais de l'échantillon (cm³).



Photo 10 : Séchage des échantillons à l'étuve à 75°C pendant 72 heures



Photo 9 : Prise de poids sec des échantillons

- **Calcul de volume et de biomasse**

Le volume du fût et des branches de chaque arbre a été calculé en faisant la somme des volumes des sections de la tige et des branches, à partir de la base jusqu'au sommet du fût (entre 0 et 1,3 m, 1,3 m et 2,3 m, ... pour le fût ; entre 0 et 1 m, 1 et 2m, ... pour les branches). La formule du tronc de cône (Netshiluvhiet Scholes, 2001) a été utilisée pour calculer le volume.

$$V = \frac{\pi h}{12} (d_1^2 + d_2^2 + (d_1 \times d_2))$$

Où V est le volume d'une section (cm³), $\pi = \text{pi}$, h = hauteur de la section du fût ou de la branche (cm), d_1 et d_2 sont les diamètres du tronc cône (cm).

La biomasse totale de chaque arbre est calculée en additionnant la biomasse du fût à la biomasse des branches. La biomasse est calculée en multipliant le volume calculé par la densité de bois.

2.3.3. Inventaire pour l'estimation des stocks de biomasse et de carbone

L'inventaire a concerné uniquement les pieds d'*Anacardium occidentale* situés à l'intérieur des placettes. Sur tous les individus vivants et sur pied sauf les arbres creux et les arbres avec cime brisée, il a été effectué des mesures de DBH et de hauteur du fût (annexe 2). Ce

décompte de tous les sujets vivants se trouvant dans les placettes installées a permis de faire une extrapolation pour donner la densité exprimée en nombre d'individus par hectare.

Les autres compartiments du stock de carbone n'ont pas été pris en compte du fait que, non seulement le bois mort est prélevé et utilisé quotidiennement par la population mais aussi le temps et le coût de l'étude étaient limités.

2.3.4. Analyse des données

- *Elaboration des modèles spécifiques de volume et de biomasse*

Les calculs de diamètre, hauteur, volume et biomasse ont été faits à l'aide du tableur Excel. Le Logiciel R a servi de base pour les tests statistiques. Les modèles de volume et de biomasse ont été développés au moyen du logiciel de calcul statistique R (R Development Core Team 2012). Ces modèles ont été testés et élaborés en utilisant l'approche appliquée par Guendehou *et al.* (2012) et reprise par Goussanou *et al.* (2016). Plusieurs modèles linéaires et non linéaires utilisant le DBH comme variable ou une combinaison de DBH et de hauteur fût ont été testés afin de retenir celles qui semblent les plus performants. Les premiers critères d'élimination des modèles étaient le coefficient de détermination R^2 et la significativité globale de l'équation générée par le Logiciel. Il est procédé ensuite à une analyse du critère d'information d'Akaike (AIC), de l'erreur résiduelle relative à la prédiction (RMSE exprimée en pourcentage) et surtout de l'erreur résiduelle standard (RSE). Les meilleures équations sélectionnées sont celles ayant le coefficient de détermination R^2 proche de l'unité avec la RMSE, l'AIC et la RSE faibles.

L'analyse a donné lieu à la sélection des modèles suivants:

$$\ln(X) = x_0 + x_1 \ln(DBH) + x_2 \ln(H) \quad (1)$$

$$\ln(Y) = x_0 + x_1 \ln(DBH) \quad (2)$$

Où X = biomasse (kg) ou volume ($10^{-3}m^3$), Y = biomasse (kg) ou volume ($10^{-3}m^3$), DBH (cm), H = hauteur du fût(m), x_0 , x_1 et x_2 sont des paramètres du modèle, \ln est le logarithme népérien.

Ces modèles linéaires ont montré que la variance des résidus est non constante au cours de l'ajustement. Pour résoudre cette hétéroscédasticité des observations, les modèles linéaires ont été dérivées sous forme non linéaire (Guendehou *et al.*, 2012). La biomasse et le volume sont calculés en utilisant les équations suivantes:

$$X = e^{[x_0 + \frac{\sigma^2}{2} + x_1 \ln(DBH) + x_2 \ln(H)]} \quad (3)$$

$$Y = e^{[x_0 + \frac{\sigma^2}{2} + x_1 \ln(DBH)]} \quad (4)$$

Où X = biomasse (kg) ou volume ($10^{-3}m^3$), Y = biomasse (kg) ou volume ($10^{-3}m^3$), DBH (cm), H = hauteur de la tige (m), x_0 , x_1 et x_2 sont des paramètres du modèle, \ln est le logarithme népérien, et σ est erreur résiduel des modèles linéarisés.

- **Estimation de la biomasse et du carbone séquestré**

Elle s'est basée sur l'usage des modèles (3) et (4) précédemment sélectionnés. Ces équations ont été appliquées à tous les individus inventoriés au niveau des placettes pour estimer d'abord la quantité de biomasse par pied de *A. occidentale* puis par placette. Pour déterminer la quantité de biomasse par hectare, il a été procédé au calcul suivant la formule (5) :

$$\text{Biomasse par ha} = \frac{\sum_{i=1}^{32} \text{stock C Pi}}{32 \times \text{surface d'une placette}} \quad (5)$$

Où stock C Pi = stock de carbone de la placette i (Kg) et la surface d'une placette est 0,25 ha.

Les stocks de biomasse et de carbone par hectare ont été multipliés par la superficie totale du site pour obtenir les stocks globaux.

Pour ce qui est de la quantité de carbone, elle a été déduite de quantité de la biomasse sèche en utilisant le facteur de conversion de la biomasse au carbone (49,05%) issu des travaux de Guendehou *et al.* (2012). Ainsi, le stock de carbone a été obtenu suivant la relation (6) :

$$\text{Carbone} = \text{Biomasse sèche} \times 0,49 \quad (6)$$

CHAPITRE III : RESULTATS

3.1. Densité de bois

La densité de bois pour *Anacardium occidentale* obtenue par classe de diamètre dans cette étude varie entre 0,447 et 0,528g/cm³. Sa valeur moyenne est de 0,500g/cm³ avec un écart type égal à 3% et un coefficient de variation de 15,22%. Ce coefficient de variation est faible et montre que la densité varie faiblement au sein de l'espèce. Cependant, les plus faibles valeurs de densités ont été observées chez les jeunes arbres (dans les classes de diamètre inférieures) comme l'indique la courbe de tendance (figure 7).

