

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SIGLES

\$	Dollar
\$US	Dollar des Etats-Unis
€	Euro
°C	Degré Celsius
a	« coefficient d'ajustement » (ZIANIS, et al., 2003).
<i>AA</i>	<i>Avicennia africana</i>
ACCC	Adaptation aux Changements Climatiques en zone Côtière
Alc	Alizé continental
Alm	Alizé maritime
Almc	Alizé maritime continentalisé
b	« coefficient d'ajustement » (ZIANIS, et al., 2003).
BEF	Biomass Expansion Factor
C	Carbone
CA	Centre d'Action
CAF	Cancun Adaptation Framework
CATF	Changement d'Affectation des Terres en Foresterie
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements
<i>CE</i>	<i>Casuarina equisetifolia</i>
CET/TEC	Comité Exécutif de la Technologie / Technology Executive Committee
CF ₄ , C ₂ F ₆	perfluorocarbones
CH ₄	méthane

CHF ₂ Cl...	hydrochloro-fluorocarbones
cm	centimètre
CNRF	Centre National de Recherches Forestières
CO ₂	Dioxyde de carbone
CO ₂	dioxyde de carbone
COP	Conférence des Parties
CR	Communauté Rurale
CSE	Centre de Suivi Ecologique
CTCR/CRTC	Centre de Technologie Climatique et Réseau ou / Climate Technology Center and Network
D	Diamètre
D	« diamètre à la hauteur de poitrine » (<i>ZIANIS, et al., 2003</i>)
DBH	Diameter at Breast Hieght (Diamètre à la hauteur de la poitrine)
EDEQUE	Ecole Doctorale Eau Qualité et Usage de l'Eau
FAO	Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FEM/GEF	Fond pour l'Environnement Mondial / Global Environment Facilities
FVC/GCF	Fond Vert pour le Climat / Green Climate Fund
g	gramme
g.mol ⁻¹	grammes par mole
GES	Gaz à Effet de Serre
GIDEL	Gestion Intégrée et Développement durable du Littoral ouest africain
GIEC/IPCC	Groupe International sur l'Etude du Climatique / International Panel on Climate Change
H	Hauteur du tronc

H ₂ O	eau
HR	Humidité Relative
ISE	Institut des Sciences de l'Environnement
ISME	International Society for Mangrove Ecosystems
ISRA	Institut Sénégalais de Recherche Agricole
Kg	Kilogramme
Km ²	Kilomètre carré
LdA/LoA	Lettre d'Approbation / Letter of Approval
Lidar	Light Detecting And Ranging
m	mètre
M	« biomasse totale épigée sèche de l'arbre » (<i>ZIANIS, et al., 2003</i>)
M	Million
Ma	Masse anhydride
Mad	Méthode allométrique destructive
Ma _I	Masse anhydride individuelle (par individu)
Map	Masse anhydride partielle (par station)
Mat	Masse anhydride totale (par site)
MC	Marché-carbone
MDP/CDM	Mécanisme pour un Développement Propre / Clean Development Mechanism
Mh	Masse humide
Mh _I	Masse humide individuelle
MRV	Measurement Reporting and Verification (Mesure – Suivi – Vérification)
MT/TM	Mécanisme Technologique / Technology Mechanism
N	Effectif

N ₂ O	oxyde nitreux
NAMA	Nationally Appropriate Mitigation Actions
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NJP	Nombre de Jours de Pluie
NM	Nouveau Marché
NMM	Nouveau Mécanisme de Marché
NR	Nombre de Ramilles
ONU	Organisation des Nations Unies
PD	Pays Développés
PdA/PoA	Programmes d'Activités / Programme of Activities
PED	Pays En voie de Développement
PK	Protocole de Kyoto
PNA/NAP	Plan National d'Adaptation / National Adaptation Plan
PNUD	Programme des Nations Unis pour le Développement
PNUE	Programme des Nations Unis pour l'environnement
PRG	Potentiel de Réchauffement Global
PSO	Programme Sénégal Oriental
QELROS	Quantified Emission Limitation or Reduction Objectives
R	Coefficient de corrélation
R ²	Coefficient de détermination
Radar	Radio detection and ranging
REC/CER	Réductions d'Emission Certifiée / Certified Emission Reduction
REDD	Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts (Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation)

REDD+	Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts (Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation) de la deuxième période d'engagement du Protocole de Kyoto.
<i>RM</i>	<i>Rhizophora mangle</i>
RNCP	Réserve Naturelle Communautaire de Palmarin
t	tonne
Tc	Taux de conversion
TEC	Tonne d'Equivalent Carbone
TECO ₂	Tonne d'Equivalent CO ₂
Tropis	Tropical search
UCAD	Université Cheikh Anta Diop de Dakar
UICN/IUCN	Union Internationale pour la Conservation de la Nature / International Union for Conservation of Nature
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture)
UN-REDD Programme	Programme des Nations-Unies – REDD
UQA/AAU	Unités de Quantité Attribué / Assigned Amount Units
x	Variable indépendante dans l'équation de régression allométrique de détermination la biomasse anhydride
y	Variable dépendante dans l'équation de régression allométrique de la biomasse anhydride
z	Variable dépendante dans l'équation de régression allométrique de détermination du carbone bioséquestré
Δ	Résidus de biomasse
Δc	Résidus de carbone bioséquestré

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

AVANT-PROPOS

FOREWORD

LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SIGLES

SOMMAIRE

PROPOSITION DE RECHERCHE

PREMIERE PARTIE : Caractérisation de la biomasse mesurée

I. BREF RAPPEL SUR LES FACTEURS CONDITIONNELS DE LA VEGETATION DE
PALMARIN

II. RAPPEL DES GENERALITES SUR LES ECOSYSTEMES RESTAURES

III. ANALYSE DES DONNEES ALLOMETRIQUES DES PLANTES RESTAUREES

DEUXIEME PARTIE : Approches allométriques de détermination du carbone bioséquestré

IV. DETERMINATION DE LA REGRESSION ALLOMETRIQUE DE LA BIOMASSE
EPIGEE

V. PREDICTION ET PERSPECTIVES DU CARBONE SEQUESTRE PAR LA
VEGETATION RESTAUREE A PALMARIN

TROISIEME PARTIE : Discussions et Perspectives

VI. DISCUSSIONS

VII. PERSPECTIVES

VIII. CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

WEBOGRAPHIE

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES, DES GRAPHIQUES ET DES TABLEAUX

ANNEXES (du Mémoire de maîtrise)

Rapport-Gratuit.com

PROPOSITION DE RECHERCHE

Introduction

La plantation de la végétation se perçoit aujourd'hui comme le moyen le plus écologiquement adapté à la séquestration du carbone atmosphérique dans un contexte de mitigation du réchauffement climatique. Cela paraît particulièrement vrai pour les pays non engagés à une obligation de réduction de leurs émissions mais détenteurs de formations végétales tropicales et équatoriales comme les nations d'Afrique (*CCNUCC, 1997 p. 13*).

La végétation replantée a alors constitué le puits de carbone dans le programme de CATF de l'ACCC à Palmarin au Sénégal. Le puits de carbone se définit comme un réservoir autre que l'atmosphère permettant de capturer et de stocker du carbone (*IPCC, 2007*).

Ainsi, est-il fortement recommandé à chaque pays engagé dans l'atténuation de l'effet de serre, au travers d'une méthodologie agréée par le GIEC, d'établir régulièrement le bilan de la séquestration du carbone opérée (*CCNUCC, 1997 p. 7*).

Cela a nécessité la mise en place de moyens de calcul de la biomasse anhydride dont l'un des plus performants et adaptés aux pays tropicaux comme le Sénégal correspond à la Méthode allométrique destructive (Mad).

Contexte général

Constatés d'abord à travers le réchauffement climatique, les changements dans les manifestations du climat de la terre se firent mieux connaître au fil des années depuis les premières mesures réalisées à Mauna Loa en 1958. Cependant, malgré l'alerte envoyée par plusieurs chercheurs, les réponses les plus significatives d'atténuation et d'adaptation à ce bouleversement climatique n'interviennent que dans les années 1990.

Le développement de la science et de la technique avait fini par rejoindre les idées et la volonté politiques. Le GIEC se crée en 1988 et la Convention-Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) en 1992 à la conférence de Rio.

En décembre 1997, les Parties de la CCNUCC adoptèrent le protocole de Kyoto essentiellement destiné à la réduction de la présence des GES dans l'atmosphère. Le Mécanisme pour un Développement Propre (MDP) naquit à cet effet pour assurer le transfert de moyens et d'outils des pays les plus développés vers ceux les moins riches de la planète, entre autres prérogatives.

De là, plusieurs projets d'adaptation voient le jour dont celui à l'origine de cette étude : l'ACCC. Il bénéficie du financement du FEM.

– Problème général de recherche

La première partie de cette étude constitue le mémoire de Maîtrise. Elle a porté sur la quantification expérimentale de la séquestration du carbone réalisée grâce à la végétation plantée par l'ACCC à Palmarin.

Cette deuxième phase va porter sur l'étude théorique du piégeage du carbone par la biomasse ajoutée. Elle inclue ainsi les procédés de régression allométrique entre la masse et la dendrométrie en vue de la détermination du stock de carbone.

En clair, il va s'agir de définir les relations mathématiques qu'entretiennent les paramètres biométriques (masse et hauteur) des plantes pour en déduire la masse de carbone séquestrée sur une période allant de 1 à 2 ans. Cette durée représente l'âge des individus de *Casuarina equisetifolia*, d'*Avicennia africana* et de *Rhizophora mangle* plantés à Palmarin par l'ACCC entre 2009 et 2010.

– Choix du thème

La problématique du changement climatique apparaît comme l'un des enjeux cruciaux du XXIème siècle. Les moyens d'atténuation et d'adaptation face à ces modifications se présentent selon que la technologie se révèle accessible et/ou vertueuse. On parle de réduction des émissions de GES, de l'utilisation de technologies pas ou moins polluantes, de captage et de stockage du carbone dans les puits de carbone.

Ce dernier point intéresse particulièrement notre thème de recherche du fait que le moyen de séquestration du carbone utilisé reste naturel (phytomasse plantée).

En plus, la restauration de la végétation a eu lieu dans un espace rural affecté dans le passé par les multiples actions anthropiques néfastes comme la coupe de bois, facteur de réduction de la végétation.

– Finalité de la recherche

Au terme de cette étude, on pourra apprécier les interrelations entre la biomasse et la dendrométrie d'une part et le carbone bioséquestré d'autre part. Ceci permettra d'opérer des estimations de la masse de carbone stockée par d'autres plantes de même espèce sans besoin d'appliquer la Mad de nouveau. Au bout de plusieurs mesures par Mad, il deviendra possible de définir la dynamique générale de la séquestration du carbone par les mêmes plantes étudiées.

• Cadre théorique et méthodologique

Mener des recherches sur un thème requiert non seulement en définir les aspects théoriques, conceptuels mais aussi indiquer la démarche pratique de cognition, la méthodologie à adopter.

– Cadre théorique

Cette conceptualisation du thème doit donner un aperçu du contenu et des limites de notre champ d'intérêt.

✓ Problématique

La problématique soulevée par l'étude du stockage du carbone par la phytomasse exige de situer le problème de la séquestration dans le domaine actuel de la science tout en montrant le niveau d'avancement de la recherche sur cette question.

~ Position du problème scientifique

La pollution de l'atmosphère et ses corolaires constatés de l'effet de serre, du changement climatique, ajoutés à la dégradation des écosystèmes ont poussé les dirigeants du monde à agir. Des textes cadres et de jurisprudence ont apparu ainsi que des organisations, des groupes de recherches sur la question du changement climatique (GIEC). On peut citer entre autres, la Convention de Ramsar (1971), CCNUCC (1992), la Protocole de Kyoto (2005), etc.

~ Etat de la recherche (de la question)

Les études engagées à ce jour dans la séquestration du carbone portent sur les grandes formations végétales de forêts (*BROWN, 2004*). Elles intéressent également les savanes tropicales (*MBOW, 2009 ; TOURE, 2002*) de même que les formations de l'agroforesterie (*MOUSSA, 2004*).

Le carbone se mesure dans les différents étages de la végétation : la masse foliaire, le tronc et les racines et ce dans un grand rayon d'échantillonnage (*MBOW, 2009 ; TOURE, 2002*).

L'évaluation du stock de carbone peut également se limiter à la seule biomasse épigée lorsque cela s'impose (*NDOUYE, 2011*).

Les moyens de recueil des données du site étudié (géoréférencement, estimation de la biomasse végétale) se constituent de deux approches : le moyen satellitaire (Lidar, NDVI, Radar, etc.) et la mesure *in situ* (cubage, Mad, optimalité, etc.).

✓ Justification du thème de recherche

La masse de carbone séquestré connue pour chaque essence, il apparaît nécessaire d'en étudier la dépendance avec la biométrie des plantes.

~ Questions de la recherche

○ La détermination de l'équation de régression allométrique va-t-elle être facilitée par la jeunesse des plantes qui, à ce stade, présentent (*CE*) ou ne présentent pas (palétuviers) de grandes différences dendrométriques entre individus congénères, ce qui peut réduire ou augmenter les risques de biais ?

○ La masse de carbone théorique déterminée par la régression allométrique s'éloignera-t-elle de celle expérimentale calculée sur la base des données de la Mad (*NDOUYE, 2011*) ?

~ Intérêt de la recherche (du sujet)

Cette étude se justifie par son caractère complémentaire de la première phase d'évaluation.

Son autre utilité se trouve dans la perspective de prévision des stocks de carbone disponibles dans les années futures au moyen d'une méthode plus efficiente, en l'occurrence la définition d'équations allométriques. Cela permettra une meilleure planification de la gestion de la végétation plantée.

✓ Délimitation du champ d'investigation

L'échelle et la localisation du domaine d'étude ont primé pour plusieurs raisons :

~ Choix des niveaux et du domaine de l'étude

La communauté rurale de Palmarin constitue une unité territoriale relativement isolée de l'intérieur du pays par le bras de mer du Saloum. Elle se relie au continent par sa succession à la CR de Nguégnène dans le prolongement d'une bande de terre à l'allure d'une péninsule.

L'étude du carbone bioséquestré va se faire donc sur une végétation éloignée d'une trop grande interférence de facteurs anthropique et urbaine (pollution, dégradation environnementale) et sur un espace réduit (par l'érosion et la salinisation).

~ Choix géographique

A Palmarin, le climat se révèle de type soudano-sahélien. L'espace bénéficie aussi d'une forte présence de l'humidité de l'air entretenue par la proximité de l'océan Atlantique et de la mangrove.

En plus, cette recherche s'applique à des espèces autochtones halophiles auxquelles l'eau ou les embruns salés ne posent pas de contraintes majeures. Les formations végétales étudiées évoluent dans des milieux naturels (mangrove) ou aménagés (*Casuarina equisetifolia*) dans lesquels elles ne subissent presque pas de compétition de la part d'autres espèces.

Hormis les incursions de la mer destructrices des *Casuarinaceae*, les conditions de séquestration atteignent relativement leur niveau optimal.

✓ Objectif général

L'objectif principal reste de déterminer, par régression allométrique, l'évolution de la séquestration par la biomasse épigée. Pour parvenir à ce but ultime, on travaillera d'abord à atteindre certains objectifs spécifiques.

✓ Objectifs spécifiques :

○ Objectif spécifique 1 : analyse des données allométriques de *Casuarina equisetifolia*, d'*Avicennia africana* et de *Rhizophora mangle* ;

○ Objectif spécifique 2 : détermination des droites de régression allométrique pour les espèces plantées ;

○ Objectif spécifique 3 : détermination et analyse de la biomasse anhydride et du carbone bioséquestré.

✓ Hypothèse principale

Les conditions biotique (cycles biogéochimiques) et abiotique (substrat, climat) n'auraient pas grandement changé au point d'altérer la dynamique de croissance des écosystèmes restaurés depuis leur plantation de sorte à pouvoir affecter négativement la projection des masses de carbone.

○ Hypothèse 1 : les données allométriques devront apparaître concordantes car leur relevé a eu lieu dans la jeunesse des plantes congénères – ainsi sujettes d'une faible ramification – et à la même période.

○ Hypothèse 2 : l'évolution morphologique tenant de la croissance des individus devrait déterminer le type de fonction exponentielle, linéaire, logarithmique polynomiale ou de puissance de la régression allométrique.

○ Hypothèse 3 : les données de mensuration et de pesée des *Casuarinaceae* pourraient apporter certains biais à l'analyse du fait de la perturbation de leur croissance. Au contraire, l'analyse au compte des palétuviers devrait se révéler plus aisée puisque ces plantes ont pu bénéficier d'une croissance relativement plus stable.

~ Analyse des concepts opératoires

La détermination des paramètres biométriques des plantes et de la masse de carbone bioséquestrée offre une base de données à la projection allométrique.

Cette extrapolation permet d'abord de mettre en corrélation la masse de matière organique produite avec les dimensions des individus de l'espèce. Ceci donne d'établir l'équation de régression allométrique dont l'ajustement adéquat amène à calculer la masse de carbone bioséquestrée.

Aussi, l'extrapolation peut procéder par une projection temporelle afin d'estimer la quantité de carbone séquestrée par la végétation plusieurs années à l'avance. L'opération mise en œuvre à cette fin consiste en la simulation que nous n'allons pas aborder dans cet ouvrage.

– Méthodologie

Deux formes de méthodologie se déploieront lors de cette étude. L'une concerne le recueil des données de terrain. Elle a déjà fait l'objet de dissertation dans le mémoire de Maîtrise et se retrouve plus loin dans cet ouvrage (*V. p.45*).

Dans les lignes suivantes se décrit la méthodologie de traitement des données biométriques mesurées. Il s'agit de :

- ✓ analyser les données dendrométriques et de végétation recueillies sur le terrain ;
- ✓ construire les nuages des points hauteur de la plante/biomasse ;
- ✓ construire les droites de régression allométrique de la biomasse ;
- ✓ établir l'ensemble des équations de régression allométrique de la biomasse ;
- ✓ identifier l'équation de régression allométrique la plus performante pour chaque génération (2009 et 2010) d'espèce plantée ;
- ✓ calculer la prédiction théorique de la biomasse anhydride avec les équations ainsi élues ;
- ✓ tester les équations de régression allométrique élues par comparaison de leur prédiction théorique avec le résultat expérimental de la biomasse déjà calculée dans le mémoire de Maîtrise (*NDOUYE, 2011*) ;
- ✓ analyser la justesse des prédictions théoriques sur la base de leur comparaison avec la biomasse expérimentale (examen du résidu) ;
- ✓ déterminer les masses de carbone correspondantes aux biomasses anhydrides expérimentale et théorique.

PREMIERE

PARTIE :

**Caractérisation de la
biomasse mesurée**

I. BREF RAPPEL SUR LES FACTEURS CONDITIONNELS DE LA VEGETATION DE PALMARIN

Les commentaires et les graphiques suivants constituent des extraits du mémoire de Maîtrise (*NDOUYE, 2011 p. 32*). Il apparaît impertinent de réélaborer complètement cette rédaction du moment que les facteurs conditionnels de la végétation à Palmarin ne peuvent pas avoir changé depuis les travaux de terrains de 2010.

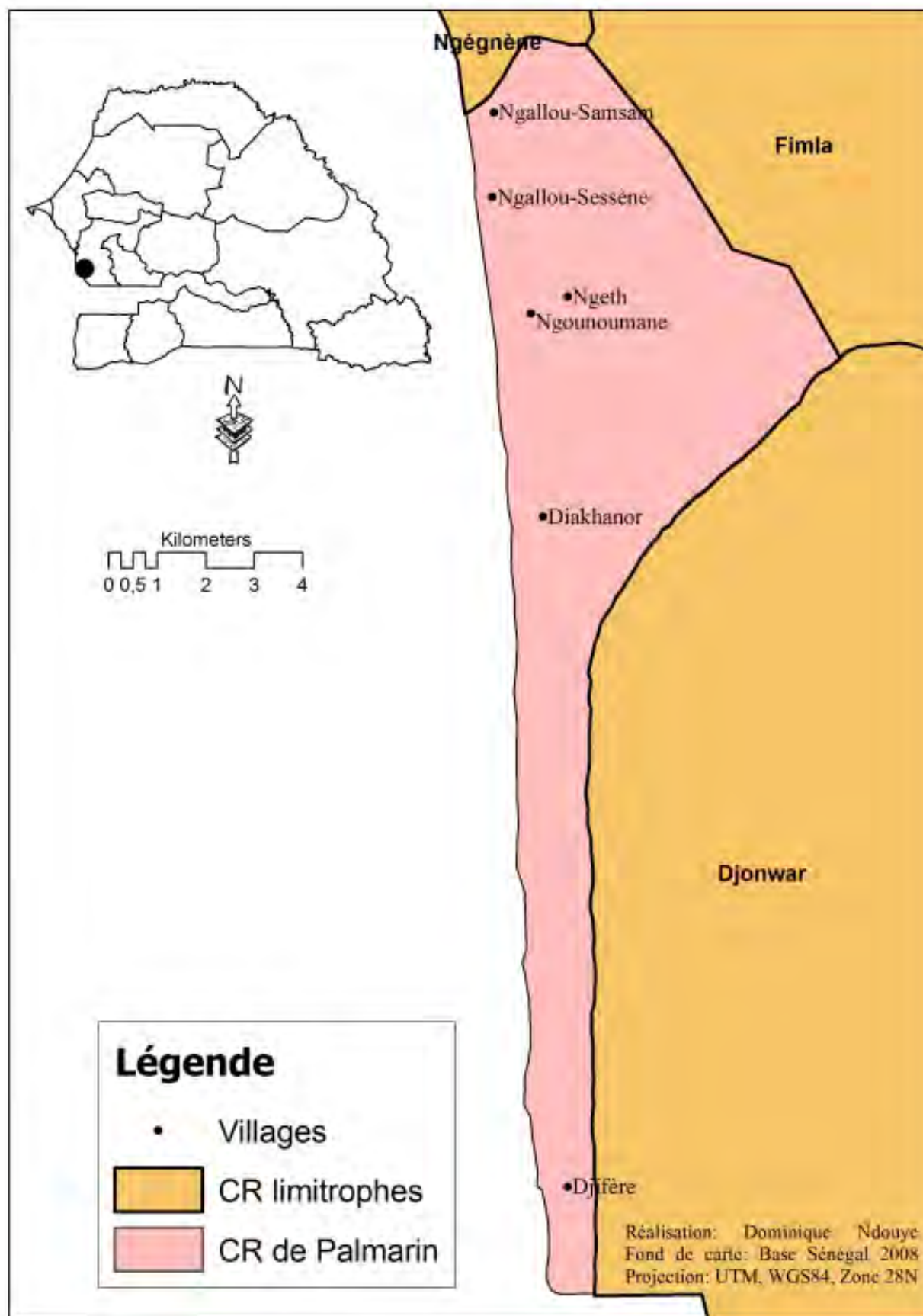


Figure 1 : Carte de la communauté rurale de Palmarin (NDOUYE, 2011 p. 16)

1.1. Situation géographique

L'espace d'étude de ce mémoire se localise dans la communauté rurale de Palmarin au Centre-ouest du Sénégal (*Figure 1*). Cette espace correspond à l'ancien territoire du Sine-Saloum dont la loi du 22 février 1984 codée 84-22 fit deux régions distinctes : Fatick et Kaolack.

Palmarin se situe dans la région de Fatick. La CR compte parmi les trente-cinq (35) communautés rurales de la région réparties entre huit (8) communes, celles-ci appartenant à dix (10) arrondissements affiliés à trois (3) départements à savoir Gossass, Fatick et Foundiougne. Ce dernier département comprend le territoire de Palmarin inclus dans l'arrondissement de Fimela.

L'analyse de l'historique, de la dynamique et du dynamisme de la population a été effectuée dans le premier volume de ce mémoire (*NDOUYE, 2011 p. 19*).

Du point de vue géographique, Palmarin reste encadré par les points de coordonnées déterminant respectivement ses extrêmes Nord, Ouest, Sud et Est : 14° 07' N / 16° 77' W ; 14° 01' N / 16° 71' W ; 13° 83' N / 16° 75' W ; 14° 05' N / 16° 70' W.

Ce contexte spatial explique la plupart des facteurs conditionnels de la végétation.

1.2. Le climat

La situation géographique de Palmarin le place dans la bande de climat de type soudano-sahélien, sous influence maritime.

1.2.1. Les températures

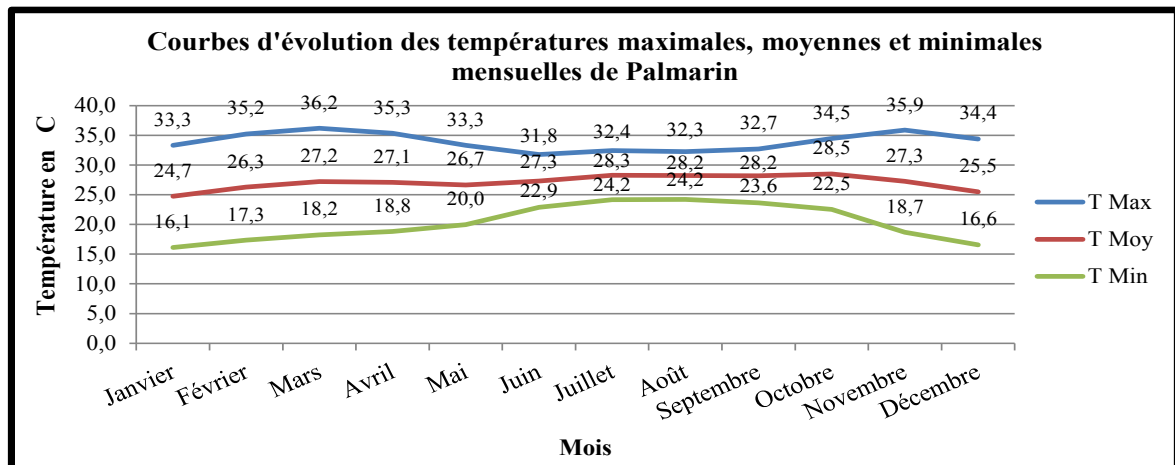
L'évolution intermensuelle des températures maximales montre un maximum principal en mars (36,2 °C) et un maximum secondaire en novembre (35,9 °C).

La phase de stagnation des températures maximales centrée sur les mois de juin, juillet, août, septembre correspond à l'intervention de la mousson et de l'effet adoucissant de la pluie apportée.

La saison pluvieuse représente néanmoins la période de montée de la température moyenne (juin : 27,3 °C ; juillet : 28,3 °C ; août : 28,2 °C ; septembre : 28,2 °C).

A l'opposé des maxima, la série des températures minimales apparaît monomodale. La valeur la plus faible s'enregistre en saison d'hiver au mois de janvier (16,1 °C) (Graphique 1).

La moyenne des températures atteint 27,1 °C.



Graphique 1

1.2.2. Les vents

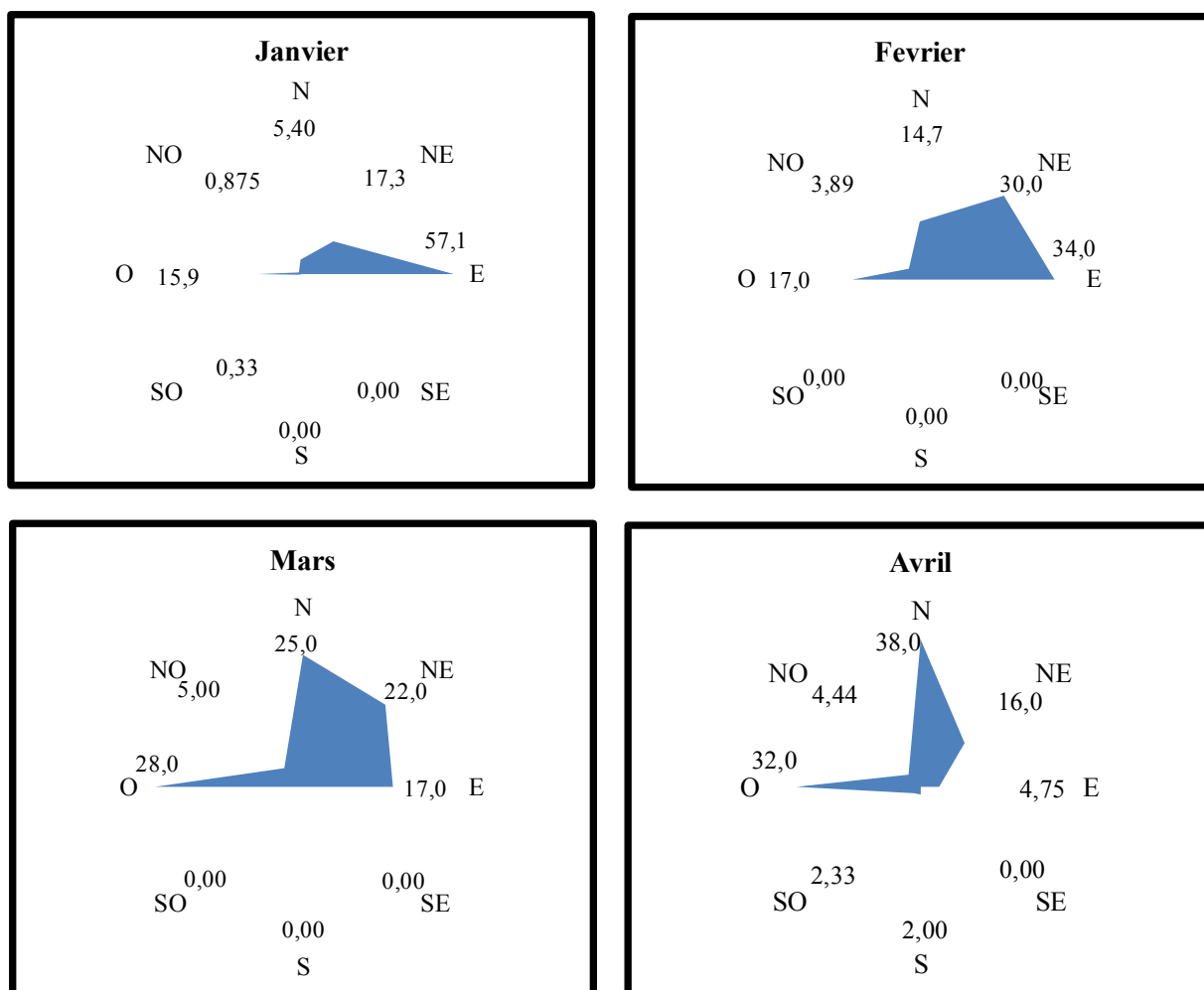
Dans le cadre de Palmarin, interviennent trois Centre d'Action (CA) : les anticyclones Saharo-libyen et des Açores dans l'Hémisphère Nord et l'anticyclone de Sainte-Hélène dans l'Hémisphère sud. Ils constituent les principaux moteurs des échanges de flux et ce transfert d'air génère la variation saisonnière du climat.