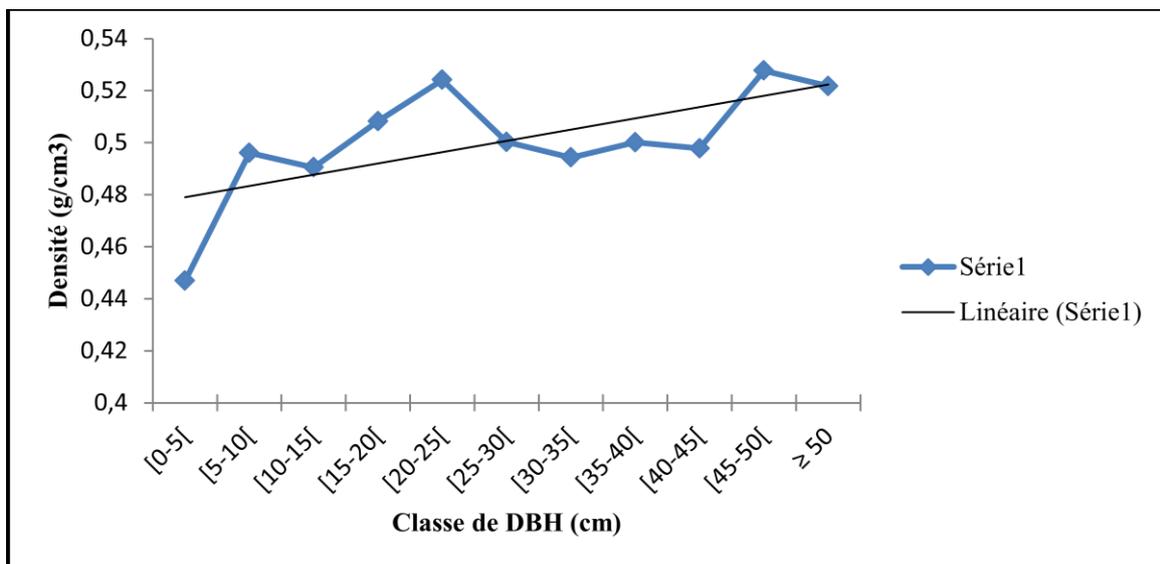


Figure 7 : Variation de la densité ligneuse en fonction des classes de DBH

3.2. Modèles de volume et de biomasse

Les modèles de volume et de biomasse ont été développés pour le fût uniquement d'une part et pour le fût additionné aux branches d'autre part. Les coefficients d'ajustement de détermination (R^2) obtenus pour les modèles sont supérieurs à 98% (tableaux 3 et 4). Ces valeurs élevées observées suggèrent que les données ayant servi à l'élaboration des différents types de modèles (figures 8 à 11) étaient fortement représentatives. Les modèles combinant la hauteur et le diamètre ont montré que le coefficient d'ajustement de détermination (R^2) a augmenté alors que l'erreur relative sur la prédiction (RMSE) et l'erreur résiduelle standard du modèle étaient plus faibles. Ces résultats signifient que la combinaison de la hauteur de la tige et du diamètre de la tige a amélioré la performance de tous les modèles. La plupart des paramètres des modèles étaient significatifs au $Pr (> |t|) < 0,001$.

Tableau 3 : Modèles de volume, paramètres des modèles, erreurs standard des paramètres, coefficients de détermination ajustés (R^2), Erreur résiduelle relative à la prédiction (RMSE) et facteur de correction. V= Volume (10-3 m3) ; DBH = DBH à 1,3 m (compris entre 3 et 69 cm); H = Hauteur du fût de l'arbre (m); X_0 , X_1 et X_2 sont des paramètres des modèles; σ = Erreur standard résiduelle des modèles ; df = degré de liberté. Les chiffres entre parenthèses représentent les erreurs standards des paramètres.

Type	Paramètres du modèle			R^2 (%)	RMSE (%)	$\sigma^2/2$	df
	X_0	X_1	X_2				
<i>Structure du modèle : $\ln(V) = X_0 + X_1 \ln(DBH)$</i>							
Fût	-1.13304*** (0,0888)	2.00943*** (0,0284)		98,99	16	0,013122	50
Fût + branches	-1.46726*** (0,0854)	2,26874*** (0,02729)		99,27	15	0,01213682	50
<i>Structure du modèle: $\ln(V) = X_0 + X_1 \ln(DBH) + X_2 \ln(H)$</i>							
Fût	-1,7305*** (0,1666)	1,6166*** (0,1001)	0,9189*** (0,2268)	99,23	14	0,01003945	49
Fût + branches	-1,8811*** (0,1726)	1,9967*** (0,1037)	0,6365** (0,2349)	99,35	14	0,01076045	49

*** $\Pr(>|t|) < 0.001$, ** $\Pr(>|t|) < 0.01$

Tableau 4 : Modèles de biomasse, paramètres des modèles, erreurs standard des paramètres, coefficients de détermination ajustés (R^2), Erreur résiduelle relative à la prédiction (RMSE) et facteur de correction. B= Biomasse (Kg) ; DBH = DBH à 1,3 m (compris entre 3 et 69 cm); H = Hauteur du fût de l'arbre (m) ; X_0 , X_1 et X_2 sont des paramètres des modèles ; σ = Erreur standard résiduelle des modèles ; df = degré de liberté. Les chiffres entre parenthèses représentent les erreurs standards des paramètres.

Type	Paramètres du modèle			R^2 (%)	RMSE (%)	$\sigma^2/2$	df
	X_0	X_1	X_2				
<i>model structure : $\ln(B) = X_0 + X_1 \ln(DBH)$</i>							
Fût	-1,85645*** (0,09979)	2,02288*** (0,03188)		98,75	18	0,016562	50
Fût + branches	-2,18554*** (0,09131)	2,28055*** (0,02918)		99,17	15	0,01387778	50
<i>model structure : $\ln(B) = X_0 + X_1 \ln(DBH) + X_2 \ln(H)$</i>							
Fût	-2,5021*** (0,1895)	1,5983*** (0,1138)	0,9931*** (0,2579)	99,02	16	0,01297661	49
Fût + branches	-2,6516*** (0,1831)	1,9741*** (0,1099)	0,7169** (0,2491)	99,28	14	0,01210568	49

*** $\Pr(>|t|) < 0.001$, ** $\Pr(>|t|) < 0.01$

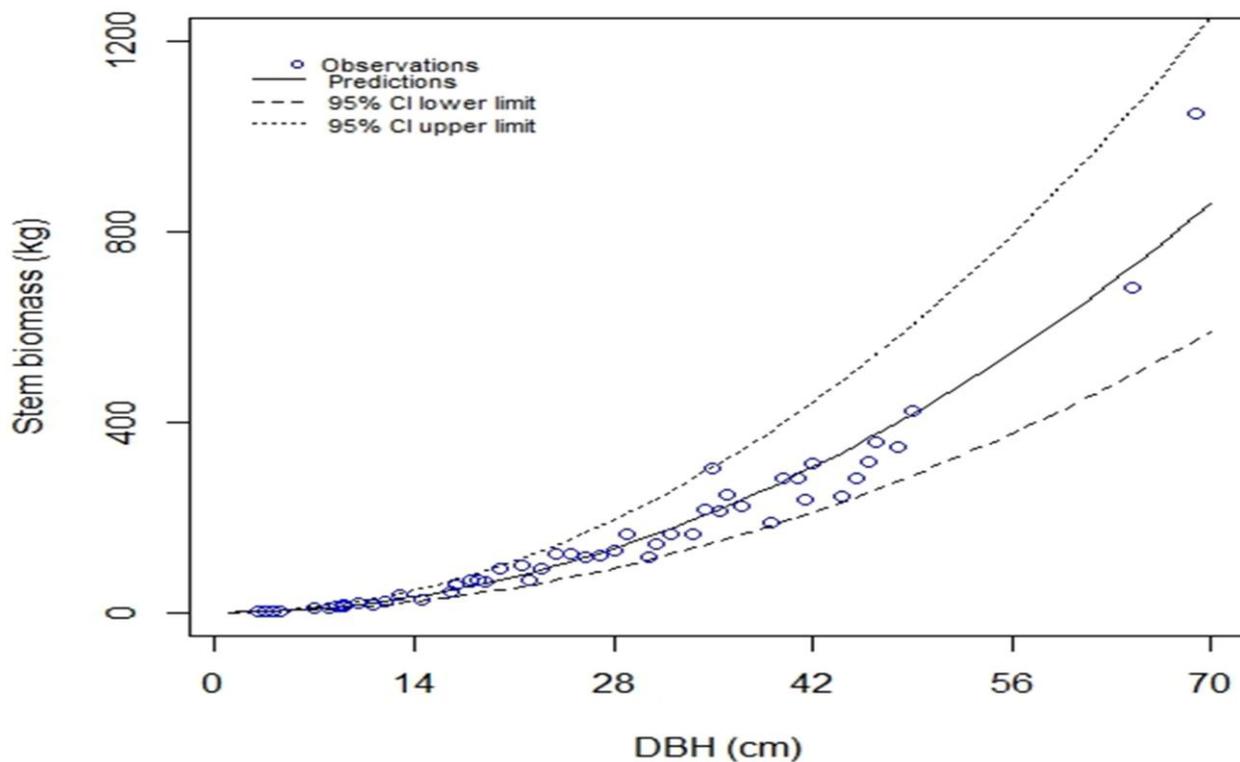


Figure 8 : Modèle de prédiction de la biomasse des fûts avec l'intervalle de confiance

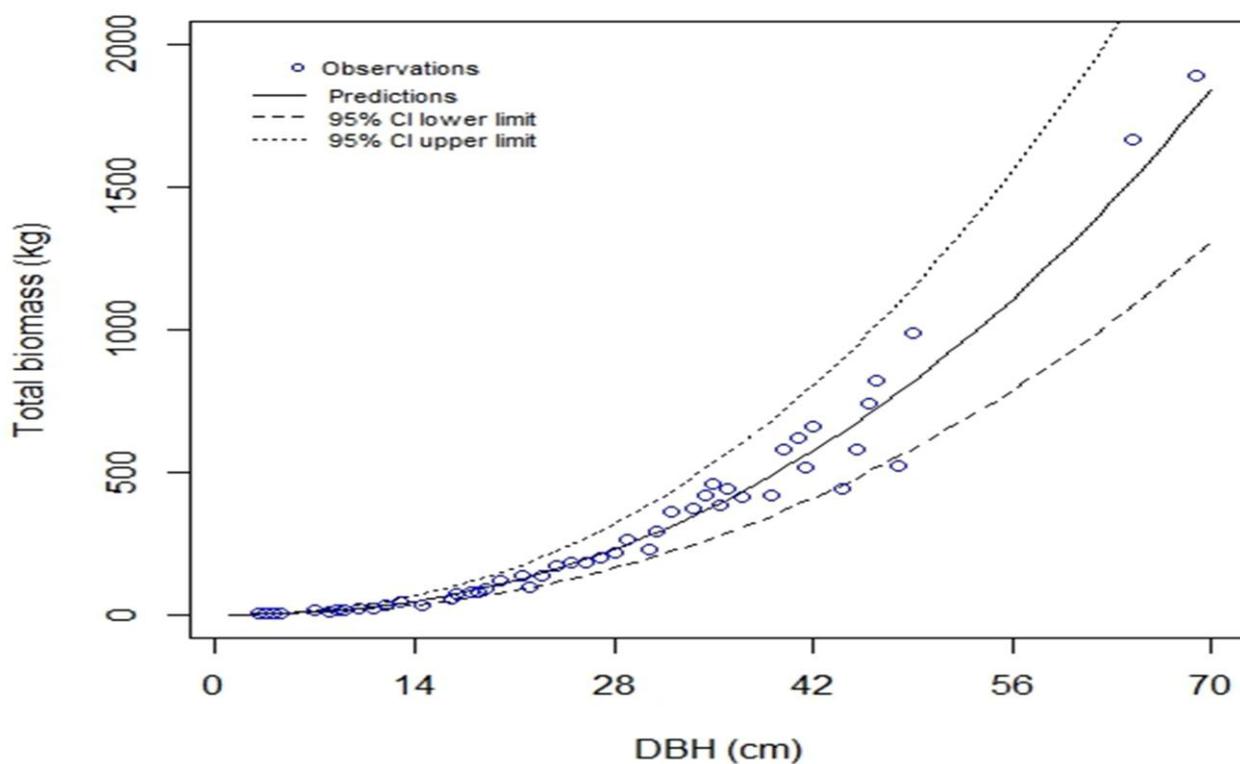


Figure 9 : Modèle de prédiction de la biomasse des fûts et branches avec l'intervalle de confiance

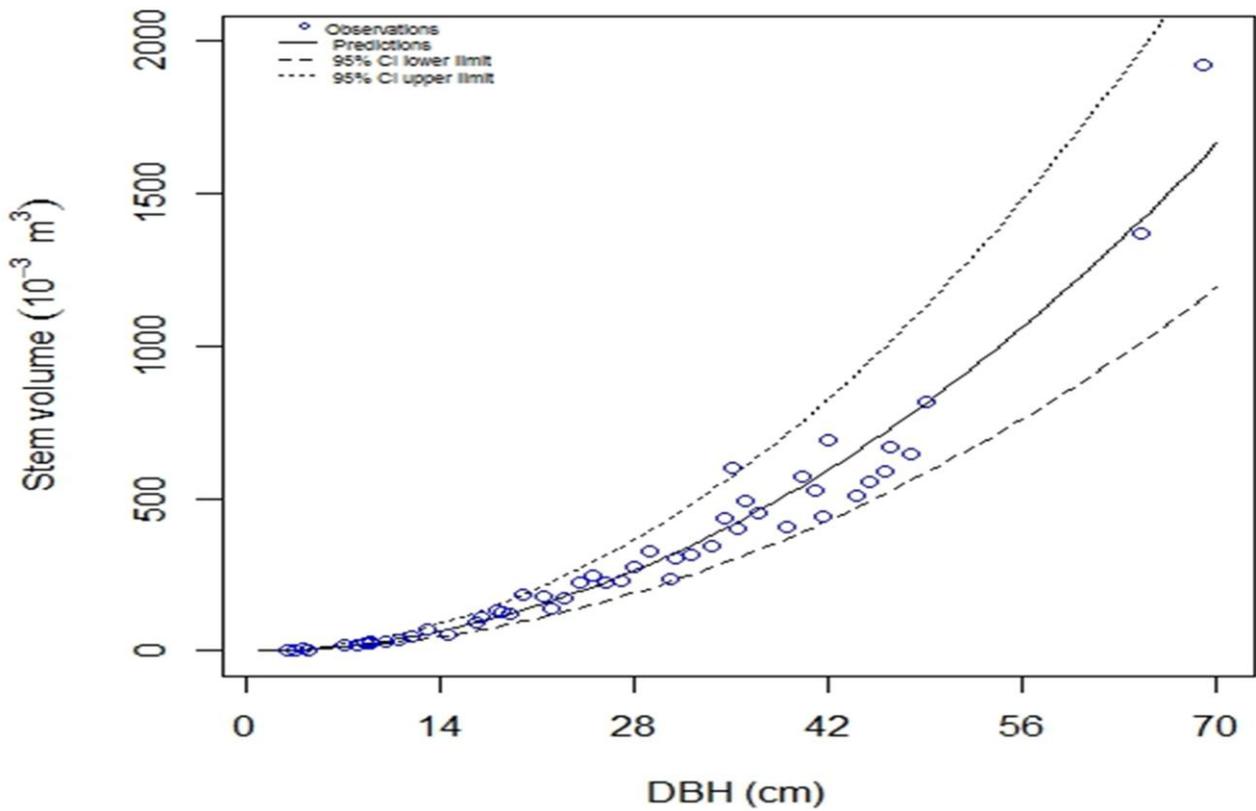


Figure 11 : Modèle de prédiction de volume des fûts avec l'intervalle de confiance