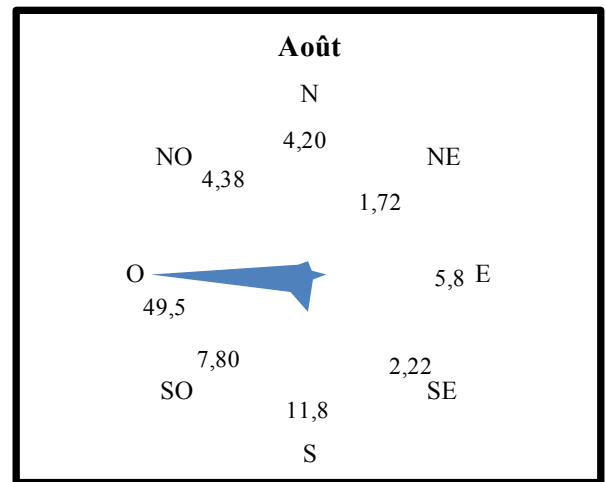
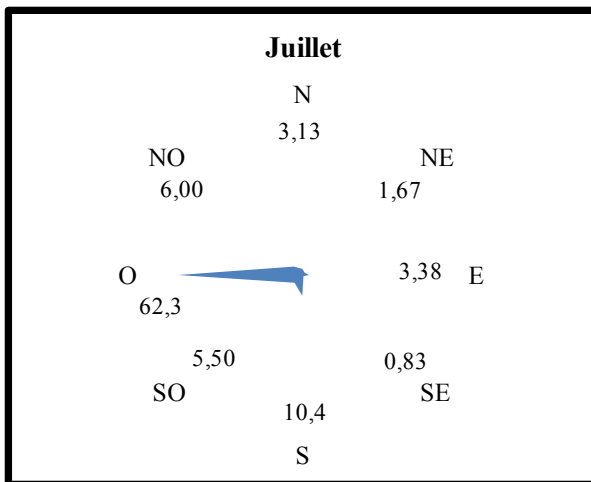
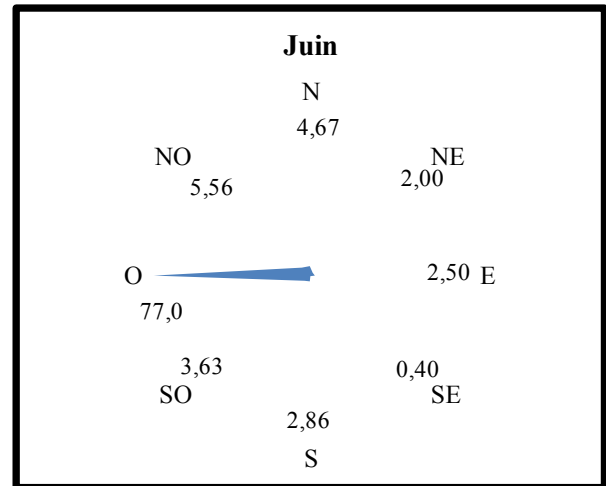
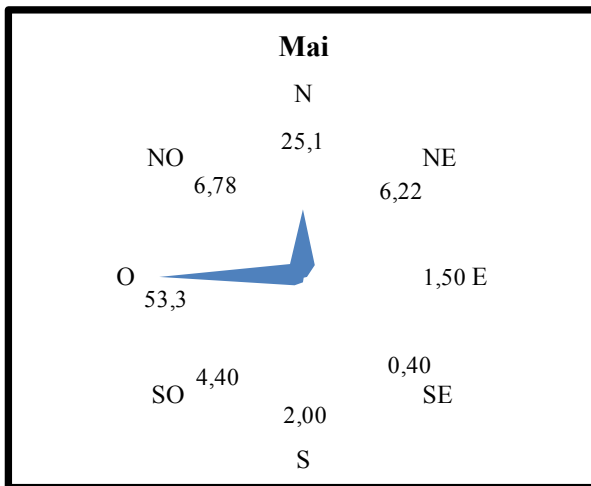
En hiver, les directions dominantes correspondent au Nord, au Nord-est et à l'Est. Il s'agit des Alizés maritimes continentalisés notés Almc originaires des Açores (*Graphique 2*).

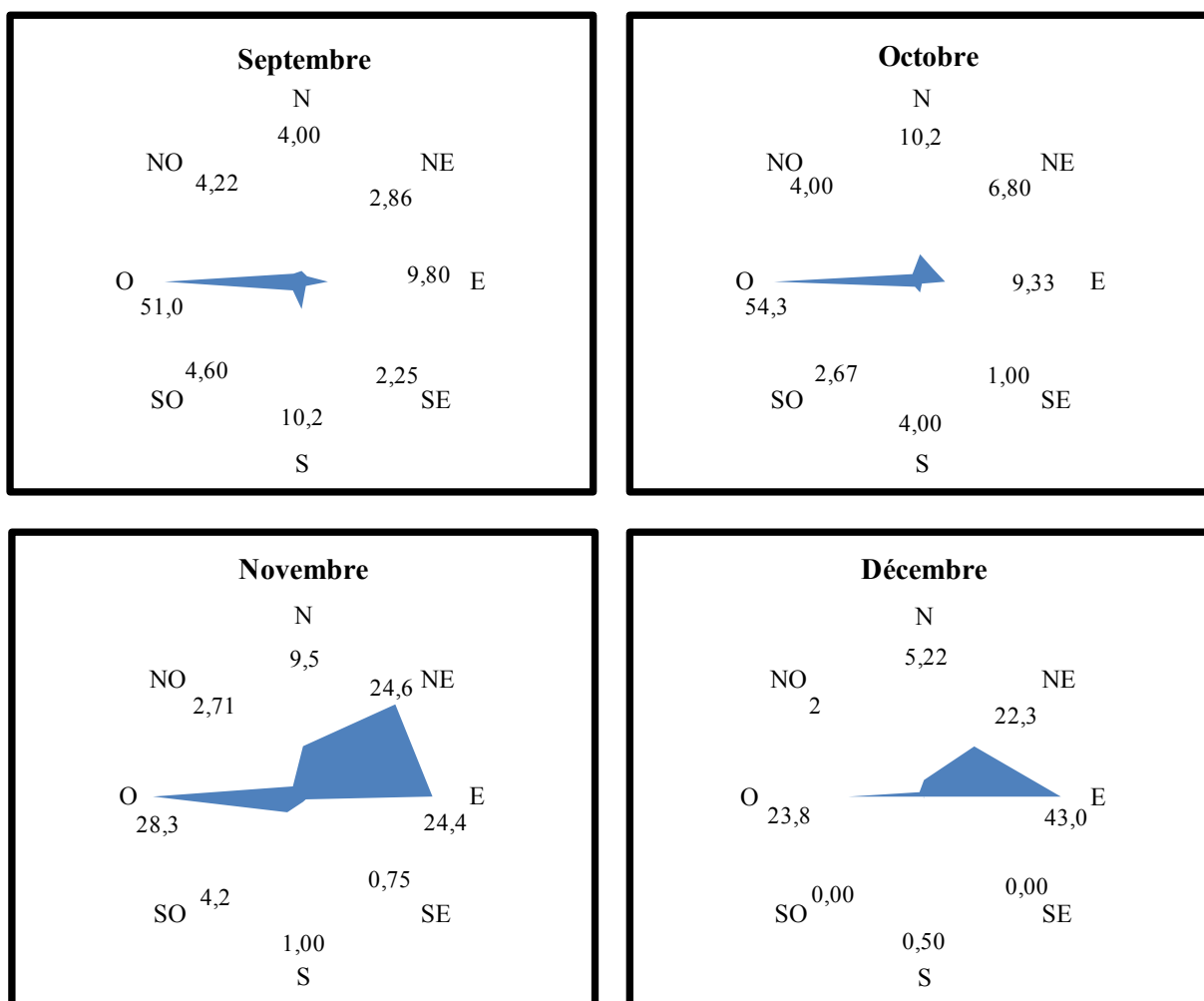
Lorsque la pression des Açores commence à baisser, elle se fait remplacer par l'Anticyclone Saharo-libyen vers le mois d'avril voire mai (*SECK, 2008*). Il arrive alors sur Palmarin des flux de vent chaud et sec dit Harmattan. On les appelle aussi des Alizés continentaux (Alc).

En revanche, quand vient l'été boréal, les CA de l'Hémisphère Nord (Açores et Saharo-libyen) s'amenuisent et on voit la domination des flux d'air envoyés par l'Anticyclone de Sainte-Hélène. Ces vents, au départ des Alm, deviennent de la mousson après avoir traversé l'équateur géographique. A Palmarin la mousson prend les directions Sud-ouest et Ouest (*Graphique 2*).

Graphique 2 : Roses des vents à la station de Mbour



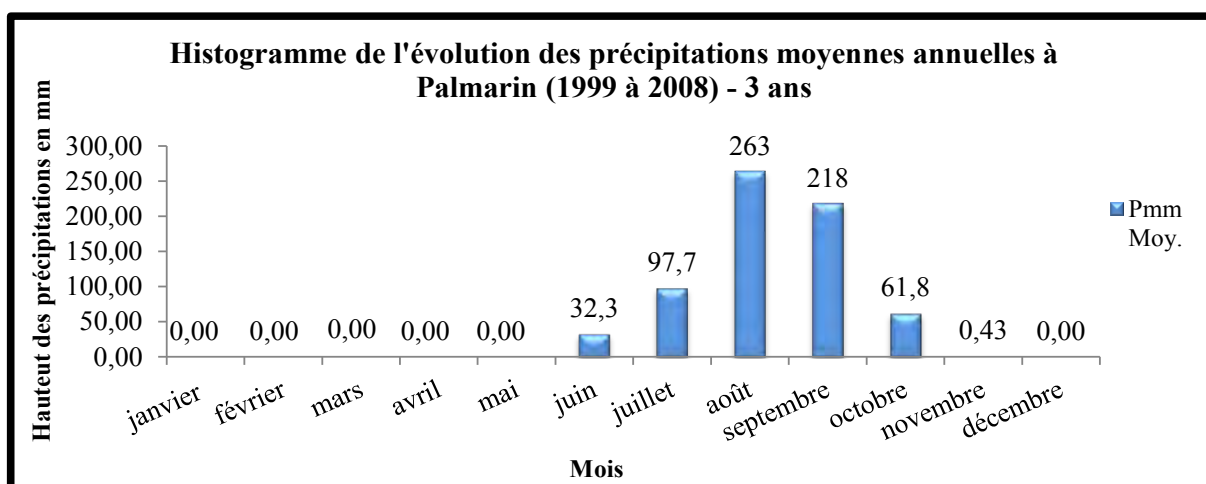




1.2.3. Les précipitations

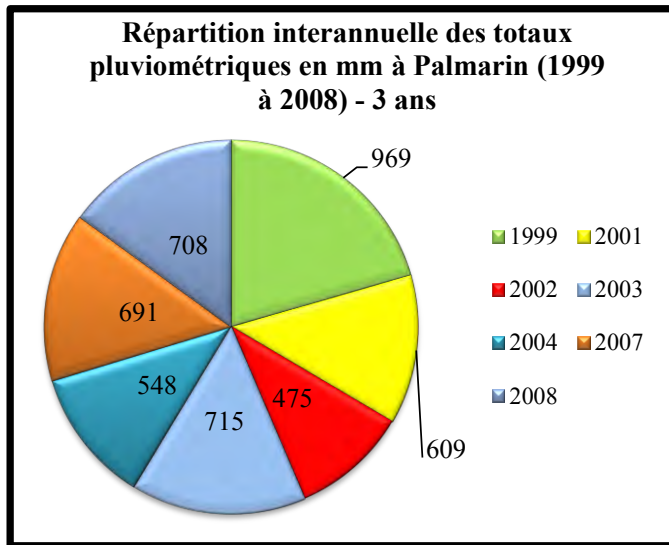
A Palmarin, la saison des pluies dure 5 mois (de juin à octobre) donnant une hauteur moyenne annuelle de précipitation de 673,5 mm.

L'histogramme moyen des précipitations indique des valeurs de hauteur d'eau passées de 32,3 mm en juin à 97,7 mm en juillet pour culminer à 263 mm au mois d'août. Ensuite, les précipitations baissent jusqu'au niveau des 218 mm en septembre avant de chuter drastiquement à 61,8 mm en octobre.

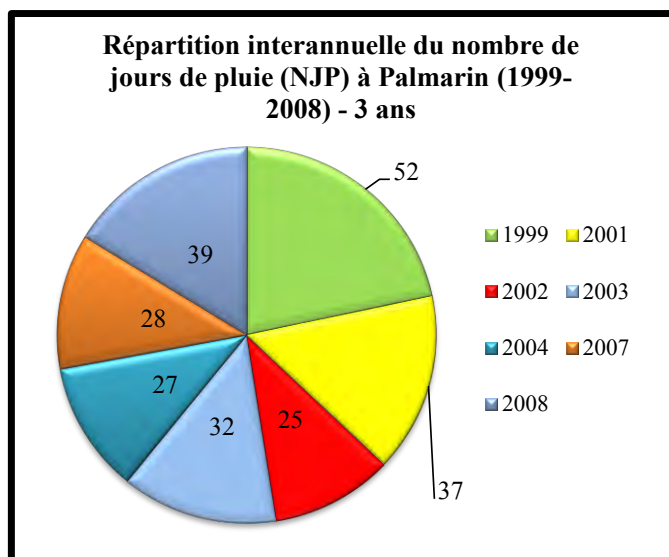


Graphique 3

L'évolution du nombre des jours de pluie (NJP) se superpose plus ou moins à celle des totaux pluviométriques (*Graphique 4&5*). Comme pour les précipitations, l'année 1999 a connu le plus grand nombre de jours où la pluie intervient (*Graphique 4&5*).



Graphique 4



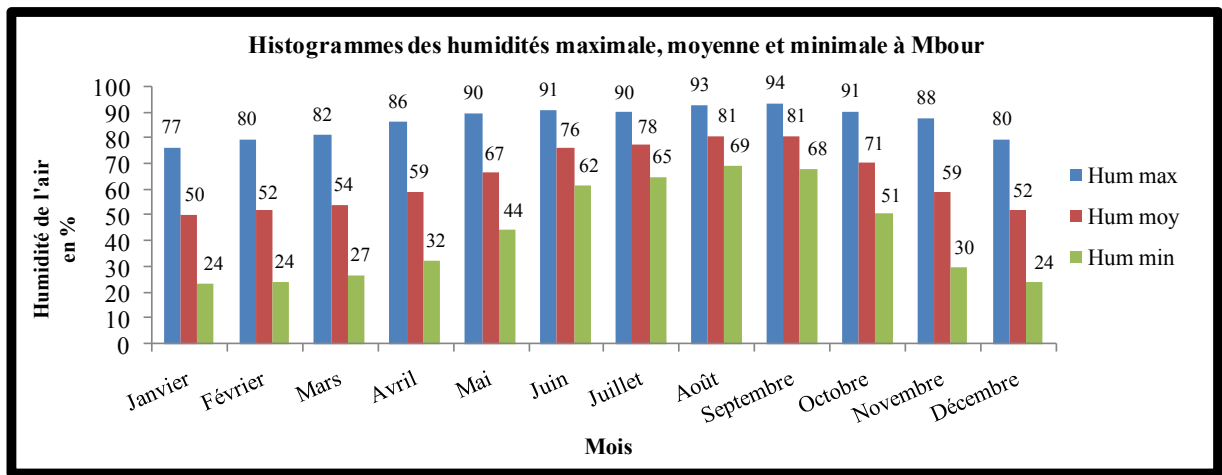
Graphique 5

1.2.4. L'humidité relative

La teneur en vapeur d'eau dans l'air varie suivant les saisons. En effet, l'humidité relative (HR) de l'atmosphère se révèle plus forte durant la saison pluvieuse que pendant la saison non pluvieuse.

On note pour les mois pluvieux les valeurs maximales suivantes : juin (91 %), juillet (90 %), août (93 %), septembre (94 %), octobre (91 %). Bien que l'humidité maximale reste élevée, elle ne varie pas grandement (*Graphique 6*).

Les valeurs maximales de l'HR changent durant toute l'année entre 77 % (janvier) et 94 % (septembre). Les valeurs minimales vont de 23,8 % (janvier) à 69,5 % en août.



Graphique 6

1.3. Le relief

Palmarin, comme l'ensemble du Delta du Saloum, s'avère une zone au relief bas. D'une manière générale, l'altitude de la topographie à Palmarin reste partout inférieure à 10 m.

Toute cette partie du Saloum correspond en réalité à un « estuaire inversé » (*KALY, 2001 p. 12*). Une telle configuration tient de l'absence d'un cours d'eau puissant capable de déposer en aval des matériaux alluviaux drainés depuis l'amont de sorte à pouvoir créer une surélévation du relief.

1.4. Les sols

Dans la CR, on retrouve essentiellement deux formations pédologiques : les tannes et les sols dior¹.

Les tannes représentent de loin le type de formation le plus répandu sur Palmarin. Ils occupent « 85 % du territoire » et continuent de s'épandre (*SECK, 2008*). Les tannes se caractérisent par leur aspect halomorphe et acide ; ils restent donc incultes, inappropriés à l'agriculture. Ils deviennent surtout visibles dans la partie Sud-est de la communauté rurale et au-delà.

Les sols dior se retrouvent en particulier au Nord-est, sur 12 % de l'espace palmarinois, « soit moins de 1000 ha » (*SECK, 2008*). Autrefois, les populations cultivaient sur ces sols de l'arachide, du maïs, du mil, du sorgho, etc.

1.5. La répartition des eaux

Il existe deux types de disponibilité de l'eau à savoir : l'eau de surface et l'eau souterraine.

1.5.1. Les eaux de surface

La « platitude du relief » (*FAYE, 1995*) ne permet pas à Palmarin le développement d'un véritable cours d'eau.

¹ Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés (ou sols dior) très sableux (plus de 95 % de sables) donc souvent très dégradés (*Ministre de l'Environnement, de la Protection de la Nature, des Bassins de rétention et des Lacs artificiels, Annuaire sur l'Environnement et les Ressources Naturelles du Sénégal, CSE, Deuxième édition, Mai 2009*)

Les seules étendues au voisinage de la CR se constituent du Saloum et de son sous-bras, le marigot de Ndangane logé à l'Est de la communauté rurale.

A l'Ouest de Palmarin, prévaut l'océan Atlantique sur toute la façade du littoral. Ce domaine se caractérise par la pêche de grande envergure et le tourisme.

1.5.2. Les eaux souterraines

Ces eaux se concentrent dans trois nappes souterraines différentes :

- Le Continental Terminal : cette eau se loge dans des veines souterraines dont l'épaisseur ne dépasse pas les 7 m.
- La nappe du Maestrichtien : elle se révèle très salée, donc inutilisable pour la boisson ainsi que pour l'irrigation. Le forage de Djifère pompe cette eau (*SECK, 2008*).
- L'eau du Paléocène : elle présente une qualité assez bonne. Elle sert à tous les usages domestiques.

1.6. La faune

D'après *SECK (2008)*, on comptait dans le passé beaucoup d'animaux à Palmarin aujourd'hui disparus de la faune. Mr Pierre Ndène² mentionne aujourd'hui la présence d'espèces de boa, de chacal, de chat sauvage, de couleuvre, de Courlis (corlieu), de crabe violoniste, de l'Egre dimorphe, d'hyène, de mangouste, de singe et de vipère.

² Pierre Ndène, Président des éco-guides de la Communauté rurale de Palmarin

II. RAPPEL DES GENERALITES SUR LES ECOSYSTEMES RESTAURES

Les passages ci-après constituent une reprise des parties du mémoire de maîtrise. Ils portent sur la description biologique et phénologique ainsi que l'utilité des plantes restaurées à Palmarin.

2.1. Généralités sur l'écosystème de *Casuarina equisetifolia*

Cette caractérisation va beaucoup dépendre de la biologie et de la phénologie de *Casuarina equisetifolia* mais également de l'influence du milieu physique et de l'intervention de l'Homme dans le façonnement de l'écosystème.

Il faut d'abord noter que *Casuarina equisetifolia* fait partie de ce grand ensemble de plantes dont la multiplication s'opère par les graines produites des individus. Ce type de plantes forme l'un des deux embranchements du Règne Végétal dit celui des Spermatophytes. Ce dernier se divise à son tour en deux sous-embranchements : les Angiospermes et les Gymnospermes. Les premiers génèrent des fleurs alors que les seconds n'en font pas (RAMADE, 2008 p. 30).

La classe des Angiospermes contient le groupe des plantes dont la graine à la germination (embryon) fait pousser deux cotylédons (Dicotylédones) et ceux porteurs d'un seul cotylédon, les Monocotylédones.

Dans la sous-classe des Dicotylédones, on retrouve l'ordre des *Casuarinales* qui compte la famille des *Casuarinaceae* à laquelle appartient le genre *Casuarina*. L'espèce *Casuarina equisetifolia* dérive donc du genre *Casuarina*, héritier de l'ensemble des critères déterminés par la taxonomie présentée.

En résumé, *Casuarina equisetifolia* se présente telle une plante productrice de graines (Spermatophyte) et de fleurs (Angiosperme), d'où ses caractères dioïque ou monoïque (selon les auteurs) (MEYER, 2005 p. 3). Autrement-dit, l'espèce porte en elle-même les éléments et les agents de sa reproduction (fleurs et fruits).

Si *Casuarina equisetifolia*, plante chlorophyllienne, produit des fruits, cela atteste de la réalisation d'une synthèse des nutriments nécessaires à ce processus consommateur d'énergie solaire, la photosynthèse. *Casuarina equisetifolia* constitue alors une plante chlorophyllienne assimilatrice de gaz carbonique (CO₂) doté de l'élément chimique carbone (C). En d'autres termes, il stocke le carbone de l'Atmosphère.

D'après FORSTER (1961, p. 30), *Casuarina equisetifolia* possède des « fleurs unisexuées » disposées de la façon suivante : les « fleurs mâles en châtons roussâtres » se retrouvent sur l'extrémité du cladode – rattaché au rameau et long entre 10 et 35 cm – et les fleurs femelles correspondent aux « petites boules au bout de rameaux courts ». Les fleurs femelles forment donc les « fruits »

capsulaires regroupés pour donner des cônes de diamètre environ égal à 2 centimètres. Ces fruits disposent chacun de petites graines ailées au nombre allant de 60 à 90 (MEYER, 2005 p. 4). Il faudrait broyer 10 Kilogrammes des « boules » pour n'obtenir qu'1 Kilogramme de graines de *Casuarina equisetifolia* (FORSTER, 1961 p. 30).

Ces petites graines ont assuré la dissémination de *Casuarina equisetifolia* depuis des siècles à travers le monde.

« Originaire du Sud-est asiatique jusqu'en Australie » (MEYER, 2005 p. 4), le filao a ainsi pu conquérir la Bande Intertropicale et s'adapter aux conditions de plusieurs variétés de climat : « depuis les régions de climat équatorial avec des pluies annuelles dépassant 2 mètres, sans saison sèche, jusqu'aux régions à climat sec de mousson avec pluies inférieures à 0,80 mètre et une saison sèche de 6 à 7 mois » (FORSTER, 1961 p. 32).

Casuarina equisetifolia appartient au genre *Casuarina* composé de 17 espèces au total. Les *Casuarina*, en plus des *Allocasuarina*, des *Ceuthostoma* et des *Gymnostoma* constituent les 4 genres de plantes de la famille de *Casuarinaceae*. De manière globale, on a recensé dans cette famille 96 espèces de plantes dites « actinorhiziennes » (MAGGIA, 1991 p. 16). On les appelle « ainsi car elles forment une symbiose fixatrice d'azote avec un actinomycète, *Frankia* »³.

Casuarina equisetifolia se présente comme un arbre ou un arbuste culminant entre 10 et 30 mètres au sommet d'un houppier de forme « irrégulière, plutôt ovoïde » (FORSTER, 1961 p. 30). Il constitue une « essence de pleine lumière » (héliophile) inféodée au littoral (FORSTER, 1961 p. 32). Ses feuilles en miniature restent assimilables à des « écailles en verticilles au niveau des nœuds de jeunes rameaux » et son écorce externe « lisse », « claire » dans sa jeunesse tend à devenir « rugueuse et brune, s'exfoliant en bande longitudinales » au fur-et-à-mesure que la plante vieillit.

Cependant, si *Casuarina equisetifolia* se montre très sollicité par les programmes de reboisement, cela ne relève ni d'un hasard, ni de l'aspect esthétique de cette plante. *Casuarina equisetifolia* présente nombre d'avantages dans l'atténuation des changements climatiques et la lutte contre l'effet de serre.

D'abord, au titre d'essence chlorophyllienne, le filao, pour assurer son développement, utilise le carbone atmosphérique dont l'assimilation s'effectue dans ses tissus grâce à la photosynthèse. Par conséquent, dans les conditions écologiques optimales, il existe une relation entre le taux de carbone séquestré et l'accroissement de la biomasse (Production primaire net) : plus le carbone séquestré devient important, plus la biomasse synthétisée et stockée augmente. D'après MEYER, (2005, p. 4), le filao jouit d'une vitesse de croissance moyenne de 3 mètres par an. Sur cette base, *Casuarina equisetifolia* participe de manière très significative à la séquestration du carbone dans le monde.

³PERET Benjamin, *Transport de l'auxine et développement du nodule actinorhizien chez l'arbre tropical Casuarina glauca*, Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Montpellier II, le 29 juin 2007

En sus des cet avantage dans le domaine de la séquestration du carbone atmosphérique, d'autres préoccupations environnementales ont requis l'utilisation de *Casuarina equisetifolia*.

Grâce à sa symbiose avec des champignons actinomycète (*Frankia*), endomycorhizes ou ectomycorhizes présents dans les nodules racinaires, *Casuarina equisetifolia* parvient à « coloniser des zones ouvertes, ensoleillées, dégradées et appauvries » (MEYER, 2005 p. 4). Cette symbiose des filaos et des champignons s'avère « fixatrice d'azote et ceci explique le meilleur développement des arbres (...) » (FORSTER, 1961 p. 32). Une expérience de ce genre de restauration a déjà eu lieu dans les Niayes du Sénégal.

En outre, les filaos ont la réputation de se montrer de bons fixateurs du sol capables de parer à l'érosion des dunes. Au Sénégal, le reboisement de *Casuarina equisetifolia* a permis la fixation de « 180 km de dunes côtières ». Ceci a contribué à « l'augmentation de la disponibilité des terres cultivables », à la protection des « cuvettes maraîchères », à « l'implantation définitive des populations » et à « l'investissement dans des systèmes d'irrigation plus pérennes » (BOTONI, et al., 2009 p. 24). En Chine, une bande littorale longue de 3 000 km, large entre 500 m et 5 km a été reboisée par des filaos (MAGGIA, 1991 p. 16).

Avec une hauteur moyenne de 40 à 50 m, *Casuarina equisetifolia* forme des arbres d'ombrage sur les plages (MEYER, 2005 p. 3). Ils servent également de brise-vent et peuvent protéger des tempêtes ou atténuer l'impact des cyclones.

L'ensemble de ces atouts du filao le font considérer comme l'espèce la plus reboisée dans des milieux hors de son espace d'origine (MAGGIA, 1991 p. 16).

A Palmarin, *Casuarina equisetifolia* servira dans le cadre du vaste projet de plantation du littoral mené par l'ACCC-Sénégal.

2.2. Généralités sur l'écosystème de mangrove

Longtemps restée méconnue de la science, la mangrove livre d'abord ses secrets aux botanistes au XVIIIe siècle, puis progressivement, s'ouvre à nombre de disciplines diverses.

Ce milieu écologique complexe doit sa survie et sa pérennité à un ensemble de facteurs conditionnels et stationnels (physiques) qui tiennent essentiellement de son substrat de vase mais aussi de l'influence de la mer.

La mangrove offre en effet une variété tant dans sa répartition géographique que dans sa composition floristique liées aux facteurs de son existence.

Cependant, même si la compréhension de ce milieu inextricable paraît récente, la curiosité suscitée de sa part ne date pas d'aujourd'hui. Comme le rappelle MARIUS (1990, p. 9), les « premiers écrits sur la

mangrove remontent à 325 av. J.C. avec une chronique de Nearchus, commandant de la flotte d'Alexandre le Grand ».

Les ouvrages scientifiques précurseurs sur l'étude de la mangrove aux XVIIe et XVIIIe siècles vont surtout se concentrer sur « les aspects floristiques et forestiers » de cette dernière (SALEM, 1999 p. 18). Ils s'en suivront les œuvres décisives des taxonomistes allemands au XIXe siècle.

Les travaux des botanistes et naturalistes allaient permettre au XXe siècle l'essor de l'écologie dont l'avènement contribua « à reconsidérer les zones humides ». Il faudra attendre les années 1960-1970 pour que les « mangroves soient considérées comme des écosystèmes riches et fragiles » (SALEM, 1999 p. 18).

Les travaux de Snedaker (1984), de Walsh, de l'UNESCO (Organisation des Nations unies pour l'Education, la Science et la Culture), de la FAO (Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture), de l'ISME (International Society for Mangrove Ecosystems) (1997), pour ne citer que ceux-là, viendront renforcer ces progrès acquis dans la connaissance de la mangrove (SALEM, 1999, p. 18-19 ; MARIUS, 1990, p. 9).

Au fil des années, le mystère sur la mangrove se dissipe grâce à l'interdisciplinarité entre l'hydrobiologie, la sédimentologie et la pédologie (SALEM, 1999 p. 18). Ceci va faire appel à un besoin de typologie mais avant tout de définition de cet écosystème hors du commun de la végétation.

A ce niveau, il faut reconnaître l'absence de progrès quant à une définition unanime de la mangrove. En effet, l'idée de Macnae (1968) de réserver le mot « mangrove » à la désignation du palétuvier et celui de « mangal » à la forêt de mangrove va faire l'objet de rejet (SALEM, 1999 p. 19).

Selon SALEM (1999, p. 19), « mangrove désigne non seulement un arbre ou une formation végétale, mais aussi un marais maritime tropical, un écosystème littoral forestier ou aquatique, un système à usage multiple, un paysage amphibie ».

D'aucuns considèrent la mangrove comme une « forêt halophile » ou aussi une « une forêt littorale typiquement tropicale des côtes marécageuses » (AGBOGBA, et al., 1985 p. 2).

La mangrove reste également vue par DEGUE-NAMBONA (2008, p. 27) telle une végétation illustrative des estuaires et des deltas tropicaux marqués par les mouvements de la marée. Ceux-ci matérialisent une variation de la hauteur de marnage entre 2 m à 3 m.

Mais l'introduction du concept de « Rivières du Sud » se fit par (SALEM, 1994). L'auteur voulait entendre par là la « frange littorale profondément aménagée par l'homme et s'étendant du Sénégal à la Sierra Leone » (SALEM, 1999 p. 17).

Les estuaires de la Casamance, de la Gambie, du Sénégal et du Sine-Saloum se trouvent circonscrits dans ce cadre géographique des Rivières du Sud.

MARIUS (1990, p. 13) définira les conditions d'existence de la mangrove comme suit :

- une température pas être trop basse ;
- des « côtes plates d'accrétion rapide ou les zones à fort marnage » données favorables à l'installation de la mangrove ;
- un substrat fait de matériel « argileux ou argilo-limoneux ».

La modification dans le peuplement de la mangrove varie en fonction de l'intensité des facteurs ci-dessus évoqués. Ainsi, même si elle couvre « 60 à 75 % du littoral des régions tropicales », la mangrove s'en trouve « irrégulièrement répartie » et « déborde nettement au Nord et au Sud des deux tropiques » (*MARIUS, 1990 p. 15*).

En outre, dans une association d'espèces de mangrove, on peut observer une zonation différente selon les espèces.

On recense dans la mangrove d'Afrique de l'Ouest 9 espèces réparties en 4 familles à savoir les *Combretacées* (*Conocarpus erectus* et *Laguncularia racemosa*), les *Malpighiacées* (*Banisteria leona*, *Heteropteris leona* et *Stigmaphyllon ovatum*), les *Rhizophoracées* (*Rhizophora harrisonii*, *Rhizophora mangle* et *Rhizophora racemosa*) et enfin les *Verbenacées* connus d'une seule espèce *Avicennia africana* aussi appelée *Avicennia nitida* en Sierra Leone (*SALEM, 1994 p. 51*).

A propos du Sénégal, il existe deux formations végétales hégémoniques du paysage côtier et ce à l'image de l'ensemble des « Rivières du Sud ». Il s'agit des *Rhizophora* et des *Verbenaceae* (*SALEM, 1999*).

Le paysage de la mangrove se dispose de manière générale de la façon suivante depuis le chenal jusqu'aux formations végétales de la terre ferme :

- D'abord il y a les palétuviers en tant que tels, au nombre de 6 espèces
 - *Rhizophora racemosa*,
 - *Rhizophora mangle*,
 - *Rhizophora harrisonii*,
 - *Avicennia africana*,
 - *Laguncularia racemosa*,
 - *Conocarpus erectus*,
- Ensuite, les « tannes herbacées » ou « tannes herbues » contrastées avec les tannes "vives" constituées des terres sursalées dépourvues de végétation.

Dans ce grand ensemble donc, il faut relever la prédominance des 2 principales espèces qui peuplent la mangrove du Sénégal et de façon plus vaste celle des « Rivières du Sud » : *Rhizophora mangle* dit « palétuvier rouge » et *Avicennia africana* ou « palétuvier blanc ».

Les distinctions et les ressemblances entre ces deux espèces vont d'abord se baser sur des critères de physionomie, de phénologie, de peuplement ensuite d'hydrogéomorphologie.

2.2.1. Il faut remarquer, à l'image de toute plante, la variation de la physionomie d'*Avicennia africana* et de *Rhizophora mangle* en fonction de leur croissance afin de pouvoir s'adapter à leur biotope. Les deux espèces présentent des points communs mais se différencient sur plusieurs autres. S'agissant de leurs ressemblances on note ceci :

- *Avicennia africana* autant que *Rhizophora mangle* ne dépassent pas au Sénégal les 10 m de hauteur (DEGUE-NAMBONA, 2008, p. 27) ;

- elles correspondent toutes à des espèces sempervirentes annuelles ;

- leur physiologie, pas encore maîtrisée par les chercheurs, semble selon AGBOGBA *et al.* (1985, p. 2), « dépendre de l'absorption constante et de l'exsorption ou de la sécrétion de sel ». L'auteur fait savoir qu'une interruption dans le pompage du sel par les racines des palétuviers les mène à la mort. Cependant, même inféodés à un milieu salé, les palétuviers restent des « halophytes facultatifs » ; autrement-dit, leur croissance peut s'avérer « normale dans des conditions de dessalure totale » au début de leur croissance. D'ailleurs la mangrove la « plus belle » se rencontrerait dans les zones humides de l'équateur et des tropiques où il se note un dessalement – dû au lessivage par une pluie abondante – durant une longue période de l'année (MARIUS, 1990 p. 13).

Ainsi d'après toujours MARIUS (1990, p. 13), dans les milieux à climat contrasté, où le taux de sel apparaît supérieur à celui de la mer, on assiste à un rabougrissement des palétuviers et à une diminution de la taille de la mangrove au profit de l'avancée des « zones nues, sursalées ».

Tels qu'on les découvre dans la plupart de leurs écosystèmes naturels, *Avicennia africana* et *Rhizophora* s'avèrent tous adaptés aux espaces halophiles. Toutefois, la croissance de la mangrove reste plus tributaire de la variation de la marée que de la salinité de l'eau elle-même. Cela vaut particulièrement pour *Rhizophora mangle* (MARIUS, 1990 p. 13).

Parmi les critères physiologiques de différenciation des deux espèces, on peut remarquer les points suivants :

- *Avicennia africana* dispose de racines aériennes dites pneumatophores, au géotropisme inversé. Il s'agit de « petites aiguilles qui percent la vase » pour capter l'oxygène de

l'atmosphère. Elles constituent la partie visible d'un système racinaire rampant, masqué par l'eau⁴. Au contraire, *Rhizophora mangle*, laisse paraître des racines échasses. Elles forment des demi-cercles, supports du tronc des plantes ainsi portées à la surface de l'eau. A la différence des pneumatophores, les racines échasses s'enfoncent profondément dans la vase.

– la distinction physiologique entre *Avicennia* et *Rhizophora* se renforce par la présence d'excrétions de sel sur les feuilles de la première espèce. Cela correspond à une stratégie adoptée par le *Verbenaceae* pour survivre à la sursalure du milieu. Il s'avère en effet fatal à *Avicennia africana* de baigner dans une salinité excédant 5,5 ‰. Par contre, son taux de germination se retrouve entre 70 et 95 % lorsque la teneur en sel varie entre 4 et 4,5 ‰⁵.

– dans tous les cas, *Avicennia* reste plus adapté que *Rhizophora mangle* aux trop fortes concentrations en sel (MARIUS, 1990 p. 17).

– les branches de *Rhizophora mangle* apparaissent plus basses que celles d'*Avicennia*.

2.2.2. Du point de vue de la phénologie, chaque espèce présente des phénophases pas obligatoirement similaires ou en opposition l'une de l'autre. Dans les deux cas, AGBOGBA et al. (1985, p. 2) font mention d'une phénologie des mangroves en « cycles fréquents à intervalles plus ou moins réguliers tout au long de l'année ». Les productions des fleurs, des feuilles et des fruits interviennent à des périodes variables tout en restant constantes dans leur avènement. Les fruits de mangroves présentés comme des hydrocores par SALEM (1999, p. 64) s'adaptent selon le type de milieu pour assurer la pérennité de l'espèce. Cependant, l'aspect touffu de la végétation des palétuviers compromet la survie des plants.

– Pour *Avicennia africana*, KANDJI et al. (2006)⁶ dénotent avant tout le « peu de recherches » réalisées à son sujet contrairement à *Rhizophora*, mieux connu.

✓ les feuilles du palétuvier blanc, de type composé, se font porter par un petit pétiole. Ces feuilles se révèlent verdâtres et lancéolées avec de « minuscules trous dans les deux faces »⁷.

⁴ KANDJI Cheikh & PIRARD Hervé & MASSALY Souleymane, *Fiche technique de production et de plantation d'Avicennia africana*, in « Appui à la gestion communautaire des ressources naturelles des forêts de mangrove – réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal » Projet mangrove –, Mars 2006

⁵ KANDJI Cheikh & PIRARD Hervé & MASSALY Souleymane, *Fiche technique de production et de plantation d'Avicennia africana*, in « Appui à la gestion communautaire des ressources naturelles des forêts de mangrove – réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal » Projet mangrove –, Mars 2006

⁶ KANDJI Cheikh & PIRARD Hervé & MASSALY Souleymane, *Fiche technique de production et de plantation d'Avicennia africana*, in « Appui à la gestion communautaire des ressources naturelles des forêts de mangrove – réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal » Projet mangrove –, Mars 2006

⁷ KANDJI Cheikh & PIRARD Hervé & MASSALY Souleymane, *Fiche technique de production et de plantation d'Avicennia africana*, in « Appui à la gestion communautaire des ressources naturelles des forêts de mangrove – réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal » Projet mangrove –, Mars 2006

✓ *KANDJI et al. (2006)* remarquent l'existence de bractée à la base des fleurs d'*Avicennia africana*.

✓ la graine d'*Avicennia* ovale et légèrement aplatie, contient l'embryon dont le développement suffit à provoquer l'ouverture de son enveloppe dit péricarpe⁸.

– S'agissant des *Rhizophora*, les observations suivantes doivent se faire :

✓ les feuilles des plantes s'avèrent persistantes mais il existe dans l'année des périodes où ces organes chutent davantage. Cela arrive au moment où les feuilles atteignent leur sénescence (*FAYE, et al., 2010 p. 121*)

✓ la floraison des *Rhizophoraceae* se produit de septembre à la fin février dans les Iles du Saloum, selon *FAYE, et al. (2010 p. 126)*. Elle couvre ainsi les mois pluvieux de septembre et octobre et une partie de la saison non pluvieuse d'octobre à février.

Dans les faits, les premiers boutons floraux se forment début septembre et continuent de se développer jusqu'en octobre, période à laquelle les fleurs entament leur épanouissement. La floraison s'interrompt au mois de janvier avec l'apparition des nouaisons annonciatrices de la pousse des fruits (*FAYE, et al., 2010 p. 127*).

La floraison constitue un moyen efficace de reconnaissance du palétuvier rouge pour le distinguer du *Verbenaceae*.

✓ Mais en réalité, le passage de la phase de floraison à celle de fructification s'opère, plus tôt, au mois de décembre et se poursuit jusqu'au mois de septembre. Cette phénophase, tel que l'indiquent *FAYE et al. (2010 p. 127)*, couvre une grande période de la saison pluvieuse dans les Iles du Saloum : de juin à septembre. Les propagules deviennent matures dans cet intervalle à partir du mois d'août. Elles contiennent les embryons du *Rhizophora*, ce qui en fait une espèce vivipare.

A la chute des propagules, celles-ci se dispersent à l'aide du courant et « s'implantent par la suite sur les substrats vaseux » (*DEGUE-NAMBONA, 2008 p. 27*).

Il convient de faire voir à ce niveau que la période de fructification des *Rhizophora* reste nettement plus longue que celle des *Avicennia* (*FAYE, et al., 2010 p. 128*). En plus, au contraire des *Verbenaceae*, *Rhizophora* constitue l'espèce pionnière dans les rivières du sud (*SALEM, 1994 p. 56*).

2.2.3. La mangrove des côtes sénégalaises, peuplées de 6 espèces, voit la prédominance de deux d'entre elles : *Avicennia africana* et *Rhizophora mangle*. Celles-ci colonisent l'espace de manière différente et leur chronoséquence varie en fonction des conditions du biotope.

Cependant *Rhizophora mangle* reste l'espèce la plus abondante et cela s'avère en adéquation avec la « distribution de ce palétuvier à l'échelle mondiale » (*FAYE, et al., 2010 p. 121*).

⁸*KANDJI Cheikh & PIRARD Hervé & MASSALY Souleymane, Fiche technique de production et de plantation d'Avicennia africana, in « Appui à la gestion communautaire des ressources naturelles des forêts de mangrove – réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal » Projet mangrove –, Mars 2006*

Par rapport à la chronoséquence, *Rhizophora mangle* occupe de façon systématique la zone infratidale, la plus vaseuse avec une plus grande présence d'eau. Le palétuvier rouge « fait souvent défaut, notamment dans les zones sableuses » (MARIUS, 1990 p. 30). Dans ce dernier espace, sévit *Avicennia*.

KANDJI *et al.*⁹ situent les *Verbenaceae* au « voisinage de la terre ferme », c'est-à-dire entre la zone des *Rhizophora* et « les essences forestières continentales » en certains endroits.

Cette zonation des deux espèces de mangrove apparaît plus marquée par les conditions hydrogéomorphologiques.

2.2.4. D'après MARIUS (1990 p. 17), les palétuviers restent souvent associés à « des marais salés, saumâtres ou d'eau douce généralement liés à la dégradation des mangroves et aux changements dans le régime de sédimentation et surtout du régime hydrique ». Cette assertion décrit assez bien l'évolution hydrogéomorphologique de la mangrove.

En effet, du même auteur, on note l'existence d'une chronoséquence des alluvions – formant la vase – selon la suite : maturation, oxydation, acidification, dessalage (MARIUS, 1990 p. 84).

L'évolution des facteurs morpho-sédimentologiques et des conditions hydro-climatiques va, donc, dicter la zonation des palétuviers sur les côtes ouest-africaines (SALEM, 1994 p. 52).

La salinité varie selon un gradient, facteur des fortes concentrations dans les mangroves sahéliennes et des taux moindres à l'intérieur des marais de Guinée et de Sierra Leone.

Quant à l'acidité, elle se révèle plus importante pour la vase colonisée par le *Rhizophora* et plus faible dans le sol des *Avicennia*. Cette situation tient à une plus grande présence de soufre dans la vase des *Rhizophora*. Dans l'espace sahélien, « l'oxydation des composés de soufre aboutit naturellement à une acidification extrême des sols ». Par contre, en Guinée et en Sierra Leone, l'acidité résulte d'un aménagement inadéquat (SALEM, 1994 p. 56).

Malgré la présence d'acidité dans sa zone, *Rhizophora mangle* se considère comme l'espèce pionnière de la mangrove des Rivières du Sud (DEGUE-NAMBONA, 2008 p. 27). Les racines échasses de la plante facilitent la fixation des sédiments et permettent d'éviter le comblement des lagunes.

2.3. Présentation cartographiée des stations de CATF

L'atteinte de l'un des objectifs majeurs de cette étude se réalise avec la délimitation de toutes les stations reboisées à Palmarin pour les palétuviers comme pour *Casuarina equisetifolia*.

Le recensement des aires CATF de l'ACCC et de l'UICN fait état 16 stations pour chaque famille de plante. Finalement, les 2 stations de l'UICN ont quitté cette étude pour des raisons plausibles

⁹ KANDJI Cheikh & PIRARD Hervé & MASSALY Souleymane, *Fiche technique de production et de plantation d'Avicennia africana*, in « Appui à la gestion communautaire des ressources naturelles des forêts de mangrove – réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal » Projet mangrove –, Mars 2006

(NDOUYE, 2011 p. 86). De ce fait, les stations à mangrove se trouvent réduit à 14. Le nombre total de stations étudiées passent de 32 à 30.

Toutefois, les stations de CATF ont une disposition latitudinale qui les regroupe à proximité de leur village parrain ou de leur site naturel respectif.

De cette façon, on a divisé la CR de Palmarin en Zone dites de CATF, ceci dans le but de faciliter la visibilité dans la représentation des cartes avec une ouverture plus grande du zoom.

Il y aura finalement 4 Zones de CATF autour des 4 villages de Palmarin : Diakhanor, Ngallou, Ngeth et Ngounoumane. Chaque village assure à la fois le parrainage et le suivi des sites de *Casuarina* contiguës et également des sites naturels de mangrove.

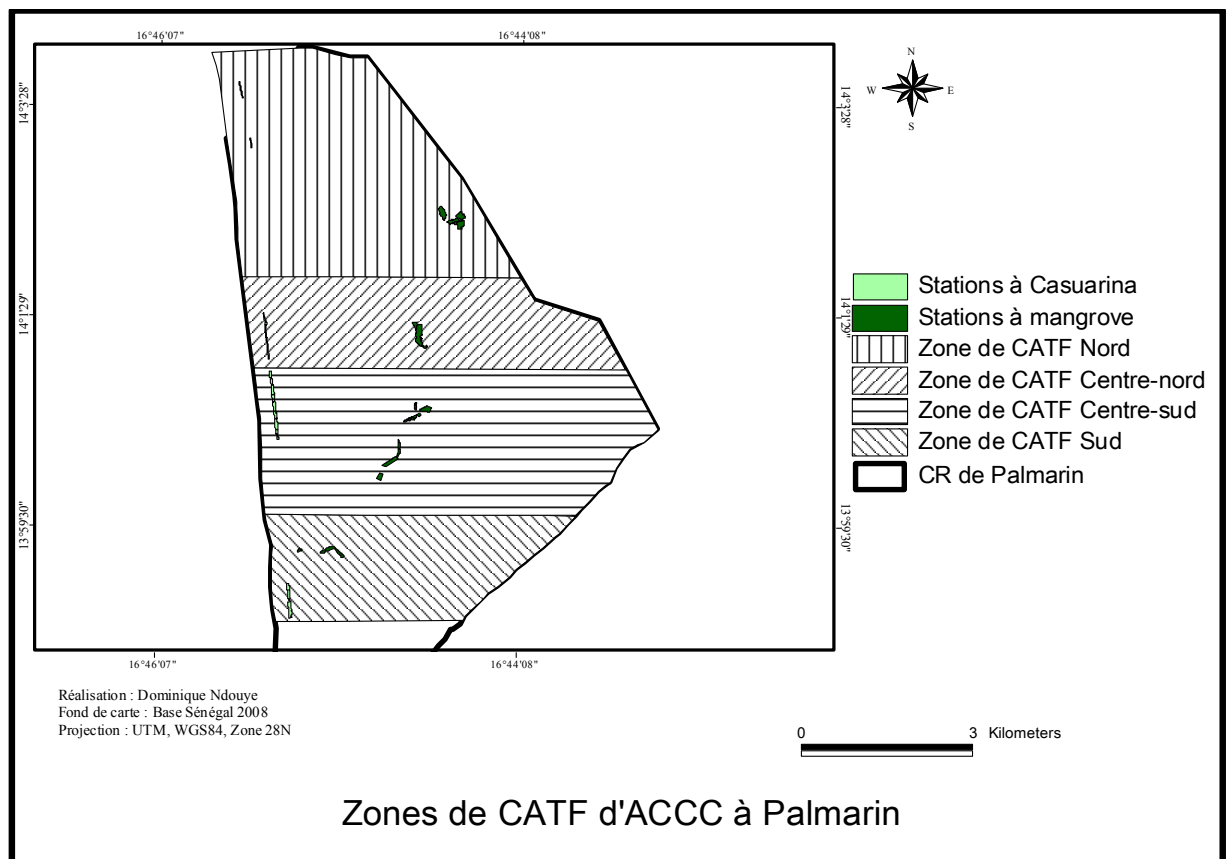


Figure 2

2.3.1. Zone Nord des CATF

Elle correspond à la partie la plus au Nord de la Communauté rurale de Palmarin : le village parrain de Ngallou.

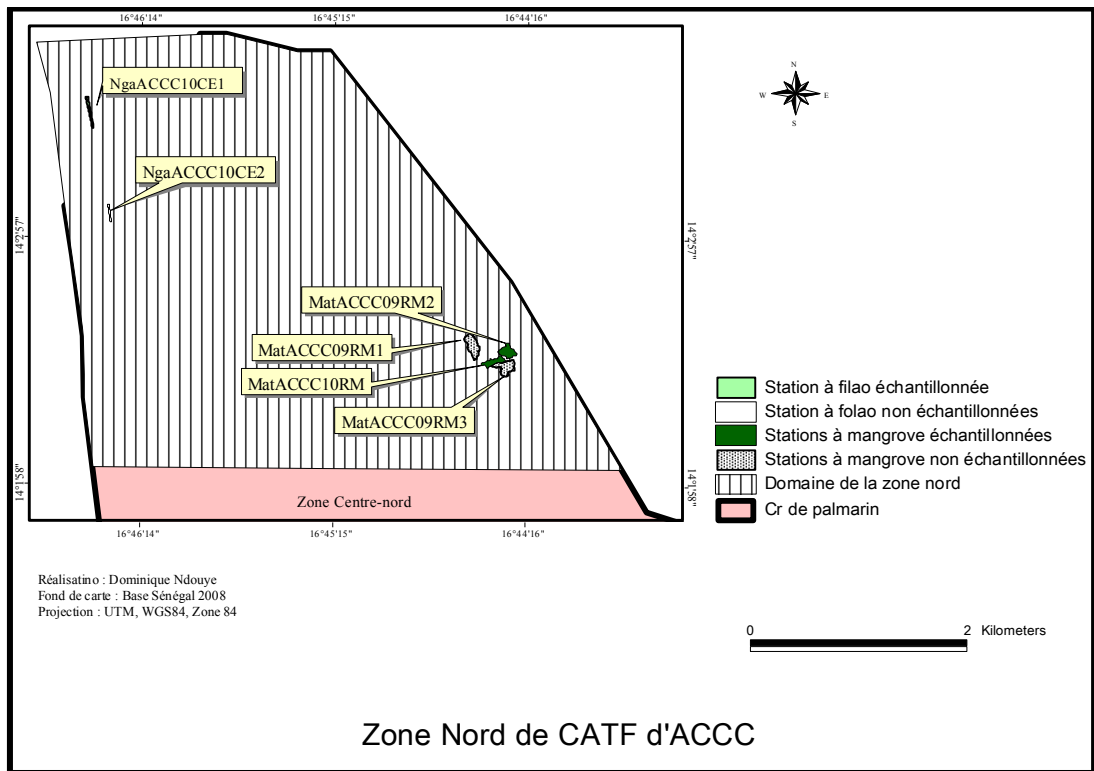


Figure 3

Ici le reboisement a concerné 2 stations pour *Casuarina equisetifolia* : NgaACCC10CE1 et NgaACCC10CE2. Il y aura 4 stations de palétuviers : MatACCC09RM1, MatACCC09RM2, MatACCC09RM3 et MatACCC10RM.

2.3.2. Zone Centre-nord des CATF

La Zone Centre-nord correspond au village de Ngeth.

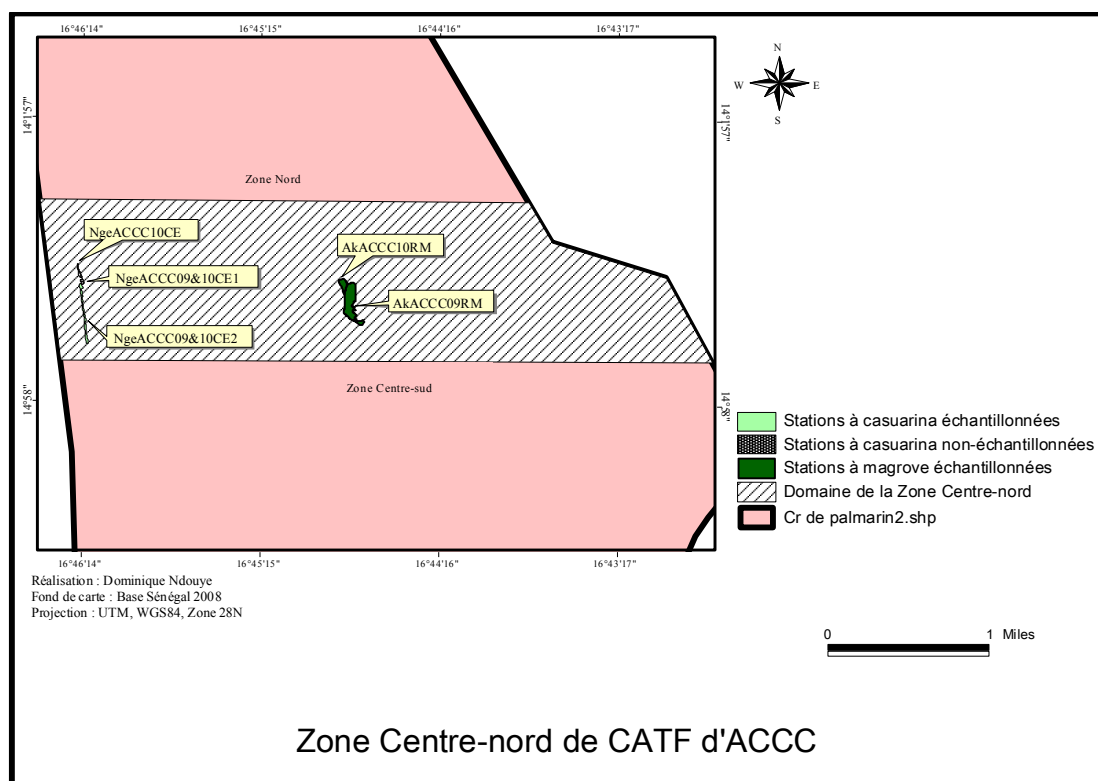


Figure 4

NgeACCC09&10CE1, NgeACCC09&10CE2 et NgeACCC10CE forment les stations de CATF à *Casuarina equisetifolia*. *Rhizophora mangle* se retrouve à AkoACCC10RM et à AkoACCC09RM.

2.3.3. Zone Centre-sud des CATF

Cette Zone compte le plus de stations. Elle contient 9 parcelles de *Casuarina* : NgoACCC09CE1, NgoACCC09CE2, NgoACCC09CE3, NgoACCC09CE4, NgoACCC09CE5, NgoACCC10CE1, NgoACCC10CE2, NgoACCC10CE3, NgoACCC10CE4. Les palétuviers se rencontrent à SanACCC09RM1, SanACCC09RM2, SanACCC09RM3, SanACCC10RM1, SanACCC10RM2, SanUICN99&00RM1, SanUICN99&00RM2. On recense ainsi 7 stations à palétuviers.

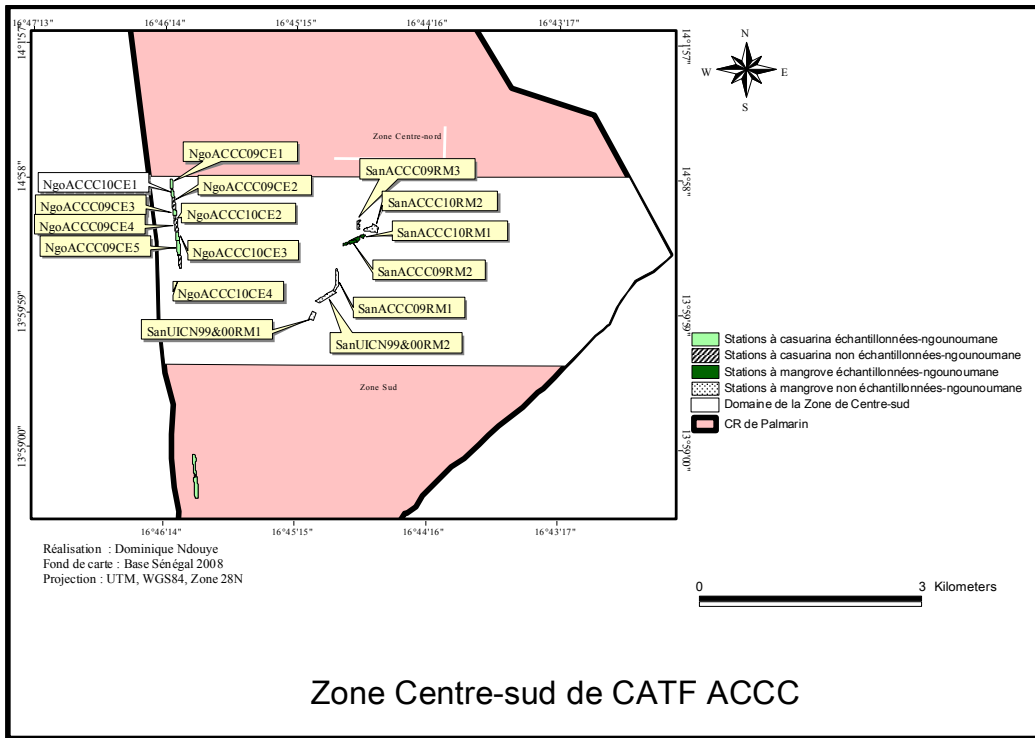


Figure 5

2.3.4. Zone Sud des CATF

Les portions reboisées à proximité du village de Diakhanor constituent cette Zone.

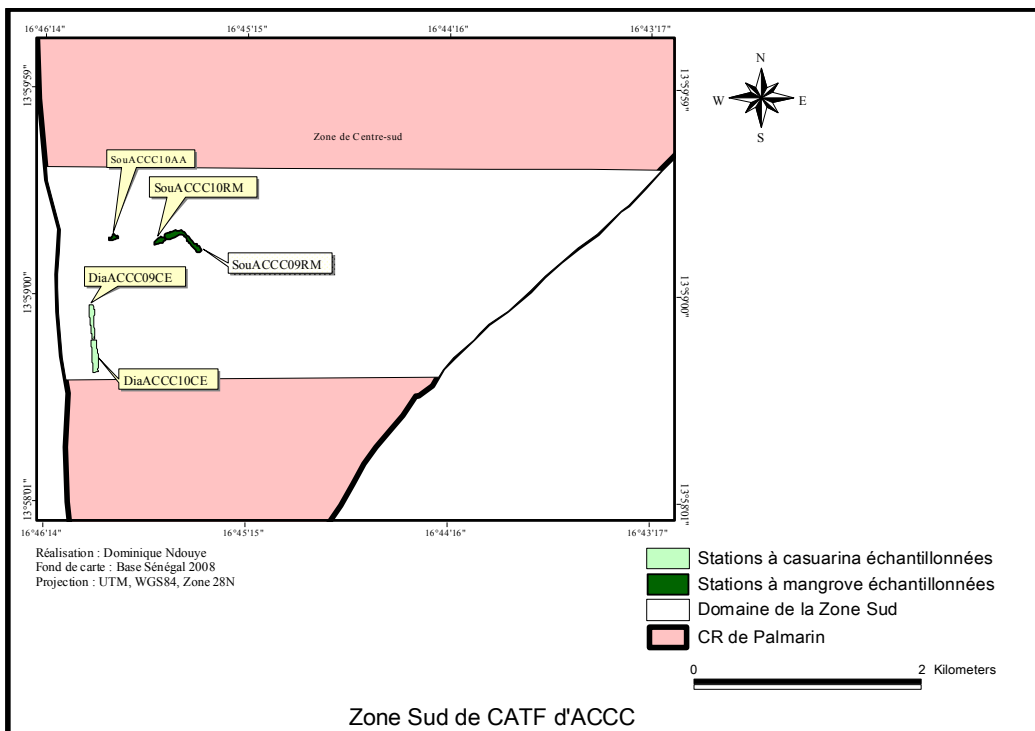


Figure 6

On dénombre dans cette partie sud des CATF 2 stations de *Casuarina equisetifolia* : DiaACCC09CE et DiaACCC10CE.

Les palétuviers occupent SouACCC09RM, SouACCC10AA et SouACCC10RM.

III. ANALYSE DES DONNEES ALLOMETRIQUES DES PLANTES RESTAUREES

3.1. Définition de l'allométrie

L'émergence de l'allométrie provient de la volonté de contourner les difficultés rencontrées dans les pratiques forestières, notamment l'inventaire de la masse potentielle de bois. L'allométrie peut se définir aujourd'hui « comme les dimensions structurales des arbres » (*LEHTONEN, 2005 p. 13*). Sa pratique fait appel aux « relations entre mensuration et masse » (*LEHTONEN, 2005 p. 13*).

L'allométrie permet de « générer ainsi la biomasse des individus ligneux » à travers les équations de régression allométrique dotées des paramètres de longueur et de masse des plantes (*MBOW, 2009 p. 65*).

Les procédés utilisés par l'allométrie vont s'avérer probants et pertinents dans l'évaluation de la biomasse sur pied quand bien même la recherche ouvre d'autres perspectives dans ce sens.

3.1.1. Les origines de l'allométrie

Au départ, l'estimation de la biomasse sur pied se faisait dans le cadre d'une planification durable des ressources forestières (*ZIANIS, et al., 2003*). Comme le rappelle, *MBOW (2009 p. 65)*, on se trouvait dans le contexte colonial d'une « exploitation des formations forestières basée sur une bonne connaissance du potentiel ligneux ».

Cependant, la « gestion des ressources forestières s'est focalisée sur l'estimation du volume du tronc pour quantifier » la biomasse des arbres au compte de l'industrie forestière (*LEHTONEN, 2005 p. 12*). On parle alors de cubage des arbres. L'équation la plus commode à la détermination de la biomasse par cubage se présente sous la forme d'une fonction de puissance :

$$M = aD^b$$

Dans cette relation, « a et b sont des coefficients d'ajustement, M la biomasse totale épigée sèche de l'arbre et D le diamètre à la hauteur de poitrine » (*ZIANIS, et al., 2003*). De cette façon, il devint possible d'établir des tables de cubage. Ces dernières mettent en relation des valeurs de volume de bois fort et celles correspondantes en volume de la tige (*MBOW, 2009 p. 65*).