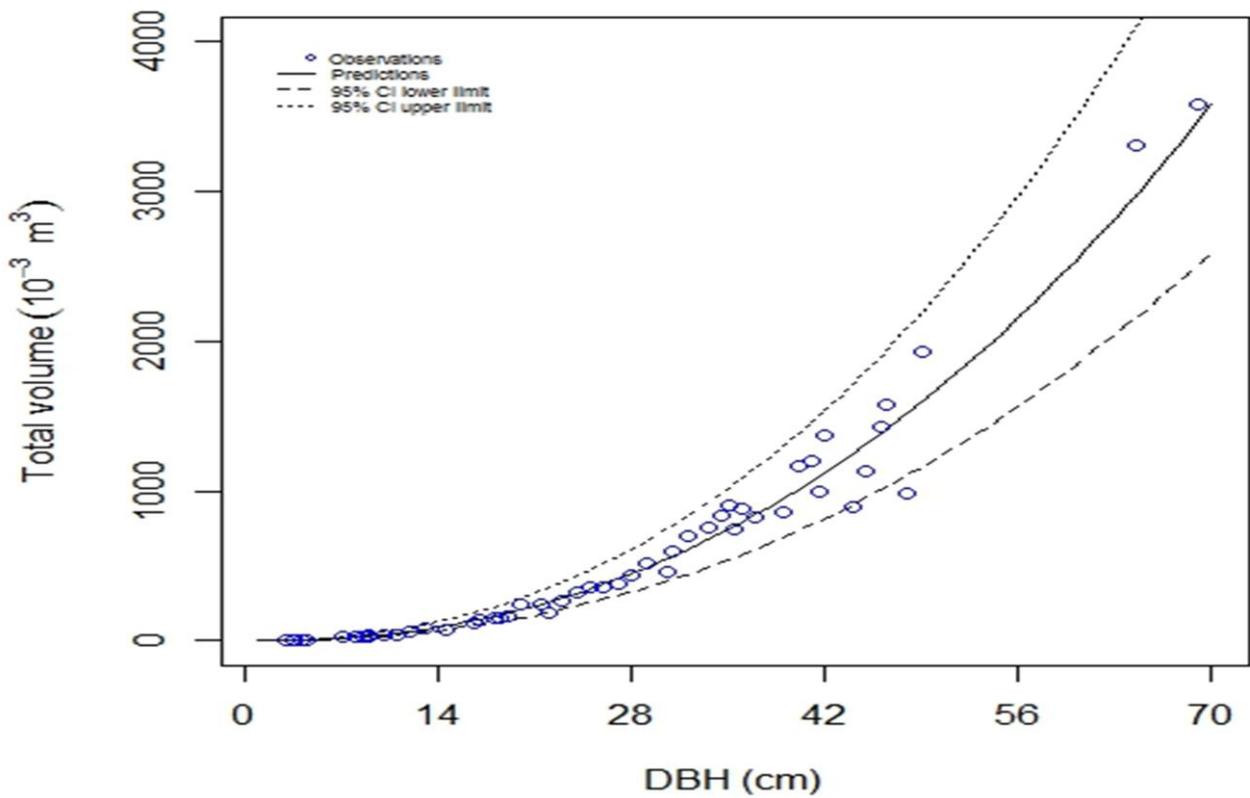


Figure 10 : Modèle de prédiction du volume des fûts et branches avec l'intervalle de confiance

3.3. Stock de Biomasse aérienne et de carbone

Nous avons évalué la quantité de biomasse aérienne contenue dans le fût d'une part et celle totale contenue dans le fût et les branches. Pour cette estimation, les équations allométriques respectives élaborées utilisant uniquement le DBH (éq.1) et (éq.3) puis celle combinant le DBH et la hauteur du fût (éq.2) et (éq.4) ont été appliquées aux données d'inventaires.

$$\text{éq.1 : } B \text{ fût} = \text{Exp}(-1,85645 + 0,016562 + 2,02288 \ln(\text{DBH}))$$

$$\text{éq.2 : } B \text{ fût} = \text{Exp}(-2,5021 + 0,01297661 + 1,5983 \ln(\text{DBH}) + 0,9931 \ln(\text{H}))$$

$$\text{éq.3 : } B \text{ total} = \text{Exp}(-2,18554 + 0,01387778 + 2,28055 \ln(\text{DBH}))$$

$$\text{éq.4 : } B \text{ total} = \text{Exp}(-2,6516 + 0,01210568 + 1,9741 \ln(\text{DBH}) + 0,7169 \ln(\text{H}))$$

Ces équations (avec B = Biomasse) nous ont permis d'obtenir les résultats présentés dans le tableau 5.

Tableau 5 : Estimation de la biomasse des fûts par application des équations (1) et (2) et des fûts et branches par application des équations (3) et (4).

	Biomasse fût éq.1 (Kg)	Biomasse fût éq. 2 (Kg)	Ecart entre éq.1 et éq.2	Biomasse totale éq. 3 (Kg)	Biomasse totale éq. 4 (Kg)	Ecart entre éq. 3 et éq.4	Ecart entre éq.1 et éq.3	Ecart entre éq.2 et éq.4
Somme placettes	97777,07	80567,30	18%	166593,89	144540,38	13%	41%	44%
Quantité par placette	3055,53	2517,73	18%	5206,059	4516,89	13%	41%	44%
Quantité par hectare	12222,13	10070,91	18%	20824,24	18067,55	13%	41%	44%
Biomasse totale	2615,54. 10³	2155,17. 10³	18%	4456,39. 10³	3866,45. 10³	13%	41%	44%

L'estimation de la biomasse a porté sur trente-deux (32) placettes comportant 852 pieds de *Anacardium occidentale* avec une moyenne de 27 individus par placette. La biomasse totale issue des trente-deux placettes à partir des deux équations (3) et (4) a donné respectivement un total de 166,59 tonnes et 144,54 tonnes, avec une biomasse moyenne à l'hectare estimée à 20,82 et 18,06 tonnes. Ces valeurs ont été ensuite extrapolées à toute la superficie de la plantation. Ainsi, l'équation utilisant le DBH uniquement a estimé la quantité de la biomasse des branches et des fûts de la plantation à 4456,38 tonnes alors l'équation combinant les deux variables (DBH et hauteur) a fait une estimation égale à 3866,45 tonnes (figure 12).

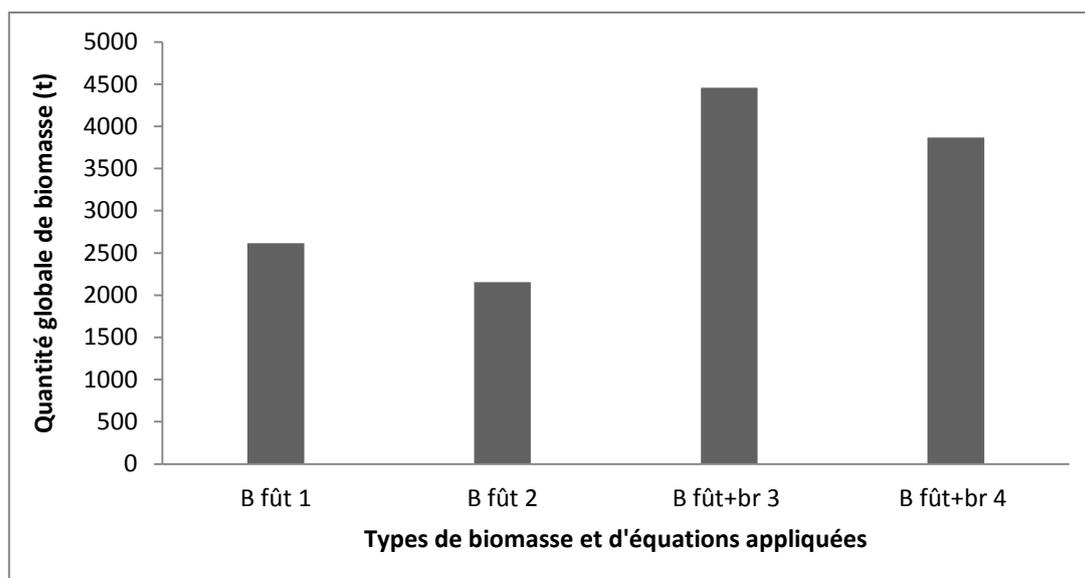


Figure 12 : Niveau de biomasse en fonction du type d'équation appliquée.

La quantité de biomasse des fûts et branches issue du modèle à une seule variable (éq.3) est 0,13 fois supérieure à celle fournie par le modèle à deux variables (éq.4). Cette même analyse a été faite en ce qui concerne les équations (éq.1) et (éq.2) appliquées pour évaluer la biomasse dans les fûts seuls. Elle a montré que l'écart entre la quantité de biomasse fournie par le modèle à une seule variable (éq.1) et celle obtenue à partir du modèle à deux variables (éq.2) est de 18%.

Par ailleurs, les quantités de biomasse contenues dans les fûts seuls d'une part et dans les fûts plus les branches d'autre part ont montré un écart de 41% lorsqu'on utilise l'équation à une variable (éq.1 et éq.3). Cet écart est passé à 44% quand on applique les équations à deux variables (éq.2 et éq.4). Les écarts observés correspondent à la proportion de la biomasse contenue dans les branches seules par rapport à la biomasse totale d'un arbre et celle des erreurs cumulées des deux modèles comparés.

Pour ce qui est du carbone, il a été procédé à la déduction de son stock moyen par hectare et de celui global au niveau de toute la plantation comme le montre (tableau 5).