Il se trouve que ce procédé ne prenait en compte que « le volume de bois utile » (tronc) (*MBOW, 2009 p. 65*) et laissait de côté les branches, les racines et les feuilles.

Ces dernières « composantes des arbres, en plus du tronc, étaient étudiées plus intensément quand un intérêt grandissant se manifestait à l'égard de la biomasse en tant que source d'énergie » (*LEHTONEN, 2005 p. 12*). En effet, la pression anthropique d'une démographie galopante fait croître le prélèvement du bois de chauffe. Cette biomasse ne peut plus se négliger dans l'élaboration de plans d'aménagement

forestier. Le bois devient en certains endroits une ressource alternative aux énergies d'origine fossile (ZIANIS, *et al.*, 2003).

Mais avec l'avènement des plans d'adaptation au changement climatique (NAMA) on a davantage engagé l'évaluation de la biomasse des arbres pour en connaître la teneur en carbone séquestré (REDD et REDD+). On a essayé d'estimer la biomasse des formations végétales dans l'entière des individus au moyen de procédés relativement simples.

3.1.2. Le procédé de l'allométrie

Comme toute démarche scientifique, l'allométrie procède d'abord par une quête de données (inventaires, échantillonnage, mensuration et pesée des individus de plantes), ensuite par l'analyse de ces dernières et enfin par l'établissement d'une équation allométrique à même de faire trouver la valeur « y » d'une masse totale de plante pour une valeur « x » de mensuration (DBH, H) de cette même plante.

3.1.2.1. Recueil des données de terrain

Avant même l'exécution d'un projet de CATF destiné à la séquestration du carbone, il faut, de préférence, réaliser l'établissement d'un état de référence de l'espace où doit se faire la plantation (BROWN, 2002 p. 1672). Ces informations doivent porter sur, entre autres, la cartographie de la couverture/occupation de l'espace, l'identification des pressions sur la terre et ses ressources, l'histoire de l'espace en question, le régime climatique (en particulier la température et la pluie), les types de sol, la topographie et les activités socio-économiques (pratiques forestières et agricoles) (BROWN, 2002 p. 1672). L'état de référence consiste surtout à jauger le niveau d'émission des GES par l'espace en question avant l'intervention des CATF.

Lorsqu'arrive la phase d'évaluation du carbone séquestré par la végétation plantée, les approches s'avèrent diverses. Elles concernent cette fois les individus des nouvelles formations végétales affectées à l'espace.

Toutefois, précise-t-on, « les méthodologies d'estimation » de l'absorption par les puits de tous les GES non réglementés par le « Protocole de Montréal sont celles qui sont agréées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat » autrement-dit, le GIEC (CCNUCC, 1997 p. 7). La permission d'ajustements de la méthodologie de mesure de la séquestration s'obtient seulement lorsque ceux-ci s'opèrent dans le respect du texte original du Protocole de Kyoto.

La méthodologie employée dans ce mémoire n'a pas encore reçu l'approbation du GIEC mais comme plusieurs autres, elle se trouve en instance d'attente de reconnaissance très probable.

On peut utiliser les données d'archive ou entreprendre le recueil de nouvelles données.

- Données archivées

Comme cela se fait dans certaines études de foresterie ou se suggère par des auteurs, la première démarche dans l'estimation de la biomasse reste la recherche des données déjà existantes.

Des tables de cubage déjà élaborées par des forestiers peuvent exister et servir de support au calcul de la biomasse.

Aussi, il faudrait vérifier avant tout, l'existence d'équations allométriques sur sa zone d'étude ou en créer. (PEARSON, *et al.*, 2005 p. 24).

- Types de données de la méthode allométrique destructive (Mad)

La Mad adopte une démarche basée sur l'allométrie des plantes avec la particularité de constituer un processus destructeur et irréversible (V. p. 38).

LEHTONEN (2005 p. 13) relève que les mesures se mènent « à un niveau de l'arbre et la sélection des individus échantillons est faite sur la base de certains critères ».

Les paramètres mesurés concernent la mensuration et la pesée.

On retrouve déjà certains de ces paramètres dans l'équation du cubage (V. p.32) : la masse de l'individu M, le diamètre D (ou DBH) de l'individu. Le DBH, autant pour les forêts tropicales que celles tempérées, explique « plus de 95 % des variations en biomasse » (BROWN, 2002 p. 1672).

En plus ou à défaut de ces deux paramètres, d'autres peuvent se mesurer.

Il s'agit de la hauteur de la plante ou du tronc (H), à préférer au DBH dans le cas de certaines espèces comme le palmier (BROWN, 2002 p. 1673). En plus, la variable de la H « décrit la fertilité du sol et aussi la capacité des arbres à transporter l'eau à la canopée » (LEHTONEN, 2005 p. 13).

On peut ajouter le comptage du nombre de ramilles noté NR (NDOUYE, 2011 p. 107).

3.1.2.2. Analyse des données allométriques

L'analyse des données de biomasse et de mensuration prend en compte plusieurs facteurs déterminant l'existence et la croissance des plantes étudiées.

Il s'agit notamment de facteurs génétiques qui « guident l'allométrie des espèces d'arbres », de la fertilité et des propriétés du sol, de la radiation solaire, de la sylviculture et de l'âge de la station. L'influence de ces paramètres fait varier l'allométrie des arbres d'un site à l'autre (LEHTONEN, 2005 p. 13).

L'interprétation des résultats de H, de D, de M et de NR se fait alors sur la base des facteurs physiques (climats, hydrologie), biochimiques (sol) et biologiques (physionomie, phénologie) de la plantation (NDOUYE, 2011 ; ZIANIS, *et al.*, 2003).

3.1.3. Etude comparée de la Mad et des autres approches d'estimation de la biomasse ligneuse

Entre les vieilles méthodes et les nouvelles tentatives technologiques d'estimation de la biomasse des formations végétales tropicales, l'allométrie tente d'optimiser la fidélisation et la justesse des valeurs dendrométriques et de masse.

Nonobstant, l'approche allométrique présente certaines limites. Ces manques justifient les avantages des outils modernes en cours d'implémentation.

3.1.3.1. Forces et faiblesses de la Mad

L'allométrie offre l'atout d'évaluer la biomasse des individus de plantes en entier et non plus celle du seul tronc comme le voulait le cubage. Ainsi, le potentiel ligneux total d'une formation végétale peut se connaître plus précisément et permettre, par conséquent, de décliner et de calibrer un plan de gestion des ressources forestières de manière plus pertinente et plus durable (*MBOW, 2009 p. 69*). Les branches des plantes utilisées par les populations pour le bois de chauffe entrent, par exemple, en ligne de compte. Ainsi, quatre (4) millions de m³ de bois se font prélever chaque année par les ménages du Sénégal afin de satisfaire leur besoins en énergie (*MBAYE, 2009 p. 71*). Ce volume correspond à une « perte de 50000 ha/an des potentiels de la forêt ».

En outre, au regard du rôle destiné à l'Afrique dans l'atténuation du changement climatique, l'allométrie autorise une connaissance plus exacte du stock de carbone séquestré par la biomasse, celle-ci étant mieux évaluée.

Dans son exercice, la Mad peut permettre de faire l'inventaire et l'analyse, au passage, des espèces présentes dans la biodiversité et pas seulement des plantes à grande valeur économique (*MBOW, 2009 p. 65*).

Les inconvénients de la méthode allométrique, notamment dans les savanes « hétérogènes » d'Afrique, portent sur « les choix d'échantillonnage et la mise en pratique des inventaires » (*MBOW, 2009 p. 67*). Le facteur limitant ici constitue souvent la faible densité spatiale de la végétation dont les grands individus (arbres) restent épars ou clairsemés.

L'application de la Mad paraît « extrêmement consommatrice de temps et d'argent et généralement au-dessus des moyens de la plupart des projets » (*BROWN, 2002 p. 1672*).

3.1.3.2. Les approches para-allométriques

En dehors du cubage, on peut citer d'autres méthodes para-allométriques représentées par l'optimalité et la méthode fractale.

On qualifie volontiers ces méthodes d'estimation de la biomasse végétale de « para-allométriques » car cette appellation se base sur leurs propres caractéristiques. Il s'agit de méthode incapable de

déterminer la biomasse totale de l'individu (cubage) ou de moyen dont l'expérimentation, à notre connaissance, ne s'avère pas encore concluante et/ou pratiquée à grande échelle (méthode fractale, l'optimalité).

- Le cubage

L'impertinence du cubage dans l'étude de la biomasse anhydride en vue de l'évaluation de la bioséquestration du carbone a déjà fait l'objet de démonstration (*V. p.32*).

- La méthode fractale

La méthode fractale constitue un emprunt du concept de Strahler utilisé en hydrologie. Il s'agit, *in fine*, de procéder à l'« analyse quantitative de la structure complexe des arbres » en partant de la « segmentation hiérarchique » de ses différentes parties (*MBOW, 2009 p. 67*). Bien que validée, cette technique pêche en précision par rapport à la Mad prisée pour la plus grande exactitude des données obtenues sur les plantes (*MBOW, 2009 p. 67*).

- L'optimalité

L'optimalité se fonde sur plusieurs théories liées à la structure, à la physiologie, aux fonctions des différentes composantes de l'arbre. *LEHTONEN (2005 p. 12)* a largement mené une description et une argumentation de ce concept. Le commentaire ci-après s'inspire de l'auteur.

L'idée principale de l'optimalité dit que « les théories sur les règles de la répartition des hydrates de carbone peuvent être utilisées pour la quantification de la biomasse des arbres ». Pour ce faire, il a fallu élaborer plusieurs théories relatives à la corrélation entre des paramètres de certains constituants de la plante.

Ces suppositions se fondent sur la « théorie du modèle de tuyau » à l'image de la veine par laquelle se transporte la sève de la plante.

Ainsi, la « théorie de l'équilibre fonctionnel » se base sur la « relation racine-pousse ». L'analyse de la biomasse de la plante part de la corrélation (ratio) entre la quantité d'azote assimilée par les racines et la quantité de carbone absorbée par le feuillage.

En outre, on met en avant la thèse selon laquelle la région occupée par la sève dans l'arbre, à une certaine hauteur, devient proportionnelle à la biomasse du feuillage au-delà de cette hauteur.

Enfin, lorsque s'associent aux théories ci-dessus l'influence de la génétique sur l'allométrie des plantes et l'influence de l'âge de celles-ci sur « les proportions relatives de la biomasse des composantes », il apparaît possible de définir les « facteurs d'expansion de la biomasse ». Ces BEF (Biomass Expansion Factors) se présentent sous forme de ratio entre la biomasse et le volume du tronc.

Toutefois, les théories de base de l'optimalité ne se trouvaient qu'à l'état de supposition, comme le soulignait Lehtonen (2005) à l'époque. Jusqu'à l'heure actuelle, on n'a pas encore connaissance de la réussite de l'expérimentation de l'optimalité à grande échelle.

Aujourd'hui, les essais d'alternative semblent se tourner plus vers l'espace avec le recours aux satellites.

3.1.3.3. Les méthodes satellitaires

Le caractère souvent rébarbatif de la collecte des données sur les formations végétales rend le travail de terrain redoutable (MBOW, 2009 p. 67). En plus, d'après TOURE (2002 p. 18), les « stratégies opérationnelles de partage de l'information » (sur les terrains d'étude) demeurent embryonnaires dans les pays en développement.

Cela a alors renforcé le recours aux données satellitaires.

- Ces « approches non destructives » (MBOW, 2009 p. 106), ont servi par exemple, au milieu des années 1990, pour établir une « régression du couvert forestier de 0,6 % par an » et un déboisement annuel de 28.100 ha au Sénégal (DIOP, 1994 p. 58). La détermination de ces dernières valeurs s'effectue grâce à la comparaison d'images de satellite.

- BROWN propose en 2005 un « système imageur multispectral en trois dimensions » pour l'étude des stocks de biomasse anhydride (MBOW, 2009 p. 67).

- D'autres techniques mettant à contribution des données « sensibles au volume de bois » s'utilisent à l'instar du Radar et du Lidar (MBOW, 2009 p. 106). Il s'agit de moyens satellitaires initialement employés dans l'altimétrie topographique. Adaptées en foresterie, ces techniques permettent d'étudier « la structure verticale des formations ligneuses et d'en déduire des stocks de carbone à partir des volumes générés sur les données en trois dimensions » (MBOW, 2009 p. 67). Selon MBOW (2009 p. 67), des valeurs de la hauteur et de la densité de végétation ont ainsi pu s'enregistrer par « Awaya et al., (2004) ; St-Onge et al. (2004) et Proisy (1999) ».

- Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) ou Indice de végétation normalisé, calculé à partir des canaux infrarouge et proche infrarouge s'appuie sur l'estimation de l'activité chlorophyllienne pour analyser le stock de biomasse. Les valeurs de NDVI s'avèrent d'accès facile aux échelles nationale et régionale (TOURE, 2002 p. 18).

Les méthodes satellitaires présentent donc l'avantage d'une relative accessibilité sans compter la possibilité offerte – si les moyens le permettent – de traitement des données de grandes surfaces à la fois (couverture satellitaire).

Cependant, ainsi que le signale MBOW (2009 p. 67), la « lourdeur des opérations de collecte des données (complexes) », la longueur des processus techniques pour aboutir à des résultats, la non-distinction des espèces de plantes au sol constituent les limites des techniques de télédétection.

3.1.3.4. Conclusion de l'étude comparée

En définitive, on peut affirmer que même si certaines insuffisances caractérisent la Mad, les méthodes para-allométriques ou satellitaires ne présentent pas à ce jour assez d'avantages pour la remplacer. L'atout majeur de la Mad reste en effet la précision de ses mesures. Mais sa préférence aux autres procédés suppose qu'on se trouve dans le contexte de pays tropicaux à la végétation souvent faite de savane (éparse) et aux moyens technologiques et financiers limités. Ailleurs, des techniques non destructives se révèlent plus concluantes que la Mad.

L'allométrie en tant qu'approche non destructive à posteriori de l'évaluation de la biomasse s'avère globalisante et totalisante.

Elle apparaît globalisante parce qu'elle permet de connaître la biomasse de toutes les espèces présentes dans une formation (ou association), des plus petites aux plus grandes, et pas seulement des essences à grande envergure ou valeur (économique et/ou esthétique).

La Mad se qualifie de totalisante car elle constitue un moyen d'estimer la biomasse entière de la plante et pas seulement de la partie la plus consistante ; c'est-à-dire le tronc ou la tige.

3.2. Méthodologie appliquée de recueil des données : Méthode allométrique destructive (Mad)

Comme son nom l'indique, la méthode destructive se base d'abord sur un principe destructeur et irréversible pour les plantes (MBOW, 2009 p. 106). Mais cette entreprise fatale donne d'en éviter une autre du moment que, grâce à elle, l'information obtenue sur les échantillons va s'extrapoler à l'ensemble de la végétation étudiée.

Le Protocole de recherche proposé dans le mémoire de Maîtrise tournait autour de la Mad. La méthode destructive a donc servi à recueillir les données dendrométrique et de biomasse traitées dans ce mémoire de Master II (NDOUYE, 2011 p. 101).

La méthode d'acquisition des données de biomasse a adopté deux approches différentes. En effet, la Mad appliquée a varié suivant le traitement des grandes plantes aux allures d'arbre (*Casuarina equisetifolia* de 2009) ou celui des arbustes (*Avicennia africana* et *Rhizophora mangle* de 2009 et de 2010 et *Casuarina equisetifolia* de 2010).

La sélection des individus se base sur un échantillonnage simple.

La démarche appliquée se décrit ainsi :

1. Sélection de 30 individus de hauteurs différentes en concédant le biais de majorer le nombre d'individus à la plus grande hauteur ;
2. récolte des individus sélectionnés en :
 - a. coupant au raz du tronc les arbres (*Casuarina equisetifolia* de 2009).

- b. arrachant les arbustes, leurs racines avec ;
3. débitage des arbres en en séparant les différentes composantes : feuilles, ramilles, tige.
4. pesage à la balance de la biomasse humide (Mh) de chacune des composantes des arbres ainsi que de la biomasse humide des arbustes ;
5. prélèvement des échantillons de biomasse humide de :
 - a. 200 g sur chacune des composantes de l'arbre,
 - b. l'individu entier de l'arbuste ;
6. dessiccation de tous les échantillons de biomasse humide dans une étuve à une température constante de 65 °C pendant une période continue de 72 heures ;
7. détermination, par pesage de la Masse anhydride (Ma) des échantillons suite à leur dessiccation ;

3.3. Présentation des données allométriques de terrain

Les équations de régression allométrique, bien que de plusieurs types, emploient toutes presque les mêmes variables. Il s'agit d'une variable dite « dépendante » ou « expliquée » et d'une autre dite « indépendante » ou « explicative » (*DEGUE-NAMBONA, 2008 p.39 ; MBOW, 2009 p.83*).

La variable expliquée représente la masse anhydride (Ma) de l'individu plante. Elle se symbolise par « y » dans l'équation de régression allométrique.

La variable explicative, aussi appelée « régresseur », correspond à l'un des « paramètres dendrométriques » du sujet (*DEGUE-NAMBONA, 2008 p. 39*). Il s'agit, dans la plus part des cas, du diamètre de l'individu (DBH) ou de la hauteur de sa tige (H) : « x ».

Ainsi, lors de la collecte des données sur le terrain, on a dû prélever des échantillons de biomasse humide et effectuer des mesures de DBH et de H. Les parties de biomasse humide, – après leur séjour dans l'incubateur du laboratoire du CNRF (Centre National de Recherches Forestières) – ont permis, *ex situ*, d'estimer la biomasse anhydride individuelle (par sujet de plante), la Ma_i (*NDOUYE, 2011 p. 113*).

Les espèces étudiées constituent deux types de formation végétale : les filaos et la mangrove. *Casuarina equisetifolia* (CE), de la famille des *Casuarinaceae*, correspond à l'essence du filao tandis qu'*Avicennia africana* (AA) et *Rhizophora mangle* (RM) représentent les plantes de mangrove.

Toutefois, dans la détermination de l'équation de régression allométrique de ces individus – âgés de 2 ans au maximum au moment des mesures –, le choix du paramètre dendrométrique de la H a primé sur celui du DBH pour deux raisons.

D'abord, concernant les *Casuarina*, il apparaissait rare de trouver un sujet de 5 cm de diamètre de DBH requis à l'éligibilité (MBOW, 2009 p. 73). En plus, *Casuarina equisetifolia* est un arbre à croissance rapide au tronc effilé à l'instar des palmiers dans le cas desquels le choix doit se porter sur la H (BROWN, 2002 p. 1673).

Au niveau de la mangrove, il s'avère impossible de considérer le DBH car ces plantes n'avaient pas elles non plus 5 cm de diamètre.

On a recueilli les données de H et de Ma autant pour CE que pour les palétuviers (AA et RM) dans les stations échantillonnées. A l'image du reste des stations, on a nommé celles-ci par pertinence de leur site naturel ou parrain, de leur programme d'exécution, de l'année de leur reboisement ou afforestation, de l'espèce contenue et de leur position latitudinale ou longitudinale (NDOUYE, 2011 p. 86).

Dans chaque station-échantillon, on a choisi 3 individus. Ceux-ci ont subi les mensurations et les pesées de masse conformément à la Mad.

Les stations réaffectées par l'ACCC à Palmarin se regroupent en différentes zones de CATF (Nord, Centre-nord, Centre-sud, et Sud) (V. p. 28).

3.3.1. Les données de Hauteur de la plante (H)

Les mesures sur les sujets se prennent au raz du sol, à la limite inférieure du tronc jusqu'au bout opposé. On procède ainsi pour 3 individus dans l'unique placette de chaque station. La valeur de H pour une station correspond donc à la moyenne des données issues des 3 individus-échantillons.

3.3.1.1. La H de CE

Sur les 16 réaffectées à CE, 10 stations ont subi un échantillonnage dont 5 pour chaque année de reboisement, 2009 et 2010.

Les valeurs obtenues s'affichent dans les *Tableaux 1 et 2*. Les stations se succèdent (de la gauche à droite) conformément à leur disposition Nord/Sud sur le terrain.

Tableau 1

Stations échantillonnées de 2009	NgoACCC09CE1	NgoACCC09CE2	NgoACCC09CE3	NgoACCC09CE5	DiaACCC09CE
HT (m)	5,18	3,78	3,75	4,42	3,75

Hauteur de la tige des individus-échantillons de CE de 2009

Tableau 2

Stations échantillonnées de 2010	NgaACCC10CE1	NgeACCC09&10CE2	NgoACCC10CE1	NgoACCC10CE3	DiaACCC10CE
HT (m)	0,92	1,69	1,05	0,79	0,97

Hauteur de la tige des individus-échantillons de CE de 2010

3.3.1.2. La H d'AA et de RM

Il y a un total de 14 stations réaffectées avec des palétuviers. On en a échantillonné 9. Les stations de 2009 sélectionnées atteignent le nombre de 4 contre 5 stations de 2010. Comme pour *Casuarina*, les stations d'AA et de RM se disposent dans le tableau selon le sens Nord/Sud sur le terrain.

Tableau 3

Stations échantillonnées de 2009	MatACCC09RM2	AkoACCC09RM	SanACCC09RM2	SouACCC09RM
HT (m)	0,71	0,74	0,82	0,81

Hauteur de la tige des individus-échantillons d'AA et de RM de 2009

Tableau 4

Stations échantillonnées de 2010	MatACCC10RM	AkoACCC10RM	SanACCC10RM1	SouACCC10AA	SouACCC10RM
HT (m)	0,57	0,66	0,73	0,7	0,6

Hauteur de la tige des individus-échantillons d'AA et de RM de 2010

3.3.2. Les données de Masse anhydride individuelle (Ma_I)

Contrairement à la H, la Ma_I ne s'estima pas *in situ*. La masse anhydride de l'individu se calcula à partir de la biomasse sèche obtenue après dessiccation des échantillons humides, eux, pesés *in situ*. A l'opposé de la H dont les valeurs se prirent séparément pour les 3 individus d'une même station échantillonnée, les échantillons de biomasse humide des 3 individus-échantillons se mélangèrent *in situ*. De ce fait, on obtient, *in fine*, une seule valeur moyenne de Ma_I par station échantillonnée.

3.3.2.1. La Ma_I de CE

Des échantillons de biomasse humide de 200 g se prélevèrent de chacune des composantes (feuilles, ramilles, tige) de l'individu de 2009. Les sujets de 2010 se détachèrent dans leur entièreté pour servir d'échantillon. Ces portions de biomasse, après dessiccation, ont servi à déterminer Ma_I de CE.

Tableau 5

Stations échantillonnées de 2009	NgoACCC09CE1	NgoACCC09CE2	NgoACCC09CE3	NgoACCC09CE5	DiaACCC09CE
Ma_I (Kg)	10,80	2,43	2,12	2,57	3,13

Masse anhydride individuelle des individus-échantillons de CE de 2009

Tableau 6

Stations échantillonnées de 2010	NgaACCC10CE1	NgeACCC09&10CE2	NgoACCC10CE1	NgoACCC10CE3	DiaACCC10CE
MaI (Kg)	0,020	0,472	0,079	0,016	0,094

Masse anhydride individuelle des individus-échantillons de CE de 2010

3.3.2.2. La Ma_I d'AA et de RM

A l'image de CE de 2010, les palétuviers-échantillons de tout âge ont subi un déterrement et leur Ma_I pesée après séchage.

Tableau 7

Stations échantillonnées de 2009	MatACCC09RM2	AkoACCC09RM	SanACCC09RM2	SouACCC09RM
MaI (Kg)	0,07	0,08	0,11	0,14

Masse anhydride individuelle des individus-échantillons d'AA et de RM de 2009

Tableau 8

Stations échantillonnées de 2010	MatACCC10RM	AkoACCC10RM	SanACCC10RM1	SouACCC10RM	SouACCC10AA
MaI (Kg)	0,02	0,03	0,05	0,03	0,10

Masse anhydride individuelle des individus-échantillons d'AA et de RM de 2010

Le maximum des valeurs de H et de Ma_I s'atteint par les individus (CE ou palétuviers) les plus âgés c'est-à-dire, logiquement, ceux reboisés en 2009.

Concernant *Casuarina equisetifolia*, il se distingue des données élevées de H à NgoACCC09CE1 (5,18 m) ; NgoACCC09CE5 (4,42 m).

Pour les palétuviers, on remarque les hauteurs suivantes : 0,82 m à SanACCC09RM2 et 0,81 m à SouACCC09RM.

La Ma_I la plus considérable se note à NgoACCC09CE1 (10,8 Kg) et à DiaACCC09CE (3,13 Kg). De même, la biomasse des palétuviers la plus importante se note à SanACCC09RM2 (0,11 Kg) et à SouACCC09RM (0,14 Kg).

Comme on le verra plus loin, les remarques faites ci-dessus vont influencer la caractéristique des équations allométriques définies.

DEUXIEME

PARTIE : Approches

allométriques de

détermination du

carbone bioséquestré

IV. DETERMINATION DE LA REGRESSION ALLOMETRIQUE DE LA BIOMASSE EPIGEE

Avant de procéder à l'exposition des équations allométriques élaborées, il paraît opportun de discuter de certains concepts liés au rôle et au genre de modèle de régression à utiliser.

4.1. Qu'est-ce-que la régression allométrique ?

L'objectif de la régression consiste d'abord à chercher l'existence d'éventuelles équations mathématiques qui pourraient représenter le type de relation entre la biomasse d'une plante et les dimensions de celle-ci (dendrométrie) (*DEGUE-NAMBONA, 2008 p. 39*).

Il s'agit en même temps, aussi, de « déterminer les valeurs paramétriques d'une fonction pour un bon ajustement de celles-ci par rapport aux données observées (expérimentales) » (*MBOW, 2009 p. 83*). Autrement dit, c'est la définition des termes, des produits et de la fonction d'une équation mathématique à deux inconnues, l'une dite « régresseur » (H) et l'autre « variable dépendante » (Ma).

Une fois les données de terrain (H et Ma) acquises, elles permettent de définir moult équations de régression : linéaires, exponentielles, logarithmiques, polynomiales (*MBOW, 2009 p. 39*). Ensuite, l'appréciation du type de « lien entre les deux variables », hauteur et biomasse, dépend de l'équation de régression elle-même et des « paramètres d'optimisation » tels que le coefficient de détermination (R^2), le coefficient de corrélation (R) et des résidus du modèle (*MBOW, 2009 p. 83*).

Les R^2 les plus élevés (d'habitude supérieurs à 0,9) indiquent les équations allométriques les plus adéquates à la relation biomasse/mensuration.

C'est le lieu de rappeler que la perspective d'avoir comme modèle de régression une équation allométrique de type linéaire s'écarte d'office. En effet, « la relation entre la biomasse et le diamètre des arbres est une fonction curviligne », donc du genre polynomiale, de puissance, cubique, etc. (*MBOW, 2009 p. 84*). Cette relation biomasse/diamètre ne saurait trop varier de celle de biomasse/hauteur.

Si le procédé de détermination du type de régression adéquate fait l'unanimité chez les scientifiques, le choix de l'origine du modèle allométrique à appliquer au calcul de la biomasse anhydride d'une végétation les divise.

4.2. Quel modèle de régression : « exogène » ou « endogène » ?

La question soulevée ici reste de savoir si les régions ne disposant pas de modèles de régression allométrique de leurs formations végétales devraient en importer (modèle « exogène ») ou en réaliser (modèle « endogène »).

Plusieurs pays du monde, à l'image de ceux de l'Afrique, notamment occidentale, restèrent longtemps sans disposer de modèles allométriques de leurs formations végétales. De ce fait, il survint l'idée de

créer des « modèles génériques proposés par la FAO » (*MBOW, 2009 p. 90*). Ceux-ci s'élaborèrent dans la savane de l'Amérique du Sud et les forêts sèches de l'Inde. Ils s'utilisaient par « plusieurs recherches antérieures » au compte des pays de l'Afrique de l'Ouest (*MBOW, 2009 p. 77*).

La tentation d'une telle démarche vient du fait que les écosystèmes étudiés et les espaces producteurs de modèles génériques subissent des climats similaires.

Toutefois, tel que le signale *MBOW (2009 p. 77)*, même s'ils paraissent similaires, les climats des écosystèmes en question ne s'avèrent « pas identiques » pour autant. *MBOW (2009 p. 78)* réfute ainsi l'idée de l'importation de modèles allométriques et prône l'utilisation de « régressions allométriques natives » aux écosystèmes étudiés. Les raisons d'une telle position se justifient : une meilleure performance des modèles « endogènes », des erreurs générées par les modèles « exogènes » quant à la prédiction de la biomasse.

La prédiction de la biomasse par des modèles d'équation allométrique produits de la FAO a subi un test de la part de *MBOW (2009 p. 76)*.

Pour la même biomasse à évaluer, le chercheur compara la prédiction de la FAO à celle des modèles natifs. La quantité de la même biomasse mesurée de façon expérimentale servit de paramètre témoin.

Il apparaissait en fin de compte une « forte divergence sur les résultats ». En effet, il se pose un problème de surestimation ou de sous-estimation par les modèles de la FAO. Ceux-ci font passer la valeur de biomasse des grands arbres du « simple au double ». Cela pourrait corrompre les estimations d'additionnalité de la séquestration du carbone des projets MDP-forêt (REDD et REDD+).

Par contre, les modèles construits par *MBOW (2009 p. 89)* présentent « moins de biais pour les gros diamètres et prédisent bien les petits sujets ».

Au Sénégal, les difficultés méthodologiques rencontrées lors des inventaires nationaux des GES dans le milieu des années 1990 ont accru la préoccupation pour la création de méthodes endogènes d'estimation de la biomasse (*MBOW, 2009 p. 78*).

4.3. Méthodologie de traitement des données en vue de la construction des droites de régression allométrique

Cette méthodologie procède comme suit :

- Analyse des données dendrométriques et de biomasse recueillies sur le terrain ;
- construction des nuages des points pour chaque génération (2009 et 2010) d'espèce ;
- construction des droites de régression allométrique pour chaque génération d'espèce ;
- établissement de l'ensemble des équations de régression allométrique pour chaque génération d'espèce ;

- identification de l'équation de régression allométrique la plus performante (plus grand R^2) pour chaque génération d'espèce plantée ;
- calcul de la prédiction théorique de la biomasse anhydride avec les équations ainsi élues ;
- test des équations de régression allométrique élues par comparaison de leur prédiction théorique avec le résultat expérimental de la biomasse déjà calculée dans le mémoire de Maîtrise (NDOUYE, 2011) ;
- détermination des masses de carbone correspondant aux biomasses anhydrides trouvées.

4.4. Détermination des droites de régression allométrique d'estimation de la biomasse anhydride épigée de Palmarin

Elle se rendit possible grâce l'emploi des logiciels de 2 logiciels.

Microsoft Office Excel 2010 a révélé les nuages des points des espèces. L'utilisation de *SPSS version 13* a permis la construction des droites de régression allométrique.

On a rentré les données de Ma_I en ordonnées, celles de H en abscisses et les nuages des points et les courbes de régressions obtenus se présentent sur les graphiques.