Tableau 6 : stock de carbone par hectare et stock global de la plantation suivant les différentes équations. Avec 107 arbres à l'hectare

	Stock de carbone dans les fûts (éq.1)	Stock de carbone dans les fûts (éq.2)	Stock de carbone dans les fûts + Branches (éq.3)	Stock de carbone dans les fûts + Branches (éq.4)
C/ha (t)	5,99	4,93	10,20	8,85
C total (t)	1281,61	1056,04	2183,63	1894,56

éq.1 et éq.3 sont à une seule variable ; éq.2 et éq.4 sont à deux variables

L'équation utilisant le DBH comme seul prédicteur (éq. 3) a estimé le stock global de carbone avec un écart de 13% par rapport à l'équation à deux variables (éq. 4), conformément aux données de biomasse précédemment présentées.

CHAPITRE IV : DISCUSSION

4.1. Densité de bois

La densité de bois moyenne ($0,500 \text{ g/cm}^3$) obtenue pour *Anacardium occidentale* dans cette étude est similaire aux résultats antérieurs. Little et Wadesworth (1964), Zanne *et al.* (2009) et Chabi *et al.* (2016) ont reporté respectivement les valeurs $0,500$; $0,431$ et $0,569 \text{ g/cm}^3$. Pour toutes les zones tropicales (Sud-Est de l'Asie, Amérique du Sud, Afrique), la valeur de la densité ligneuse de l'espèce *Anacardium occidentale* varie de $0,410$ à $0,500 \text{ g/cm}^3$ (Zanne *et al.*, 2009 ; Little et Wadesworth, 1964). Il a été observé une légère variation de la densité de bois entre individu bien étant de la même espèce. Ces observations ont été également faites par Chave *et al.* (2006), Goussanou *et al.*, (2016) dans leurs études mais portant sur d'autres espèces. Ils ont lié ces différences aux caractéristiques génétiques au sein d'une même espèce. De plus, les densités les plus faibles ont été enregistrées chez les individus appartenant aux classes de diamètre inférieures, chez les arbres plus jeunes. Ces résultats ont également été signalés par des études antérieures (Bao *et al.*, 2001 ; Guendehou *et al.* 2012 ; Goussanou *et al.*, 2016) qui ont justifié cette remarque par le fait que la teneur en lignine est plus faible dans les arbres plus jeunes que les matures. Etant donné que les échantillons de bois n'ont pas été prélevés le long de la tige ni des branches, cette étude n'a pas pu discuter de la variation verticale de la densité du bois. L'échantillonnage non-destructif appliqué pour la collecte des données dendrométriques était fondée sur l'hypothèse que la densité du bois ne varie pas de manière significative de la moelle à l'écorce le long de la tige.

La valeur moyenne de la densité de bois obtenue dans cette étude, basée sur un échantillonnage non-destructif, est similaire aux données issues de la littérature comme l'indiquent les publications ci-dessus référencées. Guendehou *et al.* (2012), Chabi *et al.* (2016) et Goussanou *et al.* (2016) dont les études étaient basées sur la même approche (échantillonnage non-destructif) ont fait les mêmes observations en ce qui concerne les espèces objets de leurs études. Cette comparaison permet de rendre nos résultats fiables.

4.2. Modèles de volume et de biomasse

Les modèles de volume et de biomasse, aussi bien à une variable (DBH) qu'à deux variables (DBH et hauteur), développés dans cette étude sont performants en se basant sur les coefficients de détermination ajusté R^2 (supérieurs à 98%) comme l'ont indiqué plusieurs études antérieures. Par défaut de modèles spécifiques à *A. occidentale* dans la littérature, nous avons été amenés à faire la comparaison avec des résultats obtenus des essences en forêt

naturelle. Ainsi, dans leurs analyses statistiques, Guendehou *et al.* (2012) ont trouvé des valeurs comprises entre 91% et 99% pour tous les modèles développés correspondant à *Afzelia africana*, *Anogeissus leiocarpa*, *Ceiba pentandra*, *Dialium guineense*, *Diospyros mespiliformis* et *Tectona grandis* ; Laminou-Manzo *et al.* (2015) quant eux ont observé 93% pour le modèle retenu pour *Faidherbia albida* alors que Goussanou *et al.* (2016) ont également obtenu des valeurs supérieures 98% pour tous les modèles correspondant à dix-huit espèces objet de leur étude. Toutefois, les modèles à deux variables (DBH et la hauteur) ont des coefficients de détermination ajustés (R^2 ajusté) légèrement plus élevés que ceux à un seul prédicteur (DBH). Picard *et al.* (2012) et Kairé, (1999) ont souligné que plus ce coefficient est proche de 1, meilleure est la qualité du modèle. De plus, l'erreur résiduelle relative à la prédiction et l'erreur résiduelle standard du modèle sont plus faibles. Ces mêmes observations ont été également faites par Guendehou *et al.* (2012), Fayolle *et al.* (2013) et Goussanou *et al.* (2016) qui ont indiqué que l'inclusion de la hauteur comme variable en plus de diamètre de la tige a amélioré la performance de leurs modèles. Toutefois, les modèles à une seule variable peuvent être utilisés en l'absence des données relatives à la hauteur des fûts.

4.3. Stocks de Biomasse et de carbone

L'évaluation a concerné aussi bien les fûts seuls que les fûts additionnés aux branches. Dans tous les cas et quel que soit le type de modèle utilisé pour l'estimation, il a été constaté qu'une grande partie (contenue dans les 41% et 44%) de la biomasse et donc de carbone est stockée dans les branches. Ce constat résulte du fait que *A. occidentale* est bas-branchu et très ramifié justifiant sa forme globuleuse comme l'ont souligné plusieurs auteurs (Lacroix, 2003 ; Djaha *et al.*, 2008 et Yabi, 2008). Il est alors recommandé d'utiliser les modèles applicables aux fûts plus branches pour l'estimation de la biomasse aérienne de l'espèce.

Par ailleurs, les résultats de cette étude ont montré que les stocks de biomasse et de carbone au niveau des fûts plus les branches présentent un écart de 13% avec le modèle à une seule variable (DBH) par rapport au modèle à deux variables indépendantes (DBH et hauteur). Les mêmes observations ont été faites en appliquant les équations pantropicales de Brown (1997) utilisant le DBH seul comme prédicteur et de Brown et Iverson (1992) combinant le DBH et la hauteur. Il en a été de même avec cette équation de Brown (1997) et l'équation de Chave *et al.* (2014) combinant le DBH, la hauteur et la densité. Cependant, les modèles à deux variables élaborés dans cette étude sont les plus performants ; il convient alors de retenir préférentiellement ces modèles pour la fiabilité des résultats.

Dans cette étude, il a été obtenu un stock de 18,07 tonnes de biomasse aérienne par hectare. Ces résultats ne sont pas concordants avec ceux de Sundarapandian *et al.* (2013) qui ont obtenu 32,7 tonnes à l'hectare, soit un écart de 45%. Cet écart serait dû à plusieurs paramètres fondamentaux : le nombre de pieds de *A. occidentale* par hectare, l'âge des plantations, type d'équation appliquée et les caractéristiques édaphiques des milieux. Par exemple, sur le site de notre étude il a été dénombré 107 arbres par hectare alors que Sundarapandian *et al.* (2013) en ont dénombré 244. De plus, ces auteurs ont utilisé l'équation allométrique générique pour les forêts décidues tropicales sèches de Chave *et al.* (2005) qui, appliquée à nos données a systématiquement surestimé le stock de biomasse aérienne de notre étude à 46%. Du fait que notre étude n'a pas évalué la biomasse souterraine, il devient alors difficile de discuter de la biomasse totale en comparaison avec les résultats d'autres études.