4.4.1. Présentation des nuages des points et des courbes de tendance à la régression

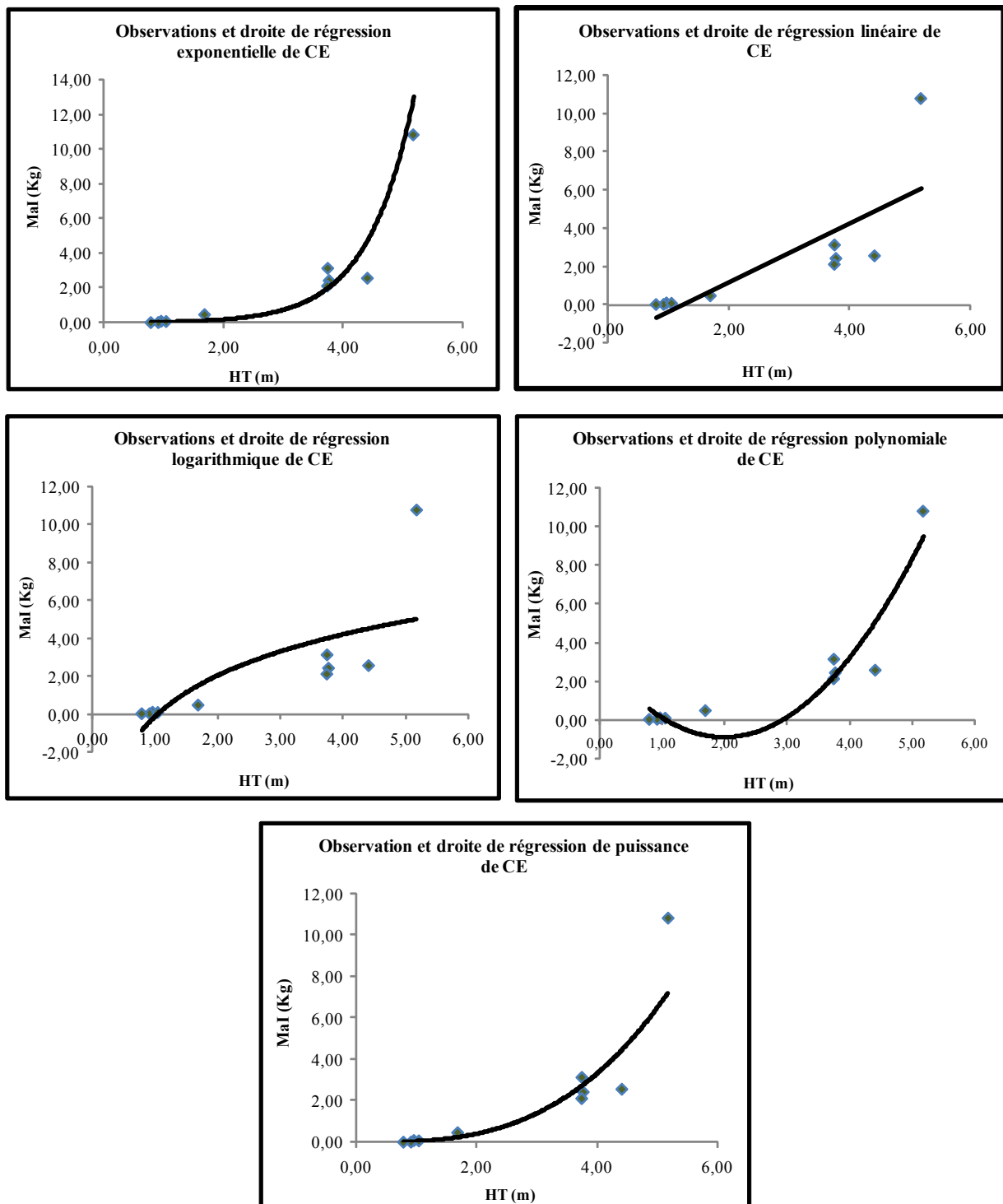
La détermination de la biomasse anhydride (Ma_I) par la hauteur (H) de la plante peut se lire à travers la représentation de ces paramètres dans un graphique du nuage des points. Toutefois, l'allure que peut prendre cette explication de la biomasse par la hauteur apparaît nettement mieux lorsqu'on ajoute sur le nuage des points la courbe de tendance de la régression. L'expression de cette dernière peut devenir exponentielle, linéaire, logarithmique, polynomiale ou de puissance.

4.4.1.1. Nuages des point et courbes de tendance régressive de CE

Les observations concernent l'ensemble des échantillons de 2009 et 2010.

Il se note deux regroupements de points vers la hauteur $H = 1$ m et vers $H = 4$ m. Ces valeurs correspondent aux hauteurs approximative des H des 2 générations *Casuarina equisetifolia*.

On remarque une variation de la forme de la courbe selon le type de régression.

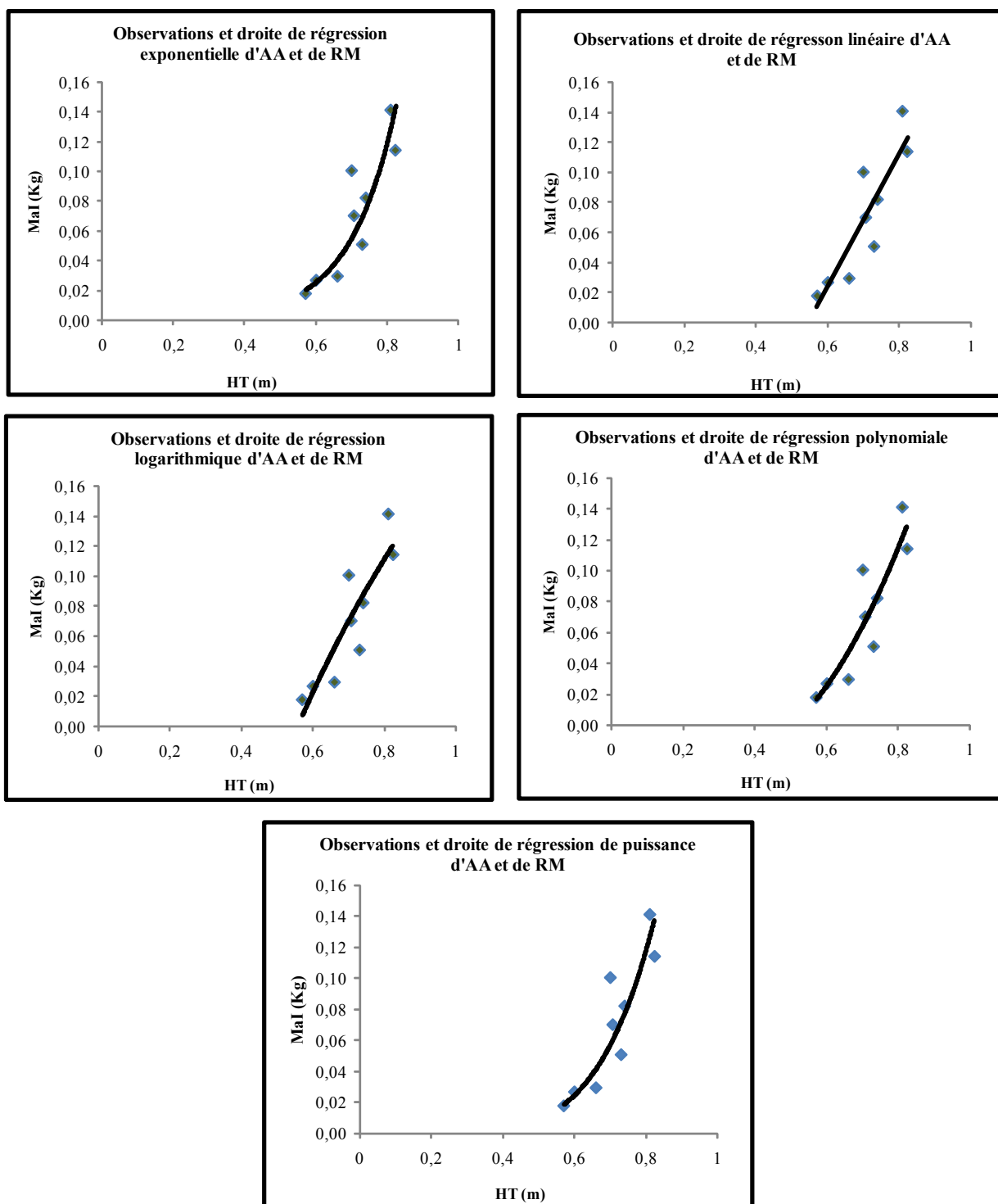


Graphique 7 : Courbes de tendance de la régression allométrique de CE

4.4.1.2. Nuages des points et courbes de tendance régressive d'AA et de RM

Comme pour CE, les courbes de tendance des palétuviers se firent des données des générations 2009 et 2010.

On note une allure presque constante de la courbe notamment pour les régressions curvilignes : exponentielle, polynomiale, de puissance. Il y a donc une faible variation de la détermination de Ma_1 par H des palétuviers.



Graphique 8 : Courbes de tendance de la régression allométrique d'AA et de RM

4.4.2. Présentation des équations de régression allométrique

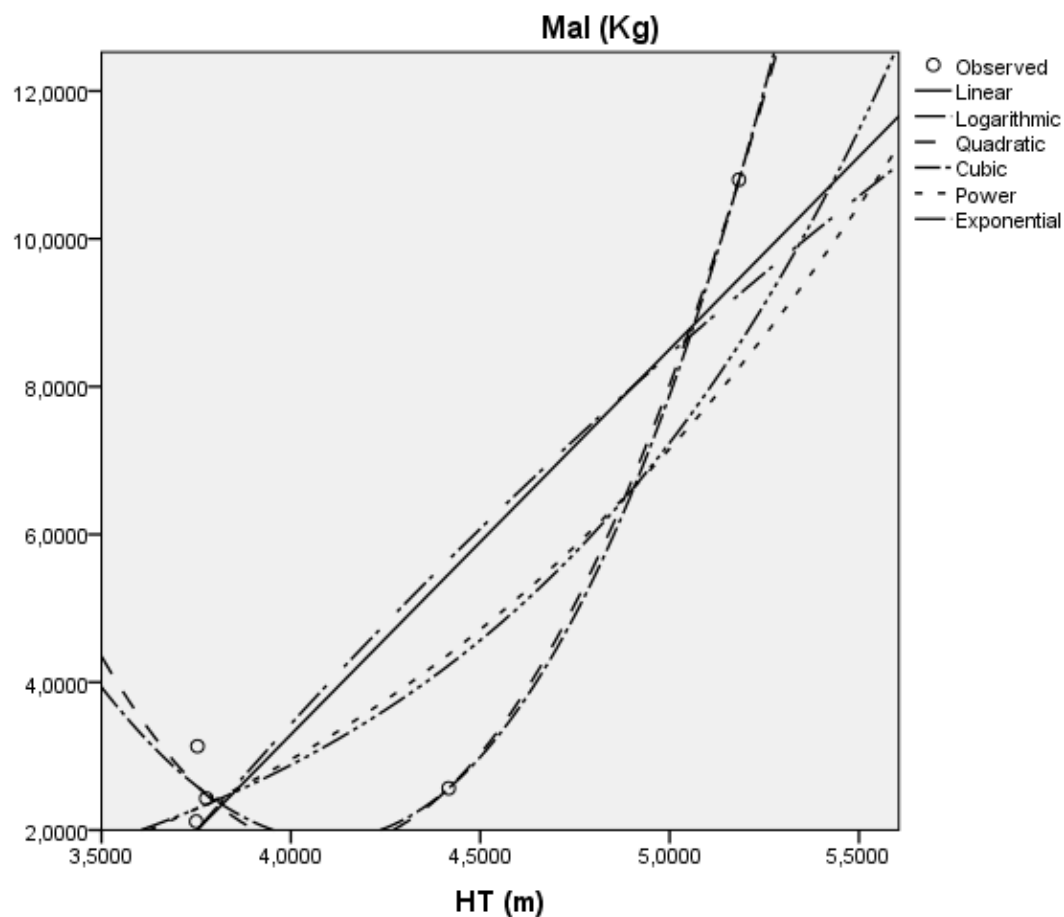
A ce niveau de l'analyse, on va d'abord procéder à une présentation regroupée des différents types de régression par génération d'espèce.

Ensuite, on donnera les équations allométriques de chacun de ces types de régression pour en déterminer les meilleures (les plus performantes) à prédire la biomasse anhydride.

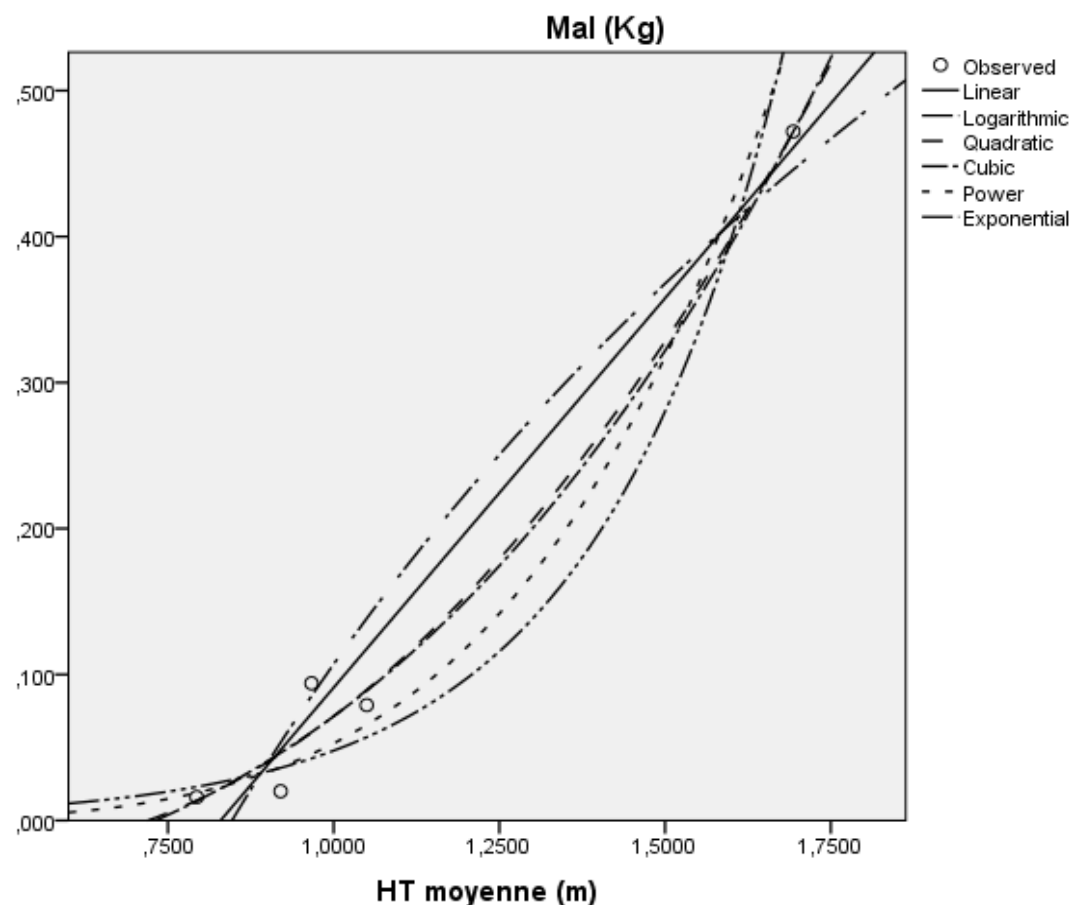
Enfin, les équations retenues (élues) subiront un test de l'estimation de la biomasse.

4.4.2.1. Régressions allométriques de CE

En dehors de la régression linéaire, les types de régression se révèlent curvilignes et présentent des allures relativement distinctes. Ces dernières droites traduisent mieux par leur forme, la relation qu'il y a entre la hauteur et la biomasse des plantes (*MBOW, 2009 p. 84*).



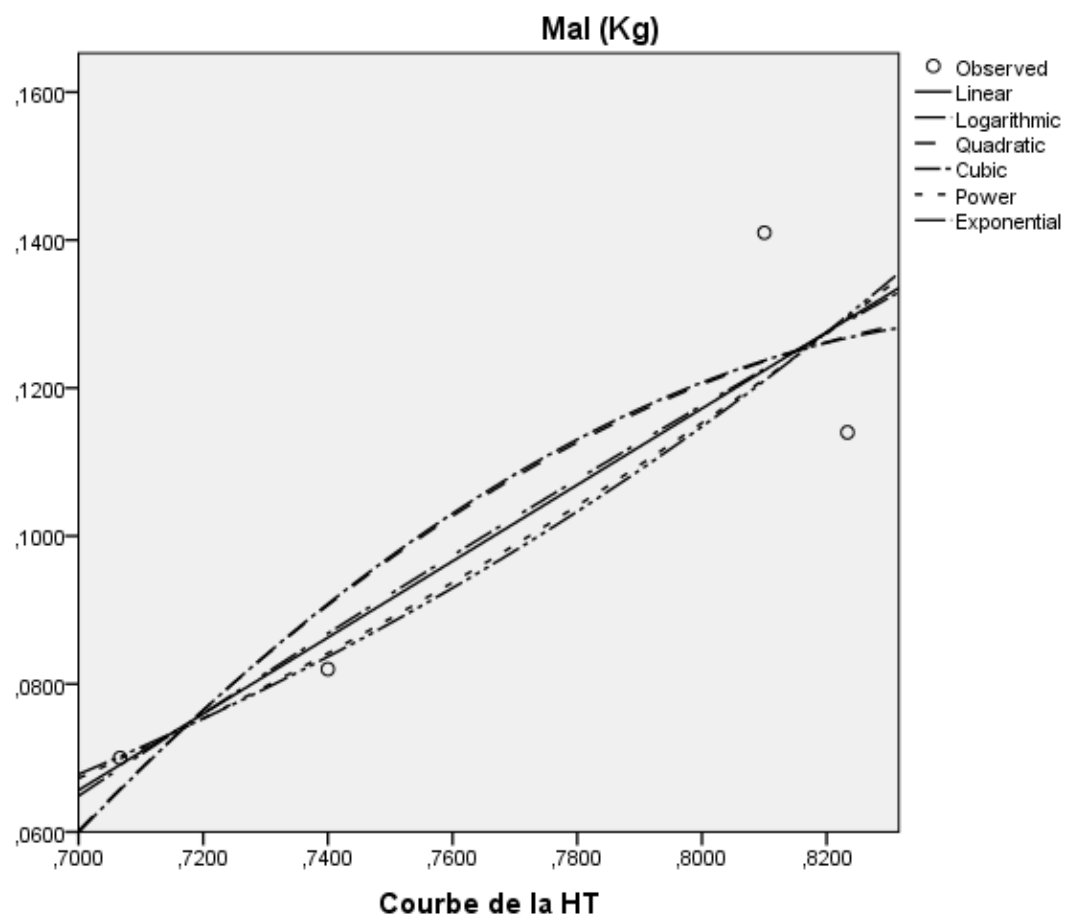
Graphique 9: Prédiction de la biomasse de CE de 2009



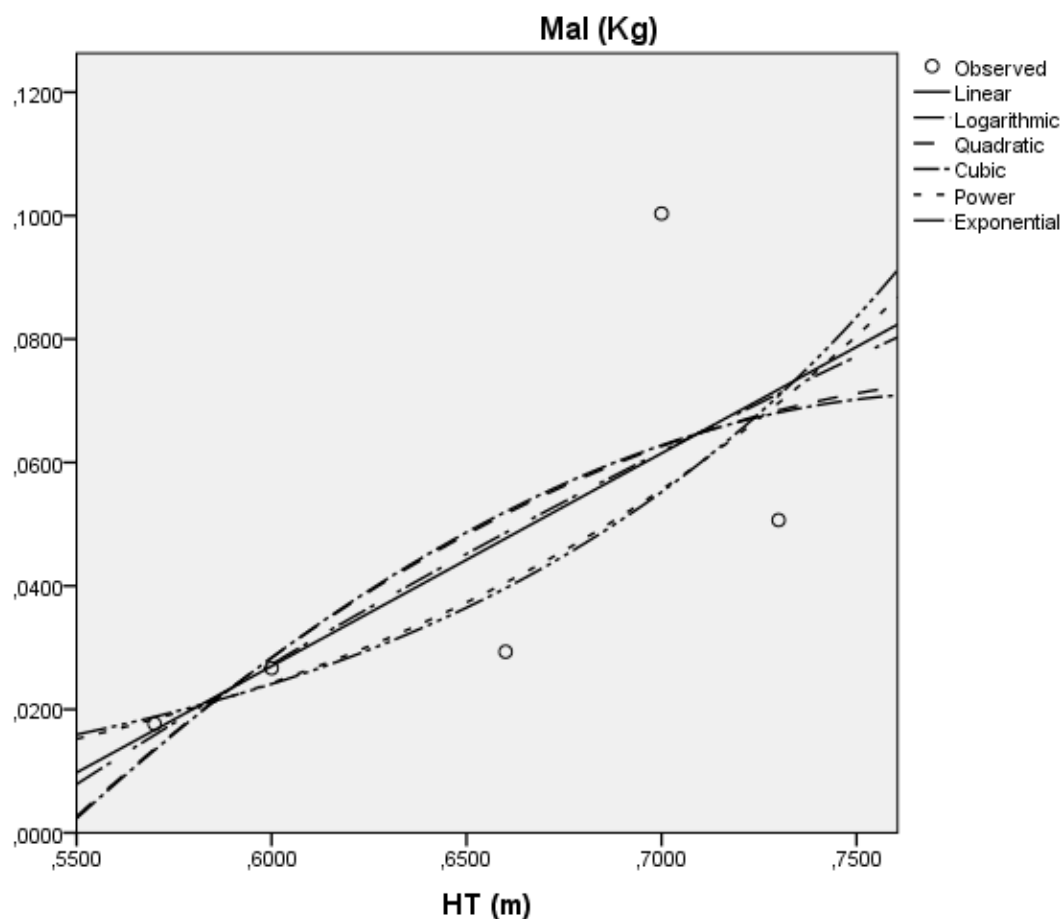
Graphique 10 : Prédiction de la biomasse de CE de 2010

4.4.2.2. Régressions allométriques d'AA et de RM

Ici, les différentes droites se confondent presque. Cela signifie que la détermination de Ma_I par H ne fait pas grandement varier ses différents types d'expression (exponentielle, linéaire, logarithmique, polynomiale, de puissance) (*Graphique 11 & 12*).



Graphique 11 : Prédiction de la biomasse d'AA et de RM de 2009



Graphique 12: Prédiction de la biomasse d'AA et de RM de 2010

4.4.2.3. Equations de régression allométrique

L'équation de régression allométrique constitue la transcription mathématique de l'« explication » de la Ma_i par la H . L'appréciation de l'optimisation de cette explication peut se lire à travers ce qu'on appelle le coefficient de détermination (R^2). Celui-ci varie de 0 à 1. La performance d'une régression s'avère d'autant meilleure que son R^2 se rapproche de 1. Dans les équations allométrique « y » symbolise la Ma_i de l'individu plante et « x » sa H .

La transcription des équations allométrique se réalisa à la fois par *Microsoft Office Excel* et *SPSS 13*. Les valeurs de paramètres des équations données par *Microsoft Office Excel* ont passé l'épreuve de la vérification par les résultats issus de *SPSS 13*.

On relève une concordance parfaite entre les valeurs des 2 logiciels (*Tableau 9 & 10*).

De la gauche vers la droite de chaque tableau se présentent les différents types de fonctions allométriques, les paramètres séparés de *SPSS 13* et les paramètres de *Microsoft Office Excel* intégrés dans leur équation mathématique. On a également donné la valeur de R^2 pour chaque type de fonction. L'équation s'élira la plus performante pour chaque génération d'espèce si son R^2 s'affirme le plus élevé.

- Equations allométriques de CE

Il apparait clairement que le R^2 le plus élevé pour *CE* de 2009 (0,9902) et de 2010 (0,9866) reste celui de la régression polynomiale. Donc, les équations de cette fonction constituent ceux à utiliser pour prédire les biomasses anhydrides respectives des générations de *CE* :

- *CE* de 2009 : $y = 7,5389x^2 - 61,63x + 127,7$
- *CE* de 2010 : $y = 0,3296x^2 - 0,31x + 0,0519$ (Tableau 9 & 10).

Tableau 9

Types de fonction allométrique	Transcription des équations allométriques par SPSS 20					Transcription des équations allométriques par Microsoft Office Excel	
	R^2	Valeur des paramètres de l'équation allométrique				Code Excel : y =	R^2
		Constante	b1	b2	b3		
Puissance	0,7377	0,0121	3,9663			$0,0121x^{3,9673}$	0,7378
Logarithmique	0,7568	-27,656	22,427			$22,438\ln(x) - 27,67$	0,7569
Exponentielle	0,7683	0,0722	0,922			$0,0721e^{0,9218x}$	0,7683 (3)
Linéaire	0,7890	-17,562	5,2134			$5,2159x - 17,572$	0,789 (2)
Polynomiale	0,9902	127,6	-61,60	7,535		$7,5389x^2 - 61,63x + 127,7$	0,9902 (1)
Cubique	0,9902	37,778	0,000	-6,419	1,045		

Equations allométriques exprimant la Ma_1 (Kg) en fonction de la H (m) pour *CE* de 2009

Tableau 10

Types de fonction allométrique	Transcription des équations allométriques par SPSS 20					Transcription des équations allométriques par Microsoft Office Excel	
	R^2	Valeur des paramètres de l'équation allométrique				Code Excel : y =	R^2
		Constante	b1	b2	b3		
Exponentielle	0,834	0,0014	3,5349			$0,0014e^{3,5519x}$	0,830
Puissance	0,869	0,0528	4,4249			$0,0524x^{4,4482}$	0,867
Logarithmique	0,940	0,107	0,6432			$0,6435\ln(x) + 0,107$	0,94 (3)
Linéaire	0,9719	-0,4426	0,5336			$0,5338x - 0,4429$	0,9719 (2)
Polynomiale	0,9868	0,0555	-0,32	0,3318		$0,3296x^2 - 0,31x + 0,0519$	0,9866 (1)
Cubique	0,9868	-0,075	0,052	0,0000	0,095		

Equations allométriques exprimant la Ma_1 (Kg) en fonction de la H (m) pour *CE* de 2010

- Equations allométriques d'*AA* et de *RM*

Les palétuviers présentent d'abord des R^2 partout inférieurs à 0,87 en particulier la génération 2010, d'où une faiblesse généralisée de la performance de la régression en comparaison avec *CE*.

Toutefois, la valeur de R^2 la plus élevée chez les palétuviers se note pour la régression de puissance autant pour la génération 2009 (0,8676) que pour la génération 2010 (0,6964). La régression de puissance servira donc à calculer la biomasse anhydride des générations de palétuviers.

- Palétuviers 2009 : $y = 0,2838x^{4,0372}$
- Palétuviers 2010 : $y = 0,3777x^{5,3724}$ (Tableau 11 & 12).

Tableau 11

Types de fonction allométrique	Transcription des équations allométriques par SPSS 20					Transcription des équations allométriques par Microsoft Office Excel	
	R ²	Valeur des paramètres de l'équation allométrique				Code Excel : y =	R ²
		Constante	b1	b2	b3		
Linéaire	0,8062	-0,2955	0,5159			0,5159x - 0,2955	0,8062
Logarithmique	0,8088	0,2059	0,3954			0,3954ln(x) + 0,2059	0,8088
Polynomiale	0,818	-1,8423	4,5681	-2,6433		-2,6433x ² + 4,5681x - 1,8423	0,818 (3)
Cubique	0,819	-1,392	2,673	0,000	-1,222		
Exponentielle	0,8645	0,0017	5,2669			0,0017e ^{5,2669x}	0,8645 (2)
Puissance	0,8676	0,2838	4,0372			0,2838x ^{4,0372}	0,8676 (1)

Equations allométriques exprimant la Ma₁ (Kg) en fonction de la H (m) pour RM de 2009

Tableau 12

Types de fonction allométrique	Transcription des équations allométriques par SPSS 20					Transcription des équations allométriques par Microsoft Office Excel	
	R ²	Valeur des paramètres de l'équation allométrique				Code Excel : y =	R ²
		Constante	b1	b2	b3		
Linéaire	0,481	-0,18	0,3449			0,3449x - 0,18	0,481
Logarithmique	0,484	0,1415	0,2235			0,2235ln(x) + 0,1415	0,484
Polynomiale	0,4899	-0,6563	1,8254	-1,1406		-1,1406x ² + 1,8254x - 0,6563	0,4899 (3)
Cubique	0,492	-0,526	1,153	0,000	-0,637		
Exponentielle	0,6818	0,0002	8,2882			0,0002e ^{8,2882x}	0,6818 (2)
Puissance	0,6864	0,3777	5,3724			0,3777x ^{5,3724}	0,6864 (1)

Equations allométriques exprimant la Ma₁ (Kg) en fonction de la H (m) pour AA et RM de 2010

4.4.2.4. Tests de prédiction de la biomasse anhydride par les équations allométriques élues les plus performantes

Ce test consiste d'abord à présenter les résultats expérimentaux de biomasse anhydride obtenus après dessiccation de la biomasse humide recueillie sur le terrain.

Ensuite, il faut exposer les résultats théoriques issus du calcul de biomasse anhydride par les équations de droites de régression retenues à cet effet.

Enfin, les résultats expérimentaux et les résultats théoriques de la même masse anhydride totale (Mat) feront l'objet de comparaison pour déterminer les résidus (erreurs) concédés.

• Présentation des résultats expérimentaux de la Mat des espèces plantées à Palmarin

Il s'agit des résultats de la Mat (Masse anhydride totale). La Mat représente la biomasse sèche d'une formation végétale prise au compte d'une génération d'espèce (site) (NDOUYE, 2011 p. 86). La Ma₁ se multiplie par l'effectif d'individus pour avoir la Map (Masse anhydride partielle) de chaque station. Le cumul des Map a donné la Mat.

— La Mat expérimentale de CE

Elle s'obtient en multipliant la Ma_I (connue sur la base des données de terrain) par le l'effectif N de CE en survie dans chaque station. Les résultats proviennent du mémoire de Maîtrise autant pour la génération 2009 que la génération 2010 (*Tableaux 13 & 14*).

Tableau 13

Stations en CE reboisées en 2009	Map (t)
DiaACCC09CE	1,38
NgoACCC09CE1	4,22
NgoACCC09CE2	1,46
NgoACCC09CE3	0,63
NgoACCC09CE4	0,61
NgoACCC09CE5	0,71
Mat (t)	9,01

Biomasse anhydride de CE de 2009

Tableau 14

Stations en CE reboisées en 2010	Map (t)
DiaACCC10CE	0,0048
NgaACCC10CE1	0,0018
NgaACCC10CE2	0,0032
NgeACCC09&10CE1	0,0071
NgeACCC09&10CE2	0,1029
NgeACCC10CE	0,0009
NgoACCC10CE1	0,0062
NgoACCC10CE2	0,0033
NgoACCC10CE3	0,0009
NgoACCC10CE4	0,0049
Mat (t)	0,1360

Biomasse anhydride de CE de 2010

— La Mat expérimentale d'AA et de RM

Elle forme la masse des palétuviers des générations 2009 et 2010 calculée de façon empirique à partir des données de biomasse mesurées (*Tableau 15 & 16*).