4.4. Services environnementaux des plantations d'*Anacardium occidentale*

En thème de séquestration, cette étude a montré que la plantation domaniale a stocké 1894,56 tonnes de carbone soit 8,85 tonnes à l'hectare. Ce stock est relatif seulement au carbone contenu dans les fûts et les branches. Il est converti en équivalent de CO₂ en multipliant par le facteur de conversion 44/12. Sur cette base, la plantation a donc contribué à la séquestration de 6946,73 tonnes de CO₂ sur quatre décennies qui seraient dans l'atmosphère sans compter le carbone stocké dans le feuillage, les racines et le sol. Une évaluation complète, pourrait révéler une quantité très importante de stock. Le stock de carbone estimé peut être valorisé sur le marché du carbone forestier (MDP, Marchés volontaires) relatifs au Protocole de Kyoto, ainsi que dans le mécanisme REDD+ et les NAMA. En effet, Gardette et Locatelli (2007) ont expliqué qu'en matière de compensation il existe des marchés volontaires sur lesquels des organisations ou des individus cherchent à acheter des crédits carbone pour compenser leurs émissions, pour des raisons éthiques ou d'image publique. Ces marchés sont caractérisés par une grande diversité d'acteurs, de procédés et de types de certificats carbone et représentent de grandes opportunités pour la valorisation du carbone stocké. Certaines espèces comme *A. senegal* utilisées en plantation pour la restauration des zones dégradées au Niger et au Mali font l'objet du marché du carbone. Dayabou (2014) a montré qu'au Niger les plantations de *A. senegal* réalisées dans le cadre du Projet Bio-Carbone du Programme d'Action Communautaire stockent en moyenne 7,61 tonnes de carbone par hectare et apportent des revenus complémentaires aux populations à la base. En comparaison avec *A. senegal*, *A. occidentale* peut également permettre aux populations de bénéficier de la finance carbone.

De plus, le stock de carbone estimé peut faire l'objet de Compensation dans le cadre des Paiements pour Services Environnementaux (PSE) qui constituent un ensemble d'instruments qui permettent de rémunérer les ayants droit sur la terre et/ou les ressources pour des actions de conservation, de restauration ou d'amélioration de services écosystémiques. Au-delà de la séquestration de carbone, les plantations d'anacardiens permettent de lutter contre l'érosion et la désertification et assurent la protection de la biodiversité. Ces différents services écosystémiques peuvent également être inclus dans les projets forestiers et bénéficier des financements dans le cadre de la Convention sur la Diversité Biologie et celle relative à la lutte contre la désertification.

En outre, les produits non ligneux de *A. occidentale* tels que la noix et la pomme constituent d'énormes opportunités socio-économiques pour les populations à la base. Yabi (2008) a montré que le bénéfice issu de la vente des noix peut atteindre 148 750 FCFA par hectare à l'âge adulte (17 à 25 ans) avec une moyenne de 78000 FCFA au terme de 25 ans d'exploitation. La dynamique observée au niveau de la filière ces deux dernières décennies a permis à l'économie nationale de tirer des revenus substantiels pour équilibrer la balance commerciale au regard de la part de sa contribution de 8 % au revenu d'exportation nationale et de 24,87 % à celui des exportations agricoles (Tandjiékpon *et al.*, 2010) . Elle contribue à hauteur de 3 % du PIB et de 7% du PIB agricole (Hervé, 2014) ce qui lui confère sa place de deuxième produit d'exportation au Bénin. S'agissant du social, la filière anacarde est constituée de plusieurs chaînons pourvoyeurs d'emplois en milieux ruraux et urbains. Les travaux de plantation, d'entretien, de récolte et de transport de noix nécessitent de la main d'œuvre peu qualifiée et constituent des sources d'emplois rémunérateurs des communautés pratiquantes.

Conclusion

Cette étude dont le but est de contribuer à la promotion des plantations d'*Anacardium occidentale* dans le cadre de la lutte contre les changements climatiques apporte une contribution à l'évaluation du potentiel d'atténuation des changements climatiques d'une part et à l'analyse de la valorisation des services environnementaux de ces plantations d'autre part. D'abord, elle a permis d'élaborer des équations allométriques spécifiques de l'espèce et d'estimer le stock de biomasse aérienne et de carbone de la plantation domaniale de la forêt classée d'Agoua. Des équations élaborées pour le volume et la biomasse, celles combinant le DBH et la hauteur ont une meilleure performance. L'analyse statistique de nos équations comparée à celle de la littérature ne montre pas des différences significatives et rend nos équations acceptables. Ces équations sont des bons estimateurs de volume et de la biomasse des fûts et branches et ils peuvent être utilisés aussi bien au Bénin que dans la sous-région. L'évaluation de biomasse et du stock de carbone a montré que la plantation domaniale contribue à la séquestration à hauteur de 1894,56 tonnes de carbone soit 6946,73 tonnes de CO₂ par les parties aériennes des arbres (fûts et branches).

En ce qui concerne l'analyse des opportunités de valorisation des services environnementaux, il est apparu que le carbone stocké dans la plantation domaniale de la commune représente une offre sur le marché du carbone. Cette offre pourrait se révéler très importante si l'évaluation prenait en compte toute la biomasse aérienne et souterraine et ceci dans toutes les plantations de *A. occidentale*, aussi bien domaniale que privées, qui caractérisent le paysage agraire de la commune. Il existe des marchés d'engagements internationaux relatifs au Protocole de Kyoto et des marchés volontaires sur lesquels les stocks de carbone pourront être valorisés. De plus, les autres services écosystémiques et les produits non ligneux des plantations de *A. occidentale* constituent de véritables sources de paiement de services environnementaux.

Au regard des résultats obtenus, nous recommandons que :

- Des plantations d'enrichissement soient réalisées pour réhabiliter la plantation domaniale de la forêt classée d'Agoua ;
- Des recherches ultérieures analysent la possibilité d'inclure la biomasse souterraine dans l'estimation du potentiel de séquestration de carbone ;
- L'étude soit étendue dans toute les plantations d'anacardiens du Centre Bénin ;
- Le volet "atténuation des changements climatiques soient désormais pris en compte dans les projets de développement de la filière anacarde.

Bibliographie

- Adégbola Y. P. et al., 2011.** Analyse de performance des chaînes de valeurs de la filière anacarde au Bénin, 79 p.
- Adégbola Y. P. et ofio A., 2005.** Etude de la filière anacarde dans les départements de l'Atacora et du Donga (Nord-Ouest du Bénin) : Rapport provisoire, pp 16-35.
- Aïtchou I., 2012.** Système de commercialisation et d'exploitation des noix de cajou dans la commune de Savalou. Mémoire de maîtrise de Géographie. UAC / FLASH, 96 p.
- Akomagni L., 2006.** Monographie de la commune de Bantè, 58 p.
- Alain B. 2004.** Le point sur la filière anacarde au Bénin, Note d'information-Projet d'appui institutionnel à la modernisation de l'agriculture familiale (Paimaf), Programme de professionnalisation de l'agriculture au Bénin – PPAB, 9 p.
- Alioui H., 2011.** Le mécanisme de développement propre : un outil pour le développement ? Mémoire de Master1, Faculté de Sciences Economiques et de Gestion, Université du Sud Toulon-Var. France. 66 p.
- Balogoun I., Saïdou A., Ahoton E. L., Amadji I. G., Ahohuendo C. B., Adebo I. B., Babatoundé S., Chougourou D., Adoukonou-Sagbadja H. et Ahanchédé A., 2014.** Caractérisation des systèmes de production à base d'anacardier dans les principales zones de culture au Bénin, *Agronomie Africaine* 26 (1) : 9 - 22 (2014).
- Bao F.C., Jiang Z.H., Jiang X.M., Lu X.X., Luo X.Q., Zhang S.Y., 2001.** Differences in wood properties between juvenile wood and mature wood in 10 species grown in China. *Wood Science and Technology* 35: 363–375. <http://dx.doi.org/10.1007/s002260100099>.
- Biao O. A., 2015.** Agroforesterie à base de l'anacardier (*Anacardium occidentale*) dans la Commune de Bantè : problèmes, importances socio-économiques et environnementales. Mémoire de fin de formation pour l'obtention du diplôme de Master II en *Sciences Environnementales*. Centre Interfacultaire de Formation et de Recherche en Environnement pour le Développement Durable (CIFRED). Cotonou, Bénin. 78 p + Annexes.
- Brown S., 1997.** Estimating biomass and biomass change of tropical forests. FAO, forestry paper. Rome, Italy. 134 p.
- Brown S. and Iverson L. R., 1992.** Biomass estimates for tropical forest. *World resources. Review* 4 : 366 – 384.
- CASPA/ PADSAIL, 2009.** Fiches techniques thématiques Fiche n°1 : Conservation de l'anacarde, 11p.

- Chabi A., Lautenbach S., Orekan V. O. A. and Kyei- Bafour N., 2016.** Allometric models and aboveground biomass stocks of a West African Sudan Savannah watershed in Benin. Carbon Balance Manage. <http://dx.doi.org/10.1186/s13021-016-0058-5>. 18 p.
- Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Fölster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J-P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riéra B., Yamakura T., 2005.** Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145: 87–99.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>.
- Chave J., Condit R., Aguilar S., Hernandez A., Lao Sperez R., 2004.** Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 359: 409–420.
<http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>.
- Chave J., Condit R., Lao S., Caspersen J.P., Foster R.B., Hubbell S.P., 2003.** Spatial and temporal variation in biomass of a tropical forest: results from a large census plot in Panama. *Journal of Ecology* 91: 240–252. <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00757.x>.
- Chave J., Muller-Landau H.C., Baker T.R., Easdale T.A., TerSteege H., Webb C.O. 2006.** Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species. *Ecological Applications* 16(6): 2356–2367. <http://dx.doi.org/10.1890/1051-0761>.
- Chave J., Réjou-Méchain M., Bùrquez A., Chidumayo E., Colgan S. M., Delitti W. B. C., Duque A., Eid T., Fearnside P. M., Goodman R. C., Henry M., Martinez–Yrizar A., Mugasha W. A., Muller - Landau H. C., M. Mencuccini, B. W. Nelson, Ngomanda A., Nogueira E. M., Ortiz-Malavassi E., Péliissier R., Ploton P., Ryan C. M., Saldarriaga J. G. and Vieilledent G., 2014.** Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* (2014) 20, 3177–3190,
<http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12629>.
- Dayabou H., 2014.** Evaluation du stock de carbone au niveau des plantations à *Acacia senegal* au Niger, Mémoire de fin d'études pour l'obtention de Diplôme de Master en Gestion Durable des Terres, Centre Régional AGRHYMET, Niamey-Niger, 32p.
- Delbosc A. et Jeulin M., 2011.** Que retenir de Cancún ? Point Climat n°3. CDC ClimatRecherche. <http://www.cdclimat.com/Point-Climat-no3-Que-retenir-de.html?lang=fr>.
- Djaha A., N'Da A. A., Hala N., Edo K., N'guessan A., 2008.** Bien cultiver l'anacardier en Côte d'Ivoire. Fiche technique. Centre National de Recherche Agronomique. Direction des innovations et des systèmes d'information. Abidjan, Côte d'Ivoire. 4 p.

Djomo A.N., Ibrahima A., Saborowski J., Gravenhorst G., 2010. Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *Forest Ecology and Management* 260 (10): 1873–1885. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.08.034>.

FAO Bénin, 2012. Cadre de Programmation Pays 2012-2015 ; Cotonou-Bénin, 58 p.

FAO, 2015. Évaluation des ressources forestières mondiales 2015 : Répertoire de données de FRA 2015, Rome, Italie ; 244 p.

FAO, 2016. Les forêts et l'adaptation aux changements climatiques et l'atténuation de leurs effets. Rapport vingtième session de la commission des forêts et de la faune sauvage pour l'Afrique. Nairobi, Kenya. 5 p.

Fayolle A., Doucet J.L., Gillet J.F., Bourland N., Lejeune P., (2013). Tree allometry in Central Africa: testing the validity of pantropical multi-species allometric equations for estimating biomass and carbon stocks. *Forest Ecology and Management* 305: 29–37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.036>.

Franquin P., 1969 : Analyse agroclimatique en régions tropicales. Saison pluvieuse et saison humide. Applications. *Cahiers. ORSTOM, séries. Biologies* (9) : 65-95.

Gardette Y-M et Locatelli B., 2007. Les marchés du carbone forestier : Comment un projet forestier peut-il vendre des crédits carbone? ONF International et CIRAD, France. 72 p.

GFOI (Global Forest Observation Initiative), 2013. Integrating remote-sensing and ground-based observations for estimation of emissions and removals of greenhouse gases in forests: methods and guidance from the Global Forest Observations Initiative. Group on Earth Observations, Geneva, Switzerland, 2014.

GIEC, 2007. Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de ~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 p.

GIEC, 2013. Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013: Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique, 27 p.

GIEC, 2014. Résumé à l'intention des décideurs. In: Changements climatiques 2014, L'atténuation du changement climatique. Contribution du Groupe de travail III au cinquième

Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel et J.C. Minx]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique, 33 p.

Goussanou C.A., Guendehou S., Assogbadjo A.E., Kaire M., Sinsin B., Cuni-Sanchez A., 2016. Specific and generic stem biomass and volume models of tree species in a West African tropical semi-deciduous forest. *Silva Fennica* vol. 50, n°2. <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1474>. 22 p.

Guendehou G.H.S., Lehtonen A., 2014. Guidance for tree measurement in tropical forest ecosystems using non-destructive sampling to develop stem biomass and volume models. *Metlantiyöraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 287.10 p.

Guendehou G.H.S., Lehtonen A., Moudachirou M., Mäkipää R., Sinsin B., 2012. Stem biomass and volume models of selected tropical tree species in West Africa. *South Forests* 74(2): 77–88. <http://dx.doi.org/10.2989/20702620.2012.701432>.

Henry M., Besnard A., Asante W.A., Eshun J., Adu-Bredu S., Valentini R., Bernoux M., and Saint-Andre L., 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical of Africa. *Forest Ecology and Management*, **260**:1375-1388.

Hervé N., 2014. Bénin : la filière anacarde et ses acteurs. [http : www.agrobenin.com](http://www.agrobenin.com) consulté le 06 décembre 2016.

INRAB, 1995. Fiches techniques sur les sols et les essences forestières. INRAB, Cotonou, Bénin, édition 1995. 68 p.

INSAE, 2004. Cahier des villages et quartiers de ville : Département des COLLINES, rapport, Direction des Etudes Démographiques, Cotonou, Bénin, 20 p.

INSAE, 2015. RGPH4 : Que retenir des effectifs de population en 2013 ? Direction des Etudes Démographiques, Cotonou, Bénin, 35 p.

Kairé M., 1999. La production ligneuse des jachères et son utilisation par l'homme au Sénégal. Thèse de doctorat en Biosciences de l'environnement et santé, Université de Provence - Aix-Marseille 1, France. 116 p. + annexes.

Kaire M., Ouedrago J.S., Sarr B., Belem M., 2013. Guide de mesure et de suivi du carbone dans le système sol-végétation des formations forestières et agroforestières en Afrique de l'ouest. Projet alliance Mondiale contre le Changement Climatique (ANCC/GCCA). Centre Régional AGRHYMET, Niamey, Niger, 46p.

Koumaï B., 2012. L'économie de l'anacarde dans l'arrondissement de Bariénoù dans la commune de Djougou. Mémoire de maîtrise de Géographie. Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines/Université d'Abomey-Calavi, Bénin ; 73 p.

Lacroix, J. E., 2003. Les anacardiens, les noix de cajou et la filière anacarde à Bassila et au Bénin ; Projet Restauration des Ressources Forestières de Bassila. GFA Terra Systems, Hamburg, Allemagne. 75 p.

Laminou-Manzo O., Moussa M., Issoufou H. B-A., Abdoulaye D., Morou B., Youssifi S., Mahamane A. Paul R., 2015. Equations allométriques pour l'estimation de la biomasse aérienne de *Faidherbia albida* (Del.) Achev dans les agrosystèmes d'Aguié, Niger. Article in International Journal of Biological and Chemical Sciences, 9(4): 1863-1874, 2015. <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v9i4.12>.

Lemaître P., Bediye P. et Ahouari H., 2003. Diagnostic global de la filière anacarde au Bénin ; Rapport du projet d'amélioration et de diversification des systèmes d'exploitation – PADSE du Ministère de l'Agriculture, de l'Elevage et de la Pêche ; Cotonou, Bénin, 79 p.

Little E. L. J., Wadesworth F. H., 1964. Common trees of Puerto Rico and the Virgin Islands. Washington, DC: US Department of Agriculture, US Government Printing Office, Superintendent of Documents.