Tableau 15

Stations à palétuviers afforestées en 2009	Map (t)
AkoACCC09RM	83,2
MatACCC09RM1	21,3
MatACCC09RM2	5,55
MatACCC09RM3	19,8
SanACCC09RM1	12,2
SanACCC09RM2	6,44
SanACCC09RM3	4,31
SouACCC09RM	6,53
Mat (t)	159,27

Biomasse anhydride de RM de 2009

Tableau 16

Stations à palétuviers afforestées en 2010	Map (t)
AkoACCC10RM	4,58
MatACCC10RM	3,49
SanACCC10RM1	2,52
SanACCC10RM2	6,89
SouACCC10AA	0,59
SouACCC10RM	0,33
Mat (t)	18,40

Biomasse anhydride d'AA et de RM de 2010

- Présentation des résultats théoriques de la Mat obtenus par régression allométrique

La détermination de cette masse anhydride se fait sur la base des équations allométriques, d'où le qualificatif de « théorique ». La Ma_1 (y) s'obtient par calcul après avoir remplacé « x » par la valeur de H dans l'équation de régression élue. On extrapole ensuite Ma_1 pour connaître la Map puis la Mat.

— La Mat théorique de CE

Les équations (polynomiales) de CE élues ont permis, à partir de la valeur moyenne de la H (x), de déduire la Ma_1 théorique. La valeur de la Mat s'élève respectivement pour les générations 2009 et 2010 à 3,895 t et 0,067 t (*Tableau 17*).

Tableau 17

Biomasse théorique	Equations allométriques	HT moyenne (m)	y (Mal) en Kg	N (Ind)	Mat (Kg)	Mat (t)
CE 2009	$y = 7,5389x^2 - 61,63x + 127,7$	x (m) = 4,18	1,809	2153	3895	3,895
CE 2010	$y = 0,3296x^2 - 0,31x + 0,0519$	x (m) = 1,08	0,102	659	66,9	0,067

Estimation de la biomasse théorique de CE

— La Mat théorique d'AA et de RM

La Mat des palétuviers de 2009 s'évalue à 164 t contre 22,0 t pour la biomasse de 2010.

Tableau 18

Biomasse théorique	Equations allométriques	HT moyenne (m)	y (Mal) en Kg	N (Ind)	Mat (Kg)	Mat (t)
palétuviers 2009	$y = 0,2838x^{4,0372}$	x (m) = 0,77	0,099	1654945	163507	164
palétuviers 2010	$y = 0,3777x^{5,3724}$	x (m) = 0,65	0,038	573565	22007	22,0

Estimation de la biomasse théorique de d'AA et de RM

• Analyse de la prédiction de la biomasse anhydride

La critique porte essentiellement sur la valeur du résidu de biomasse, Δ .

— Prédiction de la biomasse de CE

Les remarques à faire au sujet de la biomasse de CE concernent tout d'abord la Ma_I de 2009. La méthode de calcul expérimentale a donné une Ma_I de 4,21 Kg alors que l'équation de régression obtient 1,81 Kg. Cette différence de masse entre les deux Ma_I , expérimentale et théorique, s'amplifie avec la Mat pour se traduire avec des résidus considérables : $\Delta = 5,17$ t.

Ces erreurs concédées ne mettent pour autant pas en cause la justesse de l'équation allométrique car celle-ci se légitime par un R^2 (0,99) très élevé.

Donc, l'explication d'un tel écart dans les résultats doit se trouver au niveau de l'échantillonnage expérimental. En effet, la végétation de CE reboisée, – en dehors des endroits de certaines stations – apparaît relativement clairsemée et le développement des individus reste inégal. Ceci a mené à une grande variation de Ma_I entre individus échantillonnés d'une même placette.

Au niveau de la biomasse de CE de 2010, les résidus s'avèrent minimisés ($\Delta = 0,02$ t) en comparaison avec la génération 2009. Pour cause, il n'y a pas de grand écart entre la Ma_I théorique (0,10 Kg) et la Ma_I expérimentale (0,14 Kg) (Tableau 19).

Tableau 19

Types de biomasse anhydride calculée	Equations allométriques	x (HT moyenne) m	y (Mal) en Kg	N (Ind)	Mat (Kg)	Mat (t)	Δ (t)	R^2
Biomasse théorique de 2009	$y = 7,5389x^2 - 61,63x + 127,7$	4,18	1,81	2153	3895	3,90	5,17	0,9902
Biomasse expérimentale de 2009			4,21		9063	9,06		
Biomasse théorique de 2010	$y = 0,3296x^2 - 0,31x + 0,0519$	1,08	0,10	659	66,9	0,07	0,02	0,9866
Biomasse expérimentale de 2010			0,14		89,7	0,09		

Biomasse théorique et biomasse expérimentale de CE

— Prédiction de la biomasse d'AA et de RM

Chez les palétuviers, les résultats trouvés à travers les deux méthodes de calcul ne s'éloignent pas grandement autant pour 2009 que pour 2010. On a respectivement pour les deux générations une valeur de Δ égale à 4,88 t et à 3,8 t.

Cependant, R^2 se révèle faible en particulier pour la génération 2010 (0,69). Cela témoigne de la jeunesse de ces plantes âgées de moins de 2 ans au moment des mesures de terrain mais également d'une certaine « singularité de l'écosystème mangrove » (DEGUE-NAMBONA, 2008 p. 27).

Tableau 20

Types de biomasse anhydride calculée	Equations allométriques	x (HT moyenne) m	y (Mal) en Kg	N (Ind)	Mat (Kg)	Mat (t)	Δ (t)	R^2
Biomasse théorique de 2009	$y = 0,2838x^{4,0372}$	0,77	0,099	1654945	163507	164	4,88	0,8676
Biomasse expérimentale de 2009			0,102		168391	168		
Biomasse théorique de 2010	$y = 0,3777x^{5,3724}$	0,65	0,038	573565	22007	22,0	3,8	0,6864
Biomasse expérimentale de 2010			0,045		25772	25,8		

Biomasse théorique et biomasse expérimentale d'AA et de RM

— Conclusion sur la prédiction de la biomasse anhydride

De manière générale, la prédiction théorique et celle expérimentale n'entrent pas en contradiction. Le relatif faible écart entre les valeurs issues des deux procédés atteste de la fiabilité de la prédiction théorique, donc de l'utilisation des équations de régression allométrique endogènes.

Cependant, le paramètre d'ajustement, Δ , indique quelques manquements de la régression allométrique et de l'échantillonnage. Cela tient de la jeunesse des plantes mais aussi des biais causés par l'inégalité des individus échantillonnés, en particulier ceux de *Casuarina* 2009.

De manière générale, la faiblesse de R^2 prouve un bas niveau d'ajustement de l'équation allométrique par rapport aux données dendrométrique et de biomasse. R^2 diminue selon qu'on passe des sujets de 2009 à ceux de 2010 et qu'on quitte *CE* pour aller aux palétuviers (*AA* et *RM*) ; donc, au fur-et-à-mesure que les individus deviennent petits. On peut dire alors que R^2 varie en fonction du niveau de croissance des individus.

La distribution spatiale irrégulière et éparse de la végétation de *CE* a rendu l'échantillonnage expérimental simple déficient. En plus, la sélection d'individus par placette nous a semblé réductrice en représentativité de l'échantillon de sorte à ne pas réduire les biais dans le calcul de la biomasse.

Ces faits attestent que les équations allométriques s'avèrent davantage performantes que les individus échantillonnés apparaissent équitablement plus développés (H plus grande).

V. PREDICTION ET PERSPECTIVES DU CARBONE SEQUESTRE PAR LA VEGETATION RESTAUREE A PALMARIN

Pour connaître la masse de carbone bioséquestré, il suffit de multiplier la biomasse par le facteur USAID égal à 0,5 (*NDOUYE, 2011 p. 131*). Les résultats du Carbone total séquestré par génération s'affichent dans le *Tableau 21* et *23*. « Δc » représente les résidus et « z » la masse de carbone séquestrée.

Les analyses et observations faites à propos de l'allométrie de la biomasse peuvent se reconduire pour la masse de carbone séquestré car les deux paramètres restent proportionnels.

Mais la caractérisation du carbone s'avère une étape primordiale pour comprendre certaines propriétés explicatives de son rôle majeur dans le phénomène du réchauffement climatique.

5.1. Caractérisation du carbone

Il s'agit de procéder à une brève définition de l'élément chimique carbone et à la localisation de ses réservoirs. Les extraits ci-après proviennent du précédent mémoire de Maîtrise (*NDOUYE, 2011*).

5.1.1. Définition

Dans le tableau de classification périodique des éléments chimiques dressé par Dmitri Ivanovitch Mendeleïev (1834-1907), le carbone se situe dans la série IVA. Il se trouve en tête de la deuxième colonne du groupe des non-métaux. On le note souvent C_{12}^6 pour signifier en même temps la valeur 12 de sa masse atomique et son numéro atomique 6.

La propriété amphotère du carbone lui donne de pouvoir intégrer un composé chimique de nature acide et à la fois de former avec d'autres éléments une molécule de corps basique (*BERNIER, et al., 1997 p. 1*).

Au niveau de l'écorce terrestre, l'élément carbone demeure faiblement abondant avec seulement 0,09 % de la masse totale ; cela le situe au treizième rang. A titre comparatif, l'oxygène occupe la première place, suivi du silicium (25,7 %) (*BERNARD, 1994 p. 243*).

Il faut signaler en outre que le carbone constitue « l'élément majoritaire du vivant » (*DIOUF, 2011 p. 4*). Autrement-dit, il représente le « constituant essentiel des organismes vivants » (*BERNARD, 1994 p. 241*).

Cependant, le carbone entre en association avec d'autres éléments chimiques pour former des corps présents en divers endroits du globe terrestre. Le carbone constitue, avec l'hydrogène, les éléments à la base de la formation du plus grand nombre de molécules (*BERNARD, 1994 p. 243*).

5.1.2. Réservoirs naturels

Ils représentent les différentes étapes du cycle (général) du carbone. Il s'agit à la fois des réservoirs du cycle court et du cycle long du carbone (*NDOUYE, 2011 p. 11*). Le parcours du carbone s'interrompt le temps d'un séjour variable selon que l'atome se trouve dans l'un ou l'autre réservoir.

D'emblée, il existe des interconnexions entre les maillons (réservoirs) du cycle général du carbone, correspondant ainsi à des échanges de flux de carbone.

On compte parmi les réservoirs de carbone :

- l'Atmosphère, le première de tous les réservoirs (*NDOUYE, 2011 p. 11*) ;
- l'écorce terrestre, les roches et gisements sédimentaires (anthracite, carbonates, charbon, diamant, gaz naturel, graphite, houille, lignite, pétrole, tourbe) ;
- les océans (faune et flore marine, kérogène) et ;
- la biosphère (faune et flore terrestre).

5.2. Prédiction du carbone bioséquestré par *CE*, *AA* et *RM*

Le but de cet exercice consiste à convertir la prédiction de biomasse en celle du carbone.

5.2.1. Prédiction du carbone bioséquestré par *CE*

La prédiction de la bioséquestration s'estime à 1,95 t pour *CE* de 2009 contre 0,03 pour les la génération de 2010. Les valeurs expérimentales respectives s'élèvent à 4,53 t (2009) et 0,04 t (2010) (*Tableau 21*).

Tableau 21

Types de biomasse anhydride calculée	Mat (t)	Δ (t)	Types de carbone calculé	Ct (t)	Δc (t)
Biomasse théorique de 2009	3,90	5,17	Carbone théorique de 2009	1,95	2,58
Biomasse expérimentale de 2009	9,06		Carbone expérimental de 2009	4,53	
Biomasse théorique de 2010	0,07	0,02	Carbone théorique de 2010	0,03	0,01
Biomasse expérimentale de 2010	0,09		Carbone expérimental de 2010	0,04	

Estimation du carbone séquestrée par la biomasse de CE

Puisque le carbone représente une proportion de 0,5 de la biomasse anhydride, l'équation allométrique de la biomasse peut se transcrire au compte du carbone (*Tableau 22*).

Tableau 22

Equations mathématiques déterminant la bioséquestration de CE		
CE 2009	Equation de régression allométrique de la biomasse anhydride	$y = 7,5389.x^2 - 61,63.x + 127,7$
	Equation de détermination du carbone bioséquestré	$z = y \times 0,5 = 0,5 \times (7,5389.x^2 - 61,63.x + 127,7)$
		$z = 0,5 \times (7,5389.x^2 - 61,63.x + 127,7)$

		$z = 3,76945 \cdot x^2 - 30,815 \cdot x + 63,85$
CE 2010	Equation de régression allométrique de la biomasse anhydride	$y = 0,3296 \cdot x^2 - 0,31 \cdot x + 0,0519$
	Equation de détermination du carbone bioséquestré	$z = y \times 0,5 = 0,5 \times (0,3296 \cdot x^2 - 0,31 \cdot x + 0,0519)$
		$z = 0,5 \times (0,3296 \cdot x^2 - 0,31 \cdot x + 0,0519)$
		$z = 0,1648 \cdot x^2 - 0,155 \cdot x + 0,02595$

5.2.2. Prédiction du carbone bioséquestré par AA et RM

Il y a théoriquement 81,8 t séquestrés par les palétuviers de 2009 et 11,0 t par ceux de 2010. Par contre le calcul expérimental donne 84,2 t en 2009 et 12,9 t en 2010.

Tableau 23

Types de biomasse anhydride calculée	Mat (t)	Δ (t)	Types de carbone calculé	Ct (t)	Δc (t)
Biomasse théorique de 2009	164	4,88	Carbone théorique de 2009	81,8	2,44
Biomasse expérimentale de 2009	168		Carbone expérimental de 2009	84,2	
Biomasse théorique de 2010	22	3,77	Carbone théorique de 2010	11,0	1,88
Biomasse expérimentale de 2010	26		Carbone expérimental de 2010	12,9	

Estimation du carbone séquestrée par la biomasse d'AA et de RM

La transcription de l'équation du carbone se trouve dans le *Tableau 24*.

Tableau 24

Equations mathématiques déterminant la bioséquestration d'AA et de RM		
RM 2009	Equation de régression allométrique de la biomasse anhydride	$y = 0,2838 \cdot x^{4,0372}$
	Equation de détermination du carbone bioséquestré	$z = y \times 0,5 = 0,5 \times 0,2838 \cdot x^{4,0372}$
		$z = 0,5 \times 0,2838 \cdot x^{4,0372}$
		$z = 0,1419 \cdot x^{4,0372}$
AA & RM 2010	Equation de régression allométrique de la biomasse anhydride	$y = 0,3777 \cdot x^{5,3724}$
	Equation de détermination du carbone bioséquestré	$z = y \times 0,5 = 0,5 \times 0,3777 \cdot x^{5,3724}$
		$z = 0,5 \times 0,3777 \cdot x^{5,3724}$
		$z = 0,18885 \cdot x^{5,3724}$

Les équations colorées en jaunes correspondent à celles pouvant être utilisées pour connaître directement la quantité de carbone séquestré (z) par un individu des espèces respectives – partageant le même environnement – lorsqu'on en a la H (x).

5.3. Perspectives du crédit carbone

L'idée de création du crédit carbone répond au besoin de donner une valeur aux « déchets », c'est-à-dire les GES, polluants atmosphériques et facteurs du réchauffement climatique.

L'enjeu consiste à faire payer l'émissions des GES de sorte en faire une monnaie (crédit-carbone). Cette nouvelle monnaie circule dans le cadre appelé Marché-carbone (MC) animé par les vendeurs et les acquéreurs de crédits-carbone.

La version actuelle donnée au MC, le Nouveau Mécanisme de Marché (NMM), offre des perspectives beaucoup plus intéressantes encore.

5.3.1. Qu'est-ce que le crédit carbone ?

Jusqu'à ce jour, plusieurs GES ont fait l'objet de recensement : la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), les hydrochloro-fluorocarbones ($CHF_2Cl...$), le méthane (CH_4), l'oxyde nitreux (N_2O), les perfluorocarbones (CF_4 , C_2F_6), etc.

Ces GES provoquent chacun un effet thermique sur l'atmosphère appelé Potentiel de Réchauffement Global (PRG) considéré sur une période de 100 ans¹⁰.

Il se trouve que le GES le plus émis de tous en quantité de masse reste le dioxyde de carbone (CO_2). Le GIEC attribue à ce gaz la moitié de l'ensemble des émissions de GES au monde (*IPCC, 2007*).

Dans sa stratégie d'atténuation des causes des changements climatiques, la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), à travers le protocole de Kyoto, a mis en place des appareils fonctionnels afin de réduire l'émission des GES. Le plus illustre d'entre ces outils constitue le Mécanisme pour un Développement Propre (MDP).

L'idée de la démarche de la CCNUCC demeure l'attribution d'une valeur marchande aux GES afin que les pays et/ou les structures pollueurs payent pour leurs émissions. Or, le GES le plus abondamment diffusé reste le CO_2 . Il s'avère alors, à l'instar du dollar dans le commerce international des biens, pris comme matière de référence.

Un crédit-carbone (valeur commerciale) correspond dès lors à une tonne de CO_2 . Le MDP définit les termes de l'échange de la monnaie.

Donnons deux entités souscrites au marché MDP. L'entité pollueuse (P) fait connaître sa quantité de GES envoyée dans l'atmosphère (Q_P). L'autre entité R travaillant à réduire les émissions évalue sa masse de GES séquestrée, diminuée ou évitée (Q_R). Afin de respecter les engagements à la baisse de ses émissions, P doit acheter à R des crédits-carbone (Q_R) pour compenser sa pollution (Q_P).

¹⁰ LEVET Jérôme, Unités de mesure des gaz à effet de serre, www.riaed.net, 23 février 2007

Toutefois, comme le CO_2 n'est pas le seul GES envoyé dans l'air, il va falloir trouver une équivalence de conversion entre lui et les autres gaz nocifs. On a fait alors appel au PRG des GES en prenant en référence le PRG du CO_2 auquel on applique la valeur 1. Le PRG de tous les autres GES a été donc calculé en rapport avec celui du CO_2 . Exemple, le méthane a un PRG égal à 23. Donc il s'avère 23 fois plus nocif que le CO_2 .

Sur la base du PRG se calculent, par conséquent, les équivalences en masse des GES. On parle, à partir de ce moment, pour l'unité de masse de tout GES de la « *tonne d'équivalent CO_2* » (TECO_2) et cette masse se détermine ainsi :

$$\text{tonne d'équivalent } \text{CO}_2 \text{ du } \text{GES}_x = \text{tonne du } \text{GES}_x \times \text{PRG du } \text{GES}_x .$$

Le PRG du méthane (CH_4) égalant 23, à combien de tonnes d'équivalent CO_2 vont correspondre 5 tonnes de CH_4 ?

Soit M la masse de CH_4 en tonnes et M_{TECO_2} la masse de CH_4 en tonnes d'équivalent CO_2 .

$$M_{\text{TECO}_2} = M \times \text{PRG de } \text{CH}_4$$

$$M_{\text{TECO}_2} = 5 \times 23$$

$$M_{\text{TECO}_2} = 115$$

De cette façon, on peut estimer le nombre de TECO_2 pour tout GES dont le PRG se connaît. Il devient facile de discuter la valeur marchande de tout GES, cette valeur étant ramenée à l'unité qui correspond à 1 TECO_2 , c'est-à-dire le crédit-carbone.

Cependant, il arrive aussi qu'on utilise à la place de la tonne d'équivalent CO_2 la tonne d'équivalent carbone (TEC). Le jeu de conversion entre ces deux unités concerne les masses atomiques.

Le carbone C_{12}^6 compte une masse molaire atomique de 12 grammes par mole ($6,023 \cdot 10^{23}$ atomes) notés « $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ ».

L'oxygène O_{16}^8 détient une masse molaire atomique de $16 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Le CO_2 présente donc une masse molaire moléculaire de : $12 + 2 \times 16 = 44 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Trouver un rapport de conversion entre le CO_2 et le carbone (C) revient à trouver un rapport entre leurs masses molaires. Soit ε ce rapport de conversion et soient M_C et M_{CO_2} les masses molaires respectives du carbone et du dioxyde de carbone :

$$\varepsilon = \frac{M_C}{M_{\text{CO}_2}} = \frac{12}{44} = 0,272$$

$$\varepsilon = 0,272$$

Ceci signifie que pour une masse de carbone donnée, il faut multiplier celle-ci par le quotient 0,272 afin d'obtenir la masse de dioxyde de carbone équivalente. Au contraire, lorsqu'on veut connaître la masse de dioxyde de carbone à partir de celle du carbone, on multiplie la masse de CO_2 par l'inverse du quotient ε , c'est-à-dire

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1}{0,272} = \frac{44}{12} = 3,666$$

Alors, pour convertir les TECO_2 en TEC et vice versa, on pose :

$$\text{TECO}_2 = \text{TEC} \times 3,666$$

$$\text{TEC} = \text{TECO}_2 \times 0,272$$

Tels sont les termes de conversion des GES indispensables aux discussions sur la mitigation et l'atténuation.

5.3.2. Une urgence pour la mitigation et la résilience

Ces dernières années, la grande anomalie observée dans la manifestation des phénomènes climatiques en fait l'un des plus éminents sujets de préoccupation au monde.

Si dans les décennies précédentes le doute sur l'existence des changements climatiques persistait, aujourd'hui la tendance s'inverse.

Comme le remarque *KERR (2013)*¹¹, « la question du climat est en train de réaliser une ascension dans l'agenda des rencontres internationales, à cause du consensus croissant entre scientifiques, industriels et gouvernements que les événements climatiques extrêmes (...) sont hors des fluctuations climatiques régulières... ». On en veut pour preuve les cyclones aux Etats Unis d'Amérique et en Asie du Sud-est, la fonte de la glace en mer Arctique, les inondations de 2011 en Thaïlande, les sécheresses en Inde, aux Etats Unis d'Amérique, etc.

La menace majeure de ces irrégularités climatiques émane de leur intensité et leur fréquence de plus en plus considérables.

Ces phénomènes doivent leur amplification à un réchauffement climatique dû à un effet de serre aggravé par l'augmentation de GES envoyés par la pollution d'origine anthropique dans l'atmosphère.

Ainsi la terre se réchauffe.

Au sortir de la dix-septième Conférence des Parties (COP 17) tenue à Durban en 2011, aucune garantie ne se donna du non franchissement du seuil de 2 °C additionnels à la température moyenne terrestre considérée depuis la période pré-industrielle. (*WORLD BANK, 2012 p. 45*).

L'Agence Internationale de l'Energie et le Groupe de la Banque Mondiale avaient, en prélude à la COP 18 tenue à Doha en 2012, publié un rapport en forme d'alerte sur les effets dévastateurs d'une hausse réaliste de 4°C avant la fin de ce siècle¹².

¹¹ *KERR Thomas (Director, Climate Change Initiatives at the World Economic Forum), Outcomes from the Doha UN Climate Meeting: What You Need to Know for 2013, The Huffington Post, 01/02/2013*

¹² *KERR, Thomas (Director, Climate Change Initiatives at the World Economic Forum), Outcomes from the Doha UN Climate Meeting: What You Need to Know for 2013, The Huffington Post, 01/02/2013*

D'après le *Panel de haut niveau sur le dialogue politique MDP (High-Level Panel on the CDM Policy Dialogue)*, le monde fait face aujourd'hui à trois menaces conjointes. Il s'agit d'un « système climatique planétaire (...) au bord du gouffre », d'une action internationale obsolète des Etats devant des « conséquences potentiellement ingérables » et de l'effondrement des marchés mondiaux de carbone (MDP) appelés pourtant à « faciliter l'atténuation des émissions réelles » (*CDM Policy Dialogue, 2012 p. 2*).

Beaucoup de réponses données par les COP s'adressent aux difficultés rencontrées par la planète aujourd'hui. Leurs portées restent cependant diversement appréciées.

5.3.3. Les actes majeurs des COP pour l'amélioration du marché-carbone

Depuis la première Conférence des Parties (COP 1) organisée à Berlin en 1995, ces rencontres de la CCNUCC tournent essentiellement autour de la mitigation et de l'adaptation aux changements climatiques. Le principal outil mis à la disposition de la CCNUCC pour travailler à ces fins se constitue du MDP. L'objet le plus décisif de cette structure consiste au Marché-carbone.

Le façonnement du MDP, partie intégrante du Protocole de Kyoto en négociation depuis la COP 3 (1997), allait s'achever avec l'entrée en vigueur dudit Protocole en 2005.

A Durban en 2012, les thèmes de discussion portaient sur la mitigation des émissions de GES, l'adaptation au changement climatique, la finance des projets écologiquement vertueux, le développement et le transfert des technologies non ou moins polluantes, la transparence dans les actions entreprises, le renforcement des capacités, etc.

Mais lorsqu'on synthétise les résultats de la *Plateforme de Durban pour une Action Améliorée*, on se retrouve avec 3 points essentiels, à savoir :

- L'aval donné au prolongement du PK avec une deuxième période d'engagement dont la promesse de l'adoption se fit pour la COP 18 ;
- la création d'un Fond Vert pour le Climat afin de viabiliser les projets pro-climat dans les PED ;
- l'accord de principe donné au lancement d'une feuille de route en direction d'un texte légal international sur le climat vers 2015 (*WORLD BANK, 2012 p. 45*).

Cependant, les décisions les plus progressistes de Durban ont concerné la poursuite de la réforme du MDP et le développement du Nouveau Mécanisme de Marché (NMM) (*WORLD BANK, 2012 p. 46*).

Une année après la COP 17, le rendez-vous de Doha va consolider certains acquis de Durban. La COP 18 accueillie par la capitale du Qatar du 26 novembre au 7 décembre 2012 a réuni 190 pays signataires de la CCNUCC sur les 192 membres de l'ONU.

Même si les « accomplissements étaient modestes »¹³ à Doha, une deuxième période d'engagement aux objectifs de réduction et de limitation des émissions de GES du Protocole de Kyoto s'acquit. Elle va de 2013 à 2020. La première période, elle, s'arrêtait à 2012.

Ensuite, on tomba d'accord sur l'idée que les négociations devaient évoluer vers « un instrument légalement contraignant qui requerrait les actions de toutes les parties ». Le nouvel accord devrait s'entériner avant 2015 et avoir force de loi en 2020.

Enfin, l'avancée majeure de Doha consiste en la proposition d'une progression vers un forum de négociation inclusif de toutes les parties et ce, de manière égale. Dans ce forum, cesserait la considération des « anciennes différences entre pays développés et pays en voie de développement »¹⁴.

Il faut dire que la construction d'un cadre d'action pour la mitigation et l'adaptation importe beaucoup aux Etats de la CCNUCC. Cela se voit à travers l'intérêt particulier porté sur le MDP.

Le *Panel de haut niveau sur le dialogue politique MDP* se mit sur pied à Durban en 2011. Son lancement se fit conjointement par la Présidence du Conseil exécutif du MDP et la Secrétaire exécutive de la CCNUCC. Parmi les rôles du *Panel de haut niveau sur le dialogue politique MDP*, on compte la formulation de « recommandations sur la meilleure façon de positionner le MDP pour répondre aux opportunités et défis futurs » (*CDM Policy Dialogue*, 2012).

Parallèlement, la CCNUCC s'associe à certains organismes ou bénéficie de leur concours à sa lutte contre les effets du changement climatique. Un symbole de cette collaboration se matérialisa lorsque, à Doha, le Forum Economique Mondial signait le 6 décembre 2012 un partenariat avec la CCNUCC afin de « présenter des solutions de financement innovatrices pour faire face au changement climatique »¹⁵. Il naquit alors le *Mouvement pour un Pilier de Financement du Changement Innovateur* qui émettra son premier appel à projet en avril 2013.

Malgré les efforts fournis pour sa construction, le MDP a quelque peu subi un affaiblissement causé par le désengagement ou le non engagement de certains Etats gros pollueurs à l'instar des Etats-Unis d'Amérique, de la Chine, du Canada.

Mais plus encore, la crise économique de 2008 a fortement atteint le développement du MDP (*WORLD BANK*, 2012).

En outre, une difficulté supplémentaire affecte l'expérience des projets MDP à travers les « disparités dans les préférences et priorités nationales, jetant une incertitude autour du chemin vers un accord

¹³ KERR, Thomas (Director, Climate Change Initiatives at the World Economic Forum), *Outcomes from the Doha UN Climate Meeting: What You Need to Know for 2013*, The Huffington Post, 01/02/2013

¹⁴ KERR, Thomas (Director, Climate Change Initiatives at the World Economic Forum), *Outcomes from the Doha UN Climate Meeting: What You Need to Know for 2013*, The Huffington Post, 01/02/2013

¹⁵ KERR, Thomas (Director, Climate Change Initiatives at the World Economic Forum), *Outcomes from the Doha UN Climate Meeting: What You Need to Know for 2013*, The Huffington Post, 01/02/2013

international » prévu pour 2020 (*WORLD BANK, 2012 p. 48*). Cette situation, ajoutée au cadre réduit de l'espace et des perspectives – suite au retrait de plusieurs pays – de la seconde période d'engagement du PK, a contribué à la chute en spirale des prix du carbone que même la COP de Durban n'a pas pu renverser (*WORLD BANK, 2012 p. 48*).

Après Doha, si on considère les défis climatiques actuels à côtés des « faibles » progrès réalisés dans les accords, on peut admettre que le bilan apparaît « décevant »¹⁶. Des ambitions tout aussi petites n'ont permis d'avoir « aucune feuille de route concrète » pour l'horizon 2015¹⁷.

Toutefois, l'insuffisance des marchés-carbone n'enlève rien au fait qu'ils restent des « instruments essentiels de la lutte contre le changement climatique » (*CDM Policy Dialogue, 2012 p. 2*). Au contraire, ils permettent aux Etats de parvenir à leurs objectifs de réduction des émissions de GES et de manière flexible. D'autre part, les marchés-carbone assurent une amélioration des rapports coût-efficacité des activités d'atténuation.

Au cours de la décennie passée, on a réalisé la réduction de 1 milliard de tonnes de GES. Cela se traduit par 3,6 milliards de dollars (\$) d'économie pour les pays développés et 215 milliards \$ d'investissement qui ont dopé la croissance et la réduction de la pauvreté dans les pays en voie de développement¹⁸.

De façon plus détaillée, les résultats finaux des COP 17 et 18 révèlent une complexité plus grande encore de la réalité du marché-carbone et de ses facteurs conditionnels.

5.3.4. Les enjeux et décisions stratégiques des COP à l'amélioration du marché-carbone

Les décisions discutées ici vont concerner les MDP, le NMM, le REDD+ et les autres dispositions techniques des accords conclus.

a. Le MDP

Les grandes réformes du MDP se réalisèrent à Durban en 2011. Elles touchent essentiellement au fonctionnement du MDP, à la méthodologie d'évaluation des projets et à la séquestration du carbone.

- Le *Panel de haut niveau sur le dialogue politique MDP* a connu son lancement par le *Conseil exécutif du MDP (CDM Executive Board)* lors de la COP 17 (*WORLD BANK, 2012 p. 47*). Il s'agit d'un groupe chargé de « conduire le Dialogue de politique générale sur le MDP » (*CDM Policy Dialogue, 2012*). Il se compose de 11 experts indépendants de haut niveau choisis de façon à prendre en compte les « différentes expertises et régions » du monde. Le Panel intègre dans ses

¹⁶ WWF, *Doha : à peine mieux que rien*, <http://www.wwf.fr/>, 12/12/2012)

¹⁷ WWF, *Doha : à peine mieux que rien*, <http://www.wwf.fr/>, 12/12/2012)

rapports les résultats de ses recherches propres, le compte-rendu de ses consultations avec les Parties de même que ses conclusions.

- Du point de vue technique, on a franchi une étape dans l'approche des projets MDP avec l'accomplissement du standard de matérialité ("*materiality standard*") (*WORLD BANK, 2012 p. 46*). Il se note de grands progrès de la *standardisation* et de la *rationalisation des procédures administratives* des projets. Ces concepts relatent des décisions de réforme du MDP adoptées à la COP 16 à Cancun en 2010.

— La *standardisation* correspond au fait de « remplacer les besoins pour l'analyse individuelle des projets en utilisant des valeurs pré-approuvées ou des hypothèses qui sont estimées applicables à une classe de projets » (*WORLD BANK, 2012 p. 47*). Le but de cette démarche consiste à favoriser l'efficacité et l'utilisation des effets multiplicateurs dans l'évaluation des projets en remplaçant l'analyse subjective par des critères d'application par défaut. Les objectifs atteints par rapport à ce procédé concernent les points suivants :

- i. les règles sur l'additionnalité à l'échelle micro, qui permettent d'établir des listes effectives pour déterminer si les projets s'avèrent additionnels ;

- ii. le réseau de la CCNUCC pour les bases par secteur spécifique, qui fait référence à la standardisation des facteurs d'émission et de l'additionnalité de base ;

- iii. les règles sur la demande supprimée, qui permettent aux pays dotés d'une demande supprimée de définir une base utilisant des taux de consommation ou de production prédits plutôt que de s'appuyer sur des données historiques (*WORLD BANK, 2012 p. 47*).

Une évaluation de toutes les méthodologies est en train d'être menée par le Secrétariat de la CCNUCC afin de voir les éléments passibles de standardisation. L'extension du réseau à base standardisée doit également intégrer les projets portant sur le transport et la foresterie.

— La *rationalisation des procédures administratives* : deux exemples traduisent bien ce concept :

- ✓ la réunification de deux procédures pour mener des changements post-enregistrement sur un projet MDP. Il s'agit des déviations par rapport au plan de suivi initial d'une part et des changements de la conception du projet d'autre part. Ces deux actes font l'objet d'approbation en une seule étape devenue effective sur l'adoption de la nouvelle procédure de cycle de projet. Ceci permet une économie de temps et des coûts de transaction ;

- ✓ l'introduction des systèmes de contrôle basés sur le risque (...). (*WORLD BANK, 2012 p. 47*).

- Aux pays d'Afrique et ceux détenteurs de grandes formations forestières, Durban apporte une aubaine sans précédent. En effet, les Parties (de la CCNUCC) avaient enfin

reconnu la capture et le stockage du carbone comme une activité de projet MDP éligible. L'occasion se présente de renforcer la pratique de la Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts (REDD) qui permet par ailleurs la production de crédits carbone.

Ainsi, la rencontre de Durban a montré l'intérêt incessant porté à l'amélioration de l'effectivité et de l'efficacité du MDP. On vise notamment l'élargissement de l'échelle (porté) des projets ainsi que l'augmentation de leur proximité vis-à-vis des populations bénéficiaires. Pour ce faire, il faut la mise en place des bases standardisées, des Programmes d'Activités (PdA) dits *PoA (Programme of Activities)* et des approches d'additionnalité simplifiées.

Une remarque doit aussi se faire sur la détermination des participants à la COP 17 à assurer la poursuite des réformes apportées lors de la COP 18 à Doha. Pour cause, le travail actuel sur la *standardisation* « pourrait préparer le terrain à plus d'améliorations à longue portée sur les PdA tels que le cycle de projet destiné aux projets autonomes »

Les décisions ci-dessus vont avoir des impacts visibles sur la construction du Nouveau Mécanisme de Marché.

b. Le NMM

L'ensemble des commentaires suivants s'inspirent du rapport de la Banque Mondiale sur *L'état et les tendances du marché-carbone 2012 (WORLD BANK, 2012)*. L'accent se porte sur les tendances du marché de la première période d'engagement du PK, sur les résultats de Durban et sur l'avenir du Nouveau Marché (NM) de carbone.

Les termes pré-2013 et post-2012 correspondent respectivement à la première (2008 – 2012) et à la deuxième (2013 – 2020) périodes d'engagement de réduction des GES du PK.

- Les tendances du marché-carbone MDP pré-2013

La première période d'engagement (pré-2013) a vu, dès son entame en 2008, s'abattre sur le système économique de plusieurs pays développés (PD) une crise réputée la plus grave depuis celle des années 1930. Des dégâts survinrent aux plans économique, social et politique dans plusieurs Etats du monde. Alors, les objectifs de réduction et de limitation des émissions de GES ne constituaient plus une priorité.

Plusieurs contrats et transactions des crédits carbone ont donc vu leur validation subir une annulation ou un repoussement à une plus longue échéance. Cette situation a lourdement affecté le marché-carbone et ce, jusqu'aujourd'hui.

Le marché du carbone MDP pré-2013 a connu une chute année par année de 27 % des Réductions d'Emission Certifiée (REC) passées sous contrat. Cette donne a prévalu jusqu'en 2011 pour ne laisser finalement que 91 millions (M) de tonnes d'équivalent CO₂ (TECO₂) aux transactions. Rapportés en

termes d'argent, la baisse des échanges de crédits-carbone équivaut à une diminution de 32 % de la « la valeur totale du marché primaire MDP » (p. 48) ; c'est-à-dire de la pré-2013. Ceci explique la réduction de la valeur du marché-carbone à seulement 990 M de \$ en 2011 (Tableau 25). De ce fait, le prix moyen de l'ensemble des REC contractées en 2011 descendit à 10,9 \$ Etats-Unis (US)/t alors qu'il se chiffrait à 11,8 \$US/t en 2010.

Tableau 25 : Volumes et valeurs de REC en transaction entre 2010 et 2011 dans le marché du carbone MDP

	2010		2011	
	Volume (MtCO ₂ e)	Value (US\$ million)	Volume (MtCO ₂ e)	Value (US\$ million)
Pre-2013	124	1,458	91	990
Post-2012	100	1,217	173	1,990
Total	224	2,675	263	2,980

Source: World Bank

Table 3:

Volumes and value for CER transactions in the primary market, 2010-2011¹²²

Les COP de 2011 et de 2012 vont essayer de corriger la mauvaise posture dans laquelle se trouve le marché-carbone primaire.

- Les prédispositions apportées par la COP

Le lancement de sa construction en 2010 par la COP 16 à Cancun se fondait sur plusieurs objectifs assignés au NMM. Celui-ci devait permettre de :

- « stimuler la mitigation à travers de larges segments de l'économie (...) ;
- sauvegarder l'intégrité environnementale ;
- assurer une nette réduction et/ou un évitement des GES dans le monde ;
- aider les pays développés à atteindre leurs objectifs de mitigation et ;
- assurer une bonne gouvernance de même qu'un fonctionnement et une

régulation de marchés robustes ».

Tels forment les éléments d'appui des gouvernements nationaux pour démontrer l'existence dans leurs pays d'un consensus global vers des initiatives régionales, nationales et locales. Cette convergence aide à aborder le changement climatique même dans le cadre actuel où le réseau régulateur global du marché-carbone ne se trouve pas encore clairement défini (p. 48).

Toutefois, il faut rappeler la décision majeure faite à Durban de confier le développement du NMM à la CCNUCC. Ceci a permis de valider l'approbation des « approches variées ». Cette dernière intègre des opportunités d'accroître l'effectivité des prix à travers leur test dans le marché et d'encourager les actions de mitigation. En outre, l'initiative de diversifier les démarches présente plusieurs atouts :

- « un réseau pour le traitement des ~~approches variées~~ », qui est compris comme couvrant des approches non basées sur le marché telles que des programmes créditant des GES développés à l'extérieur de la CCNUCC ; et

ii. l'établissement d'un Nouveau Mécanisme de Marché (NMM) opérant sous la direction et l'autorité de la Conférence des Parties. »

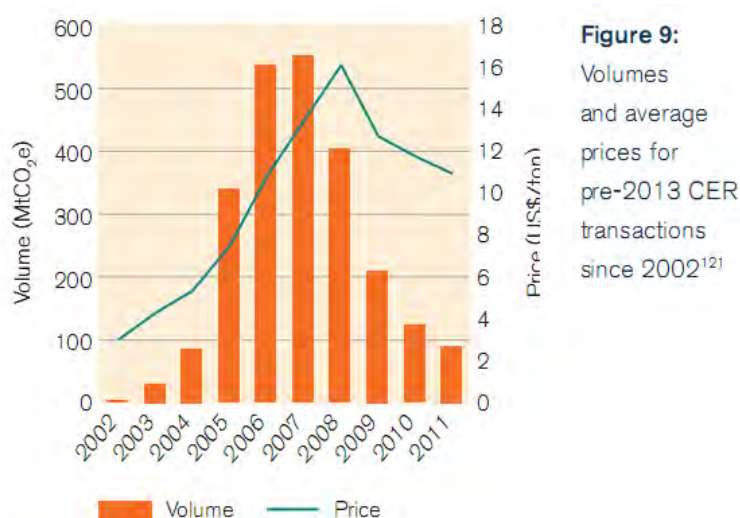
En définitive, Durban offre l'occasion à la réalisation d'un plus large étalage d'actions favorables au climat et basées sur le marché (p. 48). Ces actions pourraient se créditer à l'avenir soit à travers le NMM, l'intégration des actions nationales au sein d'autres schémas nationaux ou régionaux et/ou en divisant les moyens disponibles pour créditer d'autres activités sectorielles.

A partir de ce point de vue, l'avenir du NMM s'annonce prometteur dans la période post-2012.

- Les perspectives du NMM dans la post-2012

La chute de la valeur du marché-carbone dans la pré-2013 (*Graphique 13*) continue de fléchir les prix moyens des transactions jusque dans la deuxième période d'engagement du PK (2013 – 2020).

Hormis les effets de la crise économique de 2008, l'acquisition des portefeuilles de projet à des prix sous-évalués (avantageux pour les acquéreurs) dans le marché primaire (pré-2013) a empêché l'investissement dans de nouveaux projets (p. 50). Ceci a constitué un facteur supplémentaire de la baisse des échanges des REC.



Source: World Bank

Graphique 13 : Volumes et valeurs des REC en transaction durant la pré-2013 dans le marché du carbone MDP

Cette situation délicate du marché primaire MDP avait provoqué le retard de l'« effectivité de la décision sur la deuxième période d'engagement du PK » (p. 46). Le blocage se fit sur le transfert des Unités de Quantité Attribué (aux parties) (UQA) de la première vers la deuxième période d'engagement. Cette question au fort potentiel de réduire la dimension des ambitions fixées à Durban se vit finalement inscrite à l'agenda de la COP 18 de Doha.

Nonobstant, une autre réalité augure d'un meilleur état du NMM dans la post-2012.

En effet, après la baisse constatée du prix des REC jusqu'à la fin de la première période d'engagement, la deuxième période débute avec une augmentation des contrats signés. Ainsi, en 2011, les « volumes contractés ont monté jusqu'à 173 millions de TECO₂ (MTECO₂), égalant 63 % de hausse année par année dans la valeur de marché » (p. 49). Cette évolution positive a donné une valeur de près de 2 milliards de \$US au marché post-2012.

De toutes les façons, vue la faible envergure de la pré-2013 (4 ans), ses répercussions sur la post-2012 (7 ans au plus) doivent s'envisager de manière plus restrictive. Alors, une « analyse séparée » des deux périodes paraît nécessaire pour mieux appréhender les perspectives de la deuxième période d'engagement du PK (p. 48).

Mieux, on assiste aujourd'hui à une poursuite de la consolidation du marché-carbone avec l'achat de plusieurs sociétés « amies » du climat. « Vitol » acquit totalement la « Carbon Resource Management » en 2011 et « Bunge Limited » s'accapare la « Climate Change Capital » en février 2012.

c. La REDD+

La REDD constitue un acronyme pour “*Reducing Emissions from Deforestation and forest Degradation*”, soit en français la *Réduction des Emissions liées à la Déforestation et à la Dégradation des forêts*. Cette idée a commencé à prendre forme depuis la première COP en 1995 à Berlin.

Mais la REDD, telle que connue aujourd'hui, a inauguré son lancement en 2008 grâce aux accords de la COP de Bali. La REDD se fixe pour mission la lutte contre le réchauffement climatique à travers la réduction des GES issus de la destruction et de la dégradation des forêts.

La même année de 2008, le *Programme des Nations Unies pour le Développement* (PNUD), le *Programme des Nations Unies pour l'environnement* (PNUE) et l'*Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture* (FAO) créent conjointement l'« UN-REDD Programme » (Programme des Nations-Unies – REDD).

Aujourd'hui la REDD+ doit remplacer la REDD dans la deuxième période d'engagement du PK (post-2012). La REDD+ conserve les principaux enjeux de la REDD mais s'en trouve augmentée par des ambitions beaucoup plus grandes. On note entre autres objectifs de la REDD+ :

- l'intégration des programmes REDD+ aux stratégies nationales de développement déjà existants ;
- la participation des populations indigènes à la conception, au suivi et à l'évaluation des programmes REDD+ nationaux ;

- la répartition équitable des bénéfices des REDD+ à l'ensemble des participants à la gestion forestière ;
- l'application d'une méthode adéquate de Mesure – Suivi – Vérification ou *Measurement Reporting and Verification (MRV)* de la masse de carbone séquestrée.

A Durban, l'autorisation du financement des programmes REDD+ par les secteurs privé et public a reçu l'accord des Parties. Cette décision comprend également la perspective de développement d'« approches à base de marché » dans un futur proche.

Les modalités de soumission des « niveaux de référence »¹⁹ aux autorités de la REDD+ sur l'état de la dégradation de la végétation des pays ont reçu l'acceptation des Parties. La transmission de cette information aux instances internationales doit précéder l'octroi d'un éventuel financement de projets nationaux (*WORLD BANK, 2012 p. 46*).

Mais c'est à la COP de Doha que se formule pour la « première fois, une proposition technique qui liait de manière cohérente les niveaux de références aux systèmes de Mesure, Suivi et Vérification »²⁰ des REDD+. La réduction des émissions de GES connue grâce aux MRV pourra dès lors s'estimer en tonnes d'équivalent dioxyde de carbone (TECO₂) tout comme pour les réductions dans le transport et l'énergie. Les réductions dues aux REDD+ s'échangeront avec des crédits-carbone²¹.

Il y a lieu de souligner malgré tout la difficulté survenue autour de l'adoption du texte sur les REDD+ à Doha. Elle témoigne de la lenteur de la prise de décision dans beaucoup de domaines à mêmes d'accélérer la résilience et l'atténuation face au changement climatique.

On a assisté, en effet, à une confrontation entre la Norvège et le Brésil, respectivement représentants du groupe des pays développés et de celui des pays en voie de développement. Le point de désaccord concernait l'étape « Vérification » de la MRV.

La Norvège déclarait « le niveau d'exigence des normes permettant de vérifier les réductions d'émissions » loin de la satisfaction requise. On réalise d'autant plus aisément cette préoccupation que les quantités de TECO₂ de GES réduits donnent droit de paiement par les pays développés.

La réplique du Brésil indiquait l'absence d'application par les PD sur eux-mêmes des niveaux d'exigence de vérification réclamés aux PED.

¹⁹ Niveau de référence : taux de déforestation servant de référence pour calculer la déforestation évitée par la mise en œuvre d'une stratégie REDD+ à l'échelle d'un pays. (WWF, http://www.wwf.fr/s-informer/actualites/cop-18-doha-a-peine-mieux-que-rien#_ftn112, article du 12/12/2012)

²⁰ WWF, *Doha : à peine mieux que rien*, <http://www.wwf.fr/>, 12/12/2012)

²¹ WWF, *Doha : à peine mieux que rien*, <http://www.wwf.fr/>, 12/12/2012)

Ainsi, la décision sur l'effectivité de l'application de la MRV, donc de la REDD+ a été « repoussée au prochain meeting technique prévu à Bonn en juin 2013 »²².

d. Les autres prédispositions de la COP

Ces mesures concernent une suite de décisions dont la COP 16 de Cancun fit l'initiation en 2010. Il s'agit essentiellement d'instruments destinés à aider les pays les moins développés à acquérir des moyens de lutte pour la mitigation et l'adaptation.

Après trois ans de négociation, les pays signataires de la CCNUCC mettaient enfin sur pied un réseau pour l'adaptation au changement climatique lors de la COP 16, le « *Cancun Adaptation Framework* » (CAF). En effet, les Parties ont considéré que « l'adaptation doit être abordée avec le même niveau de priorité que la mitigation ». Le CAF doit alors définir le type d'information à tenir en compte dans la définition des Plans Nationaux d'Adaptation (*National Adaptation Plans*) dits NAPs. Concomitamment au CAF, le Comité pour l'Adaptation (*Adaptation Committee*) de celui-ci se mit en place. Son but consiste à « promouvoir l'expérimentation d'une action renforcée sur l'adaptation de façon cohérente sous la supervision de la Convention » Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques²³.

De plus, un Mécanisme Technologique (*Technology Mechanism*) se créa. Il comprend le Comité Exécutif de la Technologie (*Technology Executive Committee*) dit TEC et le Centre de Technologie Climatique et Réseau ou CRTC (*Climate Technology Center and Network*).

Mais l'organe le plus décisif du Mécanisme Technologique reste le TEC. Il se charge d'expérimenter la réalisation du cadre de la CCNUCC, notamment le développement et le transfert de technologies écologiquement vertueuses. Les modalités et procédures d'accès à l'assistance du TEC ont déjà acquis leur validation depuis la COP 17 de Durban (*WORLD BANK, 2012 p. 46*).

- Enjeu NMM

Comme nous l'avons mentionné plus haut, les Parties s'engagèrent à Doha dans une deuxième période du PK, entre 2013 et 2020.

Les objectifs de réduction des GES ou les REC, principaux objets du NMM, paraissent pourtant faibles.

En effet, les plus gros pollueurs, la Chine et les Etats-Unis d'Amérique, n'ayant même pas ratifié le PK, ne cautionnent aucun engagement de réduction de leur GES.

²² WWF, *Doha : à peine mieux que rien*, http://www.wwf.fr/_12/12/2012)

²³ CCNUCC/UNFCCC, http://unfccc.int/adaptation/groups_committees/adaptation_committee/items/6053.php, copié le 02/08/2013

Le Canada, souscrit à la première période du Protocole, s'en retirait en 2011. Le Japon et la Russie menaçaient de suivre son exemple (*WORLD BANK, 2012 p. 45*).

Seuls l'Union Européenne et quelques autres pays, parmi lesquels la Norvège, la Suisse, l'Islande, l'Australie, la Nouvelle Zélande, etc. maintiennent leur détermination à poursuivre leur engagement. En définitive, l'ensemble des nations de la deuxième période ne représenteraient que « 15 % des émissions de GES dans le monde »²⁴. Leurs objectifs de réduction ou *QELROS* (*Quantified Emission Limitation or Reduction Objectives*) s'avèrent tout aussi modestes. En guise d'illustration, l'Europe aurait « déjà atteint depuis 2011 l'objectif qu'elle s'était fixée pour 2020 »²⁵.

Or, l'enjeu majeur associé à la post-2012 reste l'établissement, à son terme, d'un « protocole, instrument légal, ou un accord avec force de loi (...) applicable à toutes les parties ». (*WORLD BANK, 2012 p. 46*). Cela devrait passer par un marché-carbone solide, gage du consensus politique capable d'assurer de grandes avancées dans les négociations entre les Parties (*CDM Policy Dialogue, 2012 p. 3*). Il faut, pour cela, implémenter au plus vite le NMM réputé pour sa performance supérieure à celle du marché-carbone primaire (pré-2013) et sa plus grande pérennité.

En effet, le marché-carbone post-2012 présente des opportunités relativement bonnes.

Dans le passé, des gouvernements ont progressivement abandonné la promotion du marché primaire (pré-2013) à base de projet. Leur préférence allait aux Unités de Quantité Attribuée (UQA) ou *Assigned Amount Units (AAU)* et aux REC du marché secondaire (post-2012). Les raisons d'un tel changement d'attitude se trouvent dans le caractère prédictible des volumes de GES des UQA mais également dans la réduction des risques ainsi que la rapidité et la simplicité des processus d'obtention des REC (*WORLD BANK, 2012 p. 50*).

Toutefois, un pays comme la Chine ne compte pas investir grandement sur le marché secondaire conventionnel du carbone. Cela se lit à travers le nombre réduit de projets attestés « Lettre d'Approbation » (*LoA*) par la Commission Nationale pour le Développement et la Réforme (*NDRC*). La *LoA* donne à un projet droit de production de REC jusqu'en 2015.

Ces signes témoignent alors d'une volonté du gouvernement chinois de « lancer un marché intérieur » (*WORLD BANK, 2012 p. 50*).

A l'image des gouvernements, le secteur privé a considérablement réduit ses demandes de compensation d'émissions du marché primaire. Pour cause, la faiblesse de l'activité industrielle – due à la crise de 2008 – a provoqué la chute des émissions de GES pour la deuxième fois en 3 ans dans l'UE. De ce fait, l'offre dans la compensation des émissions devient inférieure à la demande. On

²⁴ WWF, *Doha : à peine mieux que rien*, <http://www.wwf.fr/>, 12/12/2012)

²⁵ WWF, *Doha : à peine mieux que rien*, <http://www.wwf.fr/>, 12/12/2012)

prévoit une compensation complète des émissions estimées à 1 milliard de tonne d'ici à 2020 (*WORLD BANK, 2012 p. 50*).

Ces spéculations optimistes procurent un ascendant aux acheteurs de REC et augmente leur pouvoir de négociation. Ainsi, parle-t-on de « conditionnalité et de clauses de garantie plus strictes » en faveur des acquéreurs. Ces avantages comportent notamment un réalignement des prix des REC conventionnelles avec ceux du marché volontaire du carbone.

Les points ci-dessus entretiennent des liens directs avec les enjeux climatiques de ce siècle.

- Enjeu climat

Si l'évolution de la situation actuelle de pollution ne s'améliore pas, la terre court le risque de connaître une hausse de 4° C d'ici la fin de ce siècle-ci²⁶.

Un début de réponse à ce défi se donnait à Durban avec la création du Fond Vert pour le Climat (FVC) dit *Green Climate Fund (GCF)*. La nouvelle structure, placée sous la direction et l'autorité de la Conférence des Parties commencera son fonctionnement avec comme fidéicommissaire intérimaire la Banque Mondiale. La CCNUCC et le FEM feront office de secrétariat intérimaire.

La principale mission assignée au FVC consiste à « aider à l'accroissement du financement à long terme » d'actions pro-climat dans les pays en développement (*WORLD BANK, 2012 p. 46*).

Malheureusement, on remarque avec déception à Doha l'écart grandissant entre les promesses des Parties de réduire les émissions de GES et l'accroissement effectif de la concentration de ceux-ci dans l'atmosphère²⁷.

Mais la promesse faite à Durban par les PD de financer l'atténuation dans les pays pauvres se réitérait et se maintenait à la COP 18. Il s'agit de l'épargne de 100 milliards \$ par an jusqu'en 2020. Cet argent émanerait à la fois du financement public et privé des PD. Ces derniers ont ainsi repoussé l'effectivité d'une décision qui devait beaucoup contribuer à l'atténuation de la pollution atmosphérique. En outre, l'incertitude demeure sur l'action des PD entre 2013 et 2020 en faveur de la résilience dans les PED. L'exception se fait du Royaume Uni, de la Norvège et de la Commission Européenne, auteurs d'engagements plus crédibles²⁸.

De ce fait, contrairement au NMM, l'avenir du climat semble hypothéqué par des contingences internationales dont les tenants ne se dévoilent pas toujours de manière perceptibles.

La réalité paraît moins dure à propos de l'adaptation.

²⁶ WWF, *Doha : à peine mieux que rien*, http://www.wwf.fr/_12/12/2012)

²⁷ KERR Thomas (Director, Climate Change Initiatives at the World Economic Forum), *Outcomes from the Doha UN Climate Meeting: What You Need to Know for 2013*, The Huffington Post, 01/02/2013

²⁸ KERR Thomas (Director, Climate Change Initiatives at the World Economic Forum), *Outcomes from the Doha UN Climate Meeting: What You Need to Know for 2013*, The Huffington Post, 01/02/2013

- Enjeu Adaptation

Au regard de la fréquence sans cesse croissante de la manifestation des évènements extrêmes du climat, l'inquiétude grandit. L'intrigue devient d'autant plus aigüe que les évènements à effet lents comme la hausse du niveau de la mer et la désertification paraissent plus présents aujourd'hui.

Ces observations ont sans doute poussé les représentants des Parties à Doha à réclamer urgemment « plus d'aide financière et technique pour les pays les plus vulnérables » au changement climatique²⁹.

L'arrivée de la deuxième période d'engagement du PK ne fait qu'augmenter les chances de l'aide à l'adaptation des pays les plus pauvres.

Parallèlement, la multiplication des stratégies d'action à la mitigation et à l'adaptation a rendu plus visibles ces thèmes en les portant au centre d'intérêt des rencontres internationales. Cette impulsion devra se faire entretenir par la provision de financement, de l'aide à la résilience aux extrêmes climatiques de la part des PD. Cette vision reste partagée par les organismes tels que le *G2A2*, le *Water Resources Group* et la *New Vision for Agriculture*. Ils constituent des initiatives du Forum Economique Mondial et se veulent adeptes d'une approche « bottom-up » (de bas en haut) associant acteurs publics, acteurs privés et société civile. Les exemples d'actions menées par ces structures se font exposer et diffuser grâce au Mouvement pour la Changement (*Momentum for Change*).

La question du climat se trouvera au cœur du Forum Economique Mondial de Davos de janvier 2014. Entre autres thèmes, feront l'objet de discussion le financement en faveur du climat, le risque climatique, les modèles d'un commerce durable, etc.

²⁹ KERR Thomas (Director, Climate Change Initiatives at the World Economic Forum), Outcomes from the Doha UN Climate Meeting: What You Need to Know for 2013, The Huffington Post, 01/02/2013

TROISIEME

PARTIE : Discussions

et Perspectives

VI. DISCUSSIONS

Le projet de CATF exécuté à Palmarin doit sa réalisation au financement du FEM et au déploiement de l'ACCC. Ce programme constitue un démembrement du Ministère sénégalais de l'Ecologie et de la Protection de la Nature.

Des surfaces de 10 ha et de 17 ha ont respectivement reçu le reboisement de *Casuarina equisetifolia* (filao) et l'afforestation de mangrove (*Avicennia africana* et *Rhizophora mangle*) entre 2009 et 2010.

Toutefois, l'appropriation par les palmarinois de l'ACCC-Palmarin a été un préalable à toute activité de CATF. Cela devint possible grâce au travail de sensibilisation des équipes de l'ACCC auprès des populations de Palmarin.

Ainsi, près de 200 habitants prirent part à la campagne de CATF de 2009 et environ 180 effectuèrent celle de 2010.

Une telle motivation des palmarinois se fonde sur des faits réels.

Elle part d'abord d'une longue imprégnation des effets néfastes du climat à travers la survenue de raz-de-marée depuis le début du XXème siècle jusqu'à récemment (*NDOUYE, 2011*). Ces intempéries causèrent des déplacements de populations entières de même que des pertes matérielles importantes.

La sécheresse avec ses cycles de déficit pluviométrique observés depuis la fin des années 1960 contribua à réduire considérablement le couvert végétal et à favoriser l'expansion des formations pédologiques salées dites tannes.

Le littoral atlantique connaît, quant à lui, une érosion chronique responsable de la disparition de 3 m de la plage chaque année.

Au même moment, la population palmarinoise croît relativement vite (10.033 habitants aujourd'hui) et étend ses espaces d'habitation, de culture agricole, avec comme corollaire aussi une perte du couvert végétal. En plus, les activités se multiplient utilisant souvent des engins mécanisés, donc pollueurs : pirogues motorisées, voitures de transport, équipements électroménagers et mobiliers des campements touristiques, etc.

A ces menaces sur la biodiversité et sur le bien-être de la population humaine, la réponse constituait d'abord la création en 2001 de la RNCP. Celle-ci consacrait notamment l'interdiction de la coupe des arbres et procura à la CR un statut écologique.

Ensuite, le projet ACCC a voulu mener à Palmarin la phase pilote de sa campagne de CATF sous-régionale. Cette initiative heureuse rencontre alors le souci élevé de la préservation de l'environnement nourri chez les palmarinois par des contraintes écologiques fortes.

Le résultat de cette entreprise donne 93,4 t de carbone séquestré, toutes espèces confondues, pour 2009 et 2010. Mais cette valeur ne laisse pas transparaître l'ensemble des limites de l'opération.

Palmarin reste un territoire de végétation en lambeaux. Les tannes ont, en effet, effectué des intrusions profondes dans le tapis végétal et lui donne par endroit un aspect de formations éparées. Il apparaît alors difficile à priori d'identifier une aire continue de CATF d'envergure importante et dotée de toutes les caractéristiques stationnelles requises à la bonne croissance des plantes.

L'activité incessante des houles a détruit la plupart des jeunes plants de *Casuarina equisetifolia* sur le littoral. Par leur force motrice, les houles et les vagues de l'océan engloutissent les petits filaos dans le sable. En plus, les jetés de la mer font subir une sursalinité aux plantes.

L'excès de sel dans les nappes d'eau souterraine de Djifère a fait exclure ce village, le plus peuplé de la CR, des programmes de reboisement.

D'autre part, une entente avec les éleveurs de bétail avait acquis l'éloignement de leurs troupeaux des stations reboisées en filao. Cependant, lors des missions de terrain effectuées, le constat se faisait de la présence dans les aires de reboisement de bœufs et d'ânes en pâture.

En dehors de ces difficultés mentionnées, les enquêtes de population ont révélé une parenté quasi systématique entre l'ensemble des populations des villages parrains des aires de CATF ; c'est-à-dire Diakhanor, Ngallou, Ngeth et Ngounoumane. Autrement dit, le ciment de la cohésion autour du projet de l'ACCC existait déjà. De ce fait, des conflits majeurs entre individus n'apparurent pas lors de l'exécution du projet de sorte à pouvoir le compromettre.

L'espoir existe ainsi que cette même relative entente au sein des palmarinois prévale dans l'étape suivante : la gestion du potentiel ligneux installé et du crédit-carbone émis.

VII. PERSPECTIVES

La COP 17 tenue à Durban en 2011 officialisa l'éligibilité des REDD (REDD+) aux projets-MDP. Les TECO_2 de GES réduites par la gestion des formations végétales peuvent maintenant se monnayer avec des crédits-carbone.

Les pays Non-Annexe1 n'ont pas commis d'engagements de réduction de GES contrairement à ceux de l'Annexe2 dont une partie appartient aux pays de l'Annexe1 du PK³⁰. Les pays des Annexes 1 et 2, pour la plupart des nations industrialisées et riches, ont indiqué des quantités chiffrées de TECO_2 (QELROS) à « réduire » sur une période donnée.

Cependant, le terme « réduire » renferme diverses réalités.

Les émissions de GES peuvent directement subir une limitation ou une réduction dans les secteurs de l'industrie, du transport, de l'énergie sur le territoire des PD (pays de l'Annexe 1 et 2).