MAEP, 2013 : Stratégie de promotion des chaînes de valeurs ajoutées de la filière anacarde au Bénin, version finale, pp 16-45

Mama J. et Houndagba J. C. 1991. Environnement et développement. Document préparatoire pour l'environnement pour la conférence des Nations Unies. Rapport. Cotonou, Bénin, 118 p.

Mbow C., 2009. Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal. Thèse de doctorat d'état ès sciences à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD). 126 p.

Morel R. et Delbosc A., 2012. Financer la lutte contre le changement climatique dans les pays en développement : Quelle place pour les NAMA ? Etude Climat, n°32- Février 2012. CDC Climat. 35 p.

Moundounga M. Q., 2012. Développement des équations allométriques afin d'estimer les stocks de carbone séquestrés dans la forêt primaire du Nord-est du Gabon, Afrique Centrale. Mémoire de Diplôme de Master II en Biologie des Populations et Ecosystèmes, Faculté des Sciences, Université des Sciences et Techniques de Masuku, Gabon ; 38 p.

Nations Unies, 1992. Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. FCCC/INFORMAL/84, GE.05-62221 (F) ; 180705 260705, New-York, USA. 25 p.

- Nations Unies, 1998.** Protocole de Kyoto à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. FCCC/INFORMAL/83 ; GE.05-61647 (F) 070605 090605. Kyoto, Japon. 23 p.
- Netshiluvhi T.R., Scholes R.J., 2001.** Allometry of South African woodland trees. Env-P-I 2001-007. CSIR, Division of Water, Environment and Forest Technology, Pretoria.
- Odidi C. E., 2000.** Plantation d'anacardiens et aménagement de l'espace dans la sous-préfecture de Bantè, Mémoire de Maîtrise en géographie, UAC, 111 P.
- ONU-REDD, 2011.** Stratégie du Programme ONU-REDD 2011-2015. Genève, Suisse. 24 p.
- PAMF, 2007.** Plan d'Aménagement Participatif de la Forêt Classée d'Agoua (2007-2016), Volume A (Partie descriptive). Cotonou, Bénin. 220 p.
- PASREA-ONS, 2009.** Elaboration des règles de stabilisation et de soutien des prix pour la filière anacarde, Projet d'Appui à la Sécurisation des Revenus des Exploitants Agricoles, Office National de Soutien des revenus agricoles, Cotonou, Bénin, 73 p.
- PDC2 Bantè, 2010.** Plan de développement communal de Bantè 2011 - 2015, 122 p
- Picard N., Saint-André L., Henry M., 2012.** Manuel de construction d'équations allométriques pour l'estimation du volume et la biomasse des arbres: de la mesure de terrain à la prédiction. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, et Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, Rome, Montpellier, 220 p.
- Purseglove J.W., 1968.** Tropical crops : dicotyledons 1&2. Longmans, London. 719 p.
- SDAC Bantè, 2012.** Schéma directeur d'aménagement communal, 103 p
- Sundarapandian SM, Amritha S, Gowsalya L, Kayathri P, Thamizharasi M, et al., 2013.** Estimation of Biomass and Carbon Stock of Woody Plants in Different Land-Uses. Forest Res 3: 115. <http://dx.doi.org/10.4172/2168-9776.1000115>.
- Tandjiékpon A. M., 2005.** Caractérisation du système agroforestier à base d'anacardier (*Anacardium occidentale linnaeus*) en zone de savane au Bénin, Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA) en Gestion de l'Environnement, spécialité : Environnement et Développement Durable à la Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaines (FLASH), Université d'Abomey-Calavi, Bénin ; 98 p.
- Tandjiékpon A. M., 2010.** Analyse de la Chaîne de Valeur du Secteur Anacarde du Bénin. Initiative du Cajou Africain (iCA). Cotonou, Bénin. 62 p.
- TerrAfrica., 2009.** La gestion durable des terres en Afrique : des opportunités pour augmenter la productivité agricole et atténuer les émissions de gaz à effet de serre. Note d'information sur le climat, n°2. 3p.

Tomety S. N., 1996. Etude sociologique pour l'aménagement concerté et intégré des massifs forestiers d'Agoua, des monts Kouffè et de Wari-Marou. Projet Plantation de Bois de Feu dans le Sud-Bénin. Direction des Forêts et des Ressources Naturelles. Ministère du Développement Rural, Cotonou, Bénin.

Tsoumou B. R., 2014. Gestion durable de la réserve de biosphère de Dimonika : contribution à l'estimation de la quantité de carbone de la forêt modèle de Dimonika (république du Congo). Mémoire de fin d'études pour l'obtention de Diplôme d'Etude Supérieure Spécialisée. Ecole Postuniversitaire d'Aménagement et Gestion Intégrés des Forêts et Territoires Tropicaux (ERAIFT/UNESCO). Kinsasha, Congo.

Yabi I., 2008. Etude de l'agroforesterie à base de l'anacardier et des contraintes climatiques à son développement dans le centre du Bénin. Thèse de Doctorat, FLASH / Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 240 p.

Zanne A.E., Lopez-Gonzalez G., Coomes D.A., Ilic J., Jansen S., Lewis S.L., Miller R.B., Swenson N.G., Wiemann M.C., Chave J., 2009. Global wood density database. Dryad. Identifier. <http://hdl.handle.net/10255/dryad.235>.

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche de collecte détaillée pour l'élaboration des modèles allométriques

Date :

NB: ne pas mesurer arbre étêté ou creux (creux visible de l'extérieur)

classe de DBH	Dcol	1,3	2,3	3,3	4,3	Df	V1	v2	V3	V4	V5	Vf	Vt	VT	VH (%)	VF (%)	VB (%)	doa (m)	HF (m)	HT (m)	a	b	Code	Carotte 1 (cm)	Carotte 2 (cm)	Carotte 3 (cm)	Carotte 4 (cm)		
[0-5[
[5-10[
[10-15[
Ainsi de suite...																														
[45-50[
≥ 50																														

Avec Dcol = Diamètre au collet (cm) ; D1,3 = DBH (cm) ; D2,3 = DBH+1m (cm) ; Df = Diamètre terminal du fût (cm) ; V = Volume des sections (cm³) ; Vf = Volume section terminale (cm³) ; Vt = Volume total (cm³) ; VT = Volume total (m³) ; VH = Visée haute (%) ; VF = Visée Fût (%) ; VB = Visée basse (%) ; DAO = Distance -arbre opérateur (m) ; HF = Hauteur fût (m) ; HT = Hauteur totale (m) ; a et b sont des coefficients d'extrapolation

Annexe 1 : Suite de la fiche de collecte détaillée pour l'élaboration des modèles allométriques

classe de DBH	Dcol	M1 (g)	M2 (g)	M3 (g)	M4 (g)	Vc1 (cm3)	Vc2 (cm3)	Vc3 (cm3)	Vc4 (cm3)	d1 en g/cm3	d2 en g/cm3	d3 en g/cm3	d4 en g/cm3	Densité moy/ind	Biomasse en Kg
[0-5[
[5-10[
Ainsi de suite															
[45-50[
≥ 50															

Avec M = Masse de la carotte (g) ; Vc = Volume de la carotte (cm³) ; d = densité du bois de la carotte (g/cm³)

Annexe 3 : Coordonnées des centres des placettes

Numéro des placettes	X	Y
P1	385357	914310
P2	385324	913964
P3	385612	913918
P4	385631	913656
P5	385834	913532
P6	385683	913316
P7	385965	913271
P8	385461	913094
P9	385834	913075
P10	386082	912865
P11	385697	912846
P12	385455	912663
P13	385827	912656
P14	386148	912473
P15	385559	912381
P16	385919	912270
P17	385808	912022
P18	386213	911996
P19	385945	911813
P20	386213	911682
P21	385801	911603
P22	385853	911401
P23	386200	911368
P24	386363	911192
P25	386154	911087
P26	385906	911028
P27	385723	910910
P28	386102	910930
P29	386416	911022
P30	386344	910878
P31	386265	910655
P32	386448	910668