Les pays riches disposent également, dans le cadre du MDP, d'un moyen d'acheter des crédits-carbone pour compenser leurs émissions de GES. Ces crédits-carbone émanent souvent des projets d'atténuation, de sobriété énergétique (éolien, foyers améliorés, géothermie, réfrigération, solaire, etc.), de recyclage (biogaz), de capture et de séquestration du carbone (REDD et/ou REDD+), etc. Lesdites initiatives d'atténuation se passent souvent dans des PED ou très pauvres.

Le NMM, cadre rénové du marché-carbone MDP, prit réellement corps à la COP de Durban en 2011. Il devra permettre des transactions de crédits-carbone (REC) de manière plus efficace. Les processus du NMM s'annoncent plus souples et ouverts au marché volontaire du carbone (non-conventionnel ou non MDP).

Le projet de CATF ACCC-Palmarin ambitionne d'acquérir l'appellation de REDD+ et de gagner son entrée dans le NMM.

En effet, l'exécution du reboisement à Palmarin se réalisa dans un cadre communautaire (CR de Palmarin) où s'exerce un pouvoir décentralisé.

Toutes les composantes de la population autochtone participèrent à la préparation, à la planification et à la réalisation des CATF (*NDOUYE, 2011*).

Les aires réaffectées de plantes se localisent à l'intérieur de la Réserve Naturelle Communautaire de Palmarin (RNCP). Les surfaces plantées bénéficient ainsi de la protection destinée à une gestion durable de la RNCP. Aucune infraction ne se produisit jusqu'au déroulement de notre étude de terrain (2010-2011) depuis la naissance de la Réserve en 2001.

³⁰ CCNUCC/UNFCCC, <https://unfccc.int/adaptation/items/5852.php>, 02/08/2013

Les règles d'hygiène écologique font encore l'objet d'un respect scrupuleux à Palmarin. Les habitants restent relativement attachés aux pratiques traditionnelles malgré quelques intrusions de la technologie moderne : semoirs dans l'agriculture, pirogues motorisées dans la pêche, voitures de transport en commun, etc.

La même attention aux préoccupations écologiques a régné lors de la mise en œuvre de la campagne de CATF.

Les plantes de filao et de mangrove mises à terres, âgées aujourd'hui de 3 à 4 ans, promettent des quantités plus grandes de carbone séquestré. Lorsque celles-ci se soumettront au NMM, les retombées devront équitablement profiter à l'ensemble des acteurs de la cogestion des aires réaffectées.

Les points ci-dessus comptent parmi les principales exigences imposées à un projet afin d'obtenir le statut MDP dans le NMM.

Alors, le projet ACCC-Palmarin satisfait l'essentiel des conditions d'admission au rang de MDP et peut attirer des retombées économiques probables.

VIII. CONCLUSION

La première partie de la présente étude se consacrait essentiellement à la mesure expérimentale de la quantité de carbone séquestré par le projet de Changement d'Affectation des Terres et de Foresterie (CATF), ACCC-Palmarin (*NDOUYE, 2011*).

Dans cette seconde phase d'évaluation, nous avons établi des équations allométriques capables de prédire – pour le même âge des espèces de mangrove et de filao – la masse de carbone séquestrée par les plantes.

Les résultats de la masse de carbone bioséquestré trouvés par le calcul expérimental ne s'éloignent pas beaucoup de ceux obtenus par la voie théorique (équations allométriques). Cette dernière méthode d'estimation présente le grand avantage de la simplicité et de l'efficacité une fois les équations établies. Pour y parvenir, il faut avoir déployé une méthodologie de terrain exempte de grands biais et élaborer un affinement poussé des équations.

En effet, le calcul théorique du carbone bioséquestré met en œuvre la Méthode allométrique destructive (Mad) utilisée depuis l'échantillonnage des plantes, leur dissection, leur séchage et leur pesage. Cette technique d'évaluation a fait ses preuves (*MBOW, 2009*). Il reste à l'intégrer à la méthode de Mesure – Suivi – Vérification (MRV) adoptée à Doha en 2012 par la CCNUCC (Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques).

La qualification de MRV d'une méthode d'estimation de REC (Réductions d'Emissions Certifiées) offre de grandes facilités et opportunités dans le Nouveau Mécanisme de Marché (NMM).

L'espoir de voir l'exploitation des plantations de l'ACCC-Palmarin intégrer le NMM reste réel et permis. ACCC-Palmarin consiste en un projet communautaire dont le montage a requis l'implication des populations autochtones. Palmarin constitue une CR de 10.033 habitants pour la plupart agriculteurs établis sur une surface de 77 Km² fortement affectés par l'érosion marine, la salinisation des terres et l'instabilité pluviométrique.

Les bénéfices de l'ACCC-Palmarin iront de manière équitable à l'ensemble des acteurs engagés dans l'élaboration, le suivi et l'évaluation des quantités de carbone.

La deuxième période d'engagement du PK commencée en 2013 ouvre beaucoup de perspectives intéressantes quant au succès du NMM.

L'occasion se présente alors pour les pays Non-Annexé1 à l'image du Sénégal de travailler à porter leurs projets d'atténuation, notamment les CATF, au statut de REDD+. Cela passe par l'adaptation dans notre pays des MRV en phase avec le MDP.

Plusieurs raisons avancées dans cet ouvrage montrent le mérite de la Mad de se retrouver dans les MRV.

BIBLIOGRAPHIE

- AGBOGBA C. et DOYEN A.** La mangrove à usages multiples de l'estuaire du Saloum (Sénégal) [Ouvrage]. - [s.l.] : ISE, 1985.
- BERNARD Maurice** Cours de chimie générale [Ouvrage]. - [s.l.] : Dunod, 1994. - 2e édition.
- BERNIER Patrick et LEFRANT Serge** Le carbone dans tous ses états [Ouvrage]. - [s.l.] : Gordon et Breach Sciences Publishers, 1997.
- BOTONI Edwige et REIJ Chris** La transformation silencieuse de l'environnement et des systèmes de production au Sahel : Impacts des investissements publics et privés dans la gestion des ressources naturelles [Ouvrage]. - [s.l.] : Comité Permanent Inter- États de Lutte contre la Sécheresse dans le Sahel (CILSS) & Center for International Cooperation (CIS), 2009.
- BROWN Sandra** Exploration du potentiel de séquestration de carbone dans les forêts classées de la République de Guinée [Ouvrage]. - [s.l.] : Agence des Etat-Unis pour le développement international, 2004.
- BROWN Sandra** Measuring, monitoring, and verification of carbon benefits for forest-based projects [Ouvrage]. - [s.l.] : Winrock International, 2002.
- CCNUCC** Protocole de Kyoto à la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques [Ouvrage]. - Japon : NATIONS UNIES, 1997.
- CDM Policy Dialogue** Changement climatique marchés du carbone et le MDP : un appel à l'action, in Synthèse : Recommandations du Groupe d'experts de haut niveau sur le Dialogue de politique générale sur le MDP [Ouvrage]. - Luxembourg : Luxembourg, 2012.
- DEGUE-NAMBONA Ralph Mercier** Contribution des reboisements de mangrove de la RBDS à la séquestration du carbone atmosphérique : cas des plantations des villages Djirda et Sanghako du Delta du Saloum (Sénégal) [Ouvrage]. - [s.l.] : DEA, ISE, 2008.
- DIOP Assane** Les émissions anthropiques de gaz à effet de serre : cas de la déforestation du Sénégal [Ouvrage]. - [s.l.] : Ecole Nationale des Cadres Ruraux de Bambey, 1994. - Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme d'ingénieur des travaux des Eaux, Forêts et Chasse..
- DIOUF Jean Noël Diaga** Effet d'un apport organique croissant dans un sol sur la minéralisation du carbone et de l'Azote organique, l'activité microbienne [Ouvrage]. - [s.l.] : Mémoire de Diplôme de Master en Biologie Animale, FST, UCAD, 2011.

- FAYE M. N. [et al.]** Etude phénologique des rhizophora de la mangrove de l'Estuaire du Saloum, Sénégal [Ouvrage]. - Dakar : Département de Biologie Végétale, UCAD, 2010.
- FAYE Sidy** Etude de l'évolution géomorphologique du littoral de Joal-Fadiouth à Palmarin [Ouvrage]. - [s.l.] : mémoire de Maîtrise, 1995.
- FORSTER B. A.** *Casuarina equisetifolia* : caractères sylvicoles et méthodes de plantation [Ouvrage]. - [s.l.] : Revue Bois et Forêts des tropiques, n° 79, 1961.
- IPCC** Guidance Notes for Lead Authors of the IPCC Fourth Assessment Report on Addressing Uncertainties [Ouvrage]. - [s.l.] : IPCC, 2007.
- KALY Jean Laurent** Contribution à l'étude de l'écosystème mangrove de la Petite Côte et essai de reboisement [Ouvrage]. - [s.l.] : Thèse de Doctorat, 2001.
- LEHTONEN Aleks**i Carbon stocks and flows in forest ecosystems based on forest inventory data [Ouvrage]. - [s.l.] : Finnish Forest Research Institute, University of Helsinki, 2005.
- MAGGIA Laurent** Diversité génétique de *Frankia*, symbiote de *Casuarina equisetifolia* L. Johnson en Afrique de l'Ouest (Sénégal et Gambie) [Ouvrage]. - Paris : Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 1991.
- MARIUS Claude** Mangroves du Sénégal et de la Gambie : Ecologie-Pédologie-Géochimie, Mise en valeur et aménagement [Ouvrage]. - [s.l.] : Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université Louis Pasteur, Editions de l'ORSTOM, 1990.
- MBAYE Tamsir** Pressions anthropiques et écologie forestière en Haute Casamance (Sénégal) : dynamique des ressources ligneuses après coupe dans la forêt communautaire aménagée de Sare Gardi (Kolda) [Ouvrage]. - Dakar : Thèse de doctorat de 3ème cycle, UCAD, 2009.
- MBOW Cheikh** Potentiel et dynamique des stocks de carbone des savanes soudaniennes et soudano-guinéennes du Sénégal [Ouvrage]. - [s.l.] : Thèse de doctorat d'Etat, UCAD, 2009.
- MEYER Jean-Yves** Rapport de mission d'expertise sur l'invasion du *Aïto* (*Casuarina equisetifolia*) dans l'atoll de Mururoa (Tuamotu) [Ouvrage]. - 2005.
- MOUSSA Mamouda NA ABOU** Justification et critères de durabilité des projets de séquestration du carbone dans la lutte contre les changements climatiques : cas des systèmes agroforestiers de Sébikotane [Ouvrage]. - [s.l.] : Mémoire de DEA, 2004.
- NDOUYE Dominique** Contribution des activités de reboisement à la séquestration du carbone dans la communauté rurale de Palmarin [Ouvrage]. - Dakar : UCAD, 2011.

- PEARSON Timothy, WALKER Sarah et BROWN Sandra** Sourcebook for Land use, land-use change and forestry Projects [Ouvrage]. - [s.l.] : Bio CF, Winrock International, 2005.
- RAMADE F.** Dictionnaire encyclopédique des sciences de la nature et de la biodiversité [Ouvrage]. - Paris : Dunod, 2008.
- SALEM Marie-Christine Cormier** Dynamique et usage de la mangrove dans les pays des rivières du Sud [Ouvrage]. - Paris : ORSTOM, 1994.
- SALEM Marie-Christine Cormier** Rivières du Sud : Sociétés et mangroves ouest-africaines Volume 1 [Ouvrage]. - Paris : IRD, 1999.
- SECK El Hadj Waly** Le rôle des ONG dans le développement local : le cas de la communauté rurale de Palmarin [Ouvrage]. - [s.l.] : mémoire de Maîtrise, 2008.
- TOURE Assizé** Contribution à l'étude de l'évolution des réservoirs de carbone en zone nord-soudanienne au Sénégal [Ouvrage]. - [s.l.] : Thèse de DEA, 2002.
- WORLD BANK** State and trends of the carbon market 2012 [Ouvrage]. - Washington DC : Carbon Finance at the World Bank, 2012.
- ZIANIS Dimitris and MENCUCCINI Maurizio** On simplifying allometric analyses of forest biomass, in Forest Ecology and Management, 187 (2004) 311–332 [Ouvrage]. - Darwin Building, Mayfield Road, Edinburgh EH9 3JU, UK : Institute of Ecology and Resource Management, 2003.

WEBOGRAPHIE

- CCNUCC/UNFCCC,

http://unfccc.int/adaptation/groups_committees/adaptation_committee/items/6053.php, copié le 02/08/2013.

- KANDJI Cheikh & PIRARD Hervé & MASSALY Souleymane, Fiche technique de production et de plantation d'Avicennia africana, in « Appui à la gestion communautaire des ressources naturelles des forêts de mangrove – réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal » Projet mangrove –, Mars 2006

- KERR Thomas (Director, Climate Change Initiatives at the World Economic Forum), Outcomes from the Doha UN Climate Meeting: What You Need to Know for 2013, The Huffington Post, 01/02/2013

- LEVET Jérôme, Unités de mesure des gaz à effet de serre, www.riaed.net, 23 février 2007
- WWF, Doha : à peine mieux que rien, <http://www.wwf.fr/>, 12/12/2012)

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	i – ii
AVANT-PROPOS	iii
FOREWORD	iv
LISTE DES ABREVIATIONS ET DES SIGLES	v – ix
SOMMAIRE	x – xi
PROPOSITION DE RECHERCHE	1 – 6

PREMIERE PARTIE : Caractérisation de la biomasse mesurée

I. BREF RAPPEL SUR LES FACTEURS CONDITIONNELS DE LA VEGETATION DE PALMARIN

1.1. Situation géographique	9 – 10
1.2. Le climat	10
1.2.1. Les températures	10 – 11
1.2.2. Les vents	11 – 14
1.2.3. Les précipitations	14 – 15
1.2.4. L'humidité relative	15 – 16
1.3. Le relief	16
1.4. Les sols	16
1.5. La répartition des eaux	16
1.5.1. Les eaux de surface	16 – 17
1.5.2. Les eaux souterraines	17
1.6. La faune	17

II. RAPPEL DES GENERALITES SUR LES ECOSYSTEMES RESTAURES

2.1. Généralités sur l'écosystème de <i>Casuarina equisetifolia</i>	18 – 20
2.2. Généralités sur l'écosystème de mangrove	20 – 23
2.2.1. Il faut remarquer	23 – 24

2.2.2. Du point de vue de la phénologie	24 – 25
2.2.3. La mangrove des côtes sénégalaises	25 – 26
2.2.4. D'après <i>MARIUS (1990 p. 17)</i>	26
2.3. Présentation cartographiée des stations de CATF	26 – 27
2.3.1. Zone Nord des CATF	27 – 28
2.3.2. Zone Centre-nord des CATF	28 – 29
2.3.3. Zone Centre-sud des CATF	29 – 30
2.3.4. Zone Sud des CATF	30
III. ANALYSE DES DONNEES ALLOMETRIQUES DES PLANTES RESTAUREES	
3.1. Définition de l'allométrie	31
3.1.1. Les origines de l'allométrie	31 – 32
3.1.2. Le procédé de l'allométrie	32
3.1.2.1. Recueil des données de terrain	32 – 33
3.1.2.2. Analyse des données allométriques	33 – 34
3.1.3. Etude comparée de la Mad et des autres approches d'estimation de la biomasse ligneuse	34
3.1.3.1. Forces et faiblesses de la Mad	34
3.1.3.2. Les approches para-allométriques	34 – 36
3.1.3.3. Les méthodes satellitaires	36 – 37
3.1.3.4. Conclusion de l'étude comparée	37
3.2. Méthodologie appliquée de recueil des données : Méthode allométrique destructive (Mad)	37 – 38
3.3. Présentation des données allométriques de terrain	38 – 39
3.3.1. Les données de Hauteur de la plante (H)	39
3.3.1.1. La H de <i>CE</i>	39 – 40
3.3.1.2. La H d' <i>AA</i> et de <i>RM</i>	40
3.3.2. Les données de Masse anhydride individuelle (Ma_I)	40

3.3.2.1. La Ma_I de <i>CE</i>	40 – 41
3.3.2.2. La Ma_I d' <i>AA</i> et de <i>RM</i>	41

DEUXIEME PARTIE : Approches allométriques de détermination du carbone bioséquestré

IV. DETERMINATION DE LA REGRESSION ALLOMETRIQUE DE LA BIOMASSE EPIGEE

4.1. Qu'est-ce-que la régression allométrique ?	43
4.2. Quel modèle de régression : « exogène » ou « endogène » ?	43 – 44
4.3. Méthodologie de traitement des données en vue de la construction des droites de régression allométrique	44 – 45
4.4. Détermination des droites de régression allométrique d'estimation de la biomasse anhydride épigée de Palmarin	45
4.4.1. Présentation des nuages des points et des courbes de tendance à la régression	45
4.4.1.1. Nuages des point et courbes de tendance régressive de <i>CE</i>	45 – 46
4.4.1.2. Nuages des points et courbes de tendance régressive d' <i>AA</i> et de <i>RM</i>	46 – 47
4.4.2. Présentation des équations de régression allométrique	47 – 48
4.4.2.1. Régressions allométriques de <i>CE</i>	48 – 49
4.4.2.2. Régressions allométriques d' <i>AA</i> et de <i>RM</i>	49 – 51
4.4.2.3. Equations de régression allométrique	51 – 53
4.4.2.4. Tests de prédiction de la biomasse anhydride par les équations allométriques élues les plus performantes	53 – 57

V. PREDICTION ET PERSPECTIVES DU CARBONE SEQUESTRE PAR LA VEGETATION RESTAUREE A PALMARIN

5.1. Caractérisation du carbone	58
5.1.1. Définition	58
5.1.2. Réservoirs naturels	58 – 59

5.2. Prédiction du carbone bioséquestré par <i>CE</i> , <i>AA</i> et <i>RM</i>	59
5.2.1. Prédiction du carbone bioséquestré par <i>CE</i>	59 – 60
5.2.2. Prédiction du carbone bioséquestré par <i>AA</i> et <i>RM</i>	60
5.3. Perspectives du crédit carbone	61
5.3.1. Qu'est-ce que le crédit carbone ?	61 – 63
5.3.2. Une urgence pour la mitigation et la résilience	63 – 64
5.3.3. Les actes majeurs des COP pour l'amélioration du marché-carbone	64 – 66
5.3.4. Les enjeux et décisions stratégiques des COP à l'amélioration du marché-carbone	66
a. Le MDP	66 – 68
b. Le NMM	68 – 71
c. La REDD+	71 – 73
d. Les autres prédispositions de la COP	73 – 76
 TROISIEME PARTIE : Discussions et Perspectives	
VI. DISCUSSIONS	78 – 79
VII. PERSPECTIVES	80 – 81
VIII. CONCLUSION	82 – 83
BIBLIOGRAPHIE	84 – 86
WEBOGRAPHIE	87
TABLE DES MATIERES	88 – 91
LISTE DES FIGURES, DES GRAPHIQUES ET DES TABLEAUX	92 – 93
ANNEXES (du Mémoire de maîtrise)	94 – 98

LISTE DES FIGURES, DES GRAPHIQUES ET DES TABLEAUX

<u>Figure 1</u> : Carte de la communauté rurale de Palmarin.....	9
<u>Figure 2</u> : Zones de CATF d'ACCC à Palmarin	27
<u>Figure 3</u> : Zone Nord de CATF d'ACCC	28
<u>Figure 4</u> : Zone Centre-nord de CATF d'ACCC	29
<u>Figure 5</u> : Zone Centre-sud de CATF ACCC	30
<u>Figure 6</u> : Zone Sud de CATF d'ACCC	30
 <u>Graphique 1</u> : Courbes d'évolution des températures maximales, moyennes et minimales mensuelles de Palmarin	11
<u>Graphique 2</u> : Roses des vents à la station de Mbour	12
<u>Graphique 3</u> : Histogramme de l'évolution des précipitations moyennes annuelles à Palmarin (1999 à 2008) – 3 ans.....	14
<u>Graphique 4</u> : Répartition interannuelle des totaux pluviométriques en mm à Palmarin (1999 à 2008) – 3 ans	15
<u>Graphique 5</u> : Répartition interannuelle du nombre de jours de pluie (NPJ) à Palmarin (1999 – 2008) – 3ans	15
<u>Graphique 6</u> : Histogramme des humidités maximale, moyenne et minimale à Mbour.....	16
<u>Graphique 7</u> : Courbes de tendance de la régression allométrique de CE.....	46
<u>Graphique 8</u> : Courbes de tendance de la régression allométrique d'AA et de RM.....	47
<u>Graphique 9</u> : Prédiction de la biomasse de CE de 2009	48
<u>Graphique 10</u> : Prédiction de la biomasse de CE de 2010.....	49
<u>Graphique 11</u> : Prédiction de la biomasse de RM de 2009	50
<u>Graphique 12</u> : Prédiction de la biomasse d'AA et de RM de 2010.....	51
<u>Graphique 13</u> : Volumes et valeurs des REC en transaction durant la pré-2013 dans le marché du carbone MDP	70
 <u>Tableau 1</u> : Hauteur de la tige des individus-échantillons de CE de 2009.....	39
<u>Tableau 2</u> : Hauteur de la tige des individus-échantillons de CE de 2010.....	39

<u>Tableau 3</u> : Hauteur de la tige des individus-échantillons d'AA et de RM de 2009	40
<u>Tableau 4</u> : Hauteur de la tige des individus-échantillons d'AA et de RM de 2010	40
<u>Tableau 5</u> : Masse anhydride individuelle des individus-échantillons de CE 2009.....	40
<u>Tableau 6</u> : Masse anhydride individuelle des individus-échantillons de CE 2010.....	41
<u>Tableau 7</u> : Masse anhydride individuelle des individus-échantillons d'AA et de RM 2009	41
<u>Tableau 8</u> : Masse anhydride individuelle des individus-échantillons d'AA et de RM 2010	41
<u>Tableau 9</u> : Equations allométriques exprimant la Ma_I (Kg) en fonction de la H (m) pour CE de 2009	52
<u>Tableau 10</u> : Equations allométriques exprimant la Ma_I (Kg) en fonction de la H (m) pour CE de 2010	52
<u>Tableau 11</u> : Equations allométriques exprimant la Ma_I (Kg) en fonction de la H (m) pour RM de 2009	53
<u>Tableau 12</u> : Equations allométriques exprimant la Ma_I (Kg) en fonction de la H (m) pour AA et RM de 2010	53
<u>Tableau 13</u> : Biomasse anhydride de CE de 2009	54
<u>Tableau 14</u> : Biomasse anhydride de CE de 2010	54
<u>Tableau 15</u> : Biomasse anhydride de RM de 2009	55
<u>Tableau 16</u> : Biomasse anhydride d'AA et de RM de 2010	55
<u>Tableau 17</u> : Estimation de la biomasse théorique de CE	56
<u>Tableau 18</u> : Estimation de la biomasse théorique d'AA et de RM.....	56
<u>Tableau 19</u> : Biomasse théorique et biomasse expérimentale de CE.....	56
<u>Tableau 20</u> : Biomasse théorique et biomasse expérimentale d'AA et de RM.....	57
<u>Tableau 21</u> : Estimation du carbone séquestré par la biomasse de CE	59
<u>Tableau 22</u> : Equations mathématiques déterminant la bioséquestration de CE	59
<u>Tableau 23</u> : Estimation du carbone séquestré par la biomasse d'AA et de RM.....	60
<u>Tableau 24</u> : Equations mathématiques déterminant la bioséquestration d'AA et de RM	60
<u>Tableau 25</u> : Volumes et valeurs de REC en transaction entre 2010 et 2011 dans le marché du carbone MDP	69

Outils de terrain

- 1 appareil GPS;
- 1 appareil photo;
- 1 balance de précision au 1/1.000 g;
- 1 balance mécanique;
- 1 bâton métrique de plus de 6 m de hauteur ;
- 1 coupe-coupe ;
- 1 couteau ;
- 1 étuve ;
- 1 pair de gants;
- 1 rouleau métrique en caoutchouc;
- 1 ruban de 1,5 mètre de long;
- 1 ruban de 30 mètres de long;

Questionnaire

Partie I : Statut social du questionné

- 1. Sexe : 1.a. : Féminin ☐ ; 1.b. : Masculin ☐
- 2. Age :
- 3. Lieu de naissance :
- 4. Lieu de résidence actuel à Palmarin :
- 5. Date de résidence à Palmarin :
- 6. Situation conjugale : 6.a. : ☐ Marié ; 6.b. : ☐ Célibataire

Partie II : Profession de l'enquêté

- 7. Quelle est l'activité principale que vous menez ?
 - 7.a. Socioprofessionnelle (préciser laquelle) :

ou

7.b. Economique :

7. b.1. ☐ Pêche ; 7.b.2. : ☐ Exploitation de sel ; 7.b.3. : ☐ Agriculture ; 7.b.4: ☐ Autres
(préciser laquelle ou lesquelles) :.....

8. Quelle est l'activité secondaire que vous menez parallèlement à votre activité principale :

8. a. : ☐ Pêche ; 8.b. : ☐ Exploitation de sel ; 8.c.: ☐ Agriculture ; 8.d.: ☐
Autres(préciser laquelle ou lesquelles) :.....

Partie III : Campagnes de la réaffectation

9. Aviez-vous pris part aux campagnes de réaffectation ACCC ? : 9.a. :Oui ; ☐ 9.b ☐ Non

Si Oui, préciser (l' ou) les années, (l' ou) les espèce(s), la quantité des graines, (le ou) les lieu(x) et la superficie où celles-ci ont été réaffectées. Si Non, passer à la question 10.

10. Avant la campagne de réaffectation ACCC (2009 et 2010), d'autres campagnes avaient-elles été menées ou sont-elles en cours ? : 10.a : Oui ☐ ; 10.b : Non ☐

Si Oui, préciser (l' ou) les années, (l' ou) les espèce(s), la quantité des graines, (le ou) les lieu(x) et la superficie où celles-ci ont été réaffectées. Si Non, passer à la question 11.

10.a.1 Année (s) :.....

10.a.2 Espèce(s) restaurée(s) :.....

10.a.3 Quantité des graines (Kg) :.....

10.a.4 Lieu(x) de réaffectation :.....

10.a.5 Superficie réaffectée (ha):.....

11. En dehors des campagnes de réaffectation de projet (ACCC et UICN), avez-vous personnellement ou avec d'autres individus entrepris une restauration de plantes quelconques dans votre localité ou dans une autre localité située à Palmarin ?

11.a. Dans votre localité située à Palmarin : 11.a.1 ☐ Oui 11.a.2 : ☐ Non

Si Oui, préciser (l' ou) les années, (l' ou) les espèce(s), la quantité des graines, (le ou) les lieu (x) et la superficie où celles-ci ont été restaurées. Si Non, passer à la question 11.b. :

11.a.1.A. Année (s) :.....

11.a.2.B. Espèce(s) restaurée(s) :.....

11.a.3.C. Quantité des graines (Kg) :.....

11.a.4.D. Lieu(x) de réaffectation :.....

11.a.5.E. Superficie réaffectée (ha):.....

11.b. Dans une (d') autre(s) localité(s) située(s) à Palmarin : 11.b.1 ☐ Oui 11.b.2 : ☐

Si Oui, préciser (l' ou) les années, (l' ou) les espèce(s), la quantité des graines, (le ou) les lieu(x) et la superficie où celles-ci ont été restaurées. Si Non, passer à la question c.2. :

11.b.1.A Année (s) :.....

11.b.1.B Espèce(s) restaurée(s) :.....

11.b.1.C Quantité des graines (Kg) :.....

11.b.1.D Lieu(x) de réaffectation.....

11.b.1.E Superficie réaffectée (ha):.....

12. Si vous n'aviez pris part à aucune activité de restauration (personnelle, ACCC ou IUCN), dites pourquoi vous n'y avez pas participé :

12.a. J'ai voulu y participer mais j'étais trop occupé. ☐

12.b. Je n'y pas participé parce-que je ne me sentais pas concerné par la campagne de restauration. ☐

12.c. J'avais voulu y participer mais j'ai été empêché par une absence de Palmarin ☐

12.d. J'ai voulu y participer mais j'étais empêché par mon âge trop avancé ☐

12.e. Je trouve que c'est inutile parce que les changements sur l'environnement de Palmarin sont déjà trop en avancé. ☐

12.f. J'ai voulu y participer mais je n'étais pas au courant ☐

12.g. Je n'aime pas l'idée de la réaffectation

.....

12.h. J'ai voulu y participer mais j'étais empêché pour des raisons de santé ☐

12.i. Je n'ai pas été convié à la réaffectation.....

.....

13. Pourquoi selon vous doit-on procéder à des réaffectations à Palmarin ?

Parce que :

.....

14. Avez-vous entendu parler du réchauffement climatique ? : 14.a. : ☐ Oui 14.b. :
Non ☐

Si Oui, passer à 14.a.1. Si Non, passer à la question 15.

14.a.1. Que savez-vous du réchauffement climatique ?

.....

.....

.....

14.a.2. Avez-vous senti les changements climatiques dus au réchauffement climatique dans votre localité à Palmarin : 14.a.2.A. : ☐ Oui 14.a.2.B. : ☐ Non

Si Oui, passer à 14.a.3. Si Non, passer à la question 15.

14.a.3. Comment se sont manifestés ces changements climatiques dus au réchauffement climatique dans votre localité à Palmarin ?

.....

.....

.....

14.a.4. Pensez-vous que la restauration des plantes à Palmarin permet de lutter contre le réchauffement climatique ? : 14.a.4.A. ☐ Oui 14.a.4.B. ☐ Non

Pourquoi ?

.....

.....

.....

Partie IV : Evaluation et critique de la campagne de réaffectation ACCC (2009/2010).

15. Comment trouvez-vous le résultat de la réaffectation à Palmarin :

15.a. La réaffectation n'a pas réussi ☐

15.b. La réaffectation a

15.b.1. Beaucoup réussi ☐

15.b.2. Moyennement réussi ☐

15.b.3. Peu réussi ☐

Personnes-ressources des entretiens

ANTA Henriette, *Trésorière du GIE*

DIATTA Moussa, *Conservateur de la Réserve Naturelle Communautaire de Palmarin (Palmarin-Ngounoumane, Facao)*

DIOUF Christophe, *Chef de village de Ngounoumane, modérateur dans le projet de la réaffectation*

DIOUF Raymond, *Ex-conseiller rural, habitant de Diakhanor*

FALL Abdoulaye, *Assistant communautaire de la Communauté Rurale de Palmarin.*

FAYE Abbé Alphonse Demba, *affecté à la Paroisse de Palmarin depuis 2006.*

FAYE Joseph, *témoin du raz-de-marée du 10 septembre 2010.*

NDENE Maurice Omar, *doyen et notable du village de Ngounoumane.*

NDENE Pierre, *Président des écouguides de la mangrove de la CR de Palmarin.*

NDIAYE Ibrahima, *gérant responsable de l'auberge « DLC » à Djifère.*

NDONG Gilbert, *horticulteur de formation et pépiniériste de l'ACCC.*

NDONG Sébastien, *chef de village de Djifère.*

SARR Pierre, *écoguide, Responsable de la réaffectation de l'ACCC à Diakhanor.*

SECK Gorgui, *Chef du village de Samsam.*

SECK Michel, *Conseiller au ministre de l'environnement.*

SECK Samuel, *Président la Communauté Rurale de Palmarin.*

SENE Emmanuel, *aide à la manœuvre, écoguide.*

THIOUB Momodou, *Coordinateur du projet « Sauver Djifère », Djifère.*