



REPUBLIQUE TOGOLAISE

MINISTRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES RESSOURCES FORESTIERES



COORDINATION NATIONALE REDD+

Projet de soutien à la préparation à la Réduction des Émissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des forêts (REDD+)

DEFINITION DE LA METHODOLOGIE ET DES OUTILS POUR L'EVALUATION DE LA BIOMASSE VEGETALE DANS LES DIFFERENTS COMPARTIMENTS AU TOGO : Rapport d'étude.

Septembre 2018

**CONTRAT N°00972/2016/AMI/MERF-REDD+/PI/BM-IDA/ AMI N°003/2016/ODEF/PRMP/UCN-REDD+ du
25/03/2016**

**(lettre de notification du contrat n°475/2016/ODEF/PRMP/UCN-REDD+/ AMI
N°003/2016/ODEF/PRMP/UCN-REDD+ du 25/03/2016)**

Financement: Don FCPF TF 018779 administré par le groupe de la Banque mondiale

Avec l'appui technique de : Cabinet ACDD (Tél : +22996279545, Email : agbgafid@gmail.com)

Définition de la méthodologie et des outils pour l'évaluation de la biomasse végétale dans les différents compartiments au Togo

Consultants

Prof. Dr. Ir. Noël H. FONTON, Chef de mission
Dr. Ir. Gilbert ATINDOGBE
Ir Fidel G. AGBAHUNGBA
Ir Cédric GOUSSANOU
Ir Moussa SAMAROU
Ir Gilles ETSHE

Sommaire

LISTE DES TABLEAUX	v
LISTE DES FIGURES	v
SIGLES ET ACRONYMES.....	vi
RESUME EXECUTIF.....	vii
1. INTRODUCTION	1
1.1. Contexte	1
1.2. Justification.....	2
1.3. Objectifs de l'étude	3
2. BREVE PRESENTATION DE LA REPUBLIQUE DU TOGO.....	4
2.1. Localisation, découpage administratif et climat	4
2.2. Zones écologiques	6
2.3. Caractérisation du potentiel forestier du Togo.....	6
2.3.1. Aperçu général.....	6
2.3.2. Région des savanes	6
2.3.3. Région de Kara	8
2.3.4. Région centrale.....	10
2.3.5. Région des Plateaux	11
2.3.6. Région maritime	12
3. ETAT DES LIEUX EN MATIERE D'ESTIMATION DES STOCKS DE CARBONE	13
3.1. Inventaire des modèles disponibles	13
3.2. Equations d'estimation de la biomasse disponibles	14
4. Méthodologie développée.....	25
4.1. Approche générale d'estimation du stock de carbone	25
4.2. Choix du modèle de prédiction de la biomasse aérienne	26
4.3. Estimation du carbone forestier.....	29
4.4. Estimation du carbone du sol.....	30
4.5. Relation Carbone et Indice de végétation (NDVI)	30
5. Détermination de la biomasse et du carbone par placette et par type forestier	32
5.1. Description des données de biomasse échantillons	32
4.2. Meilleure équation d'estimation de biomasse aérienne	33
4.3. Biomasse par placette et par type forestier.....	35
4.4. Estimation du carbone du sol.....	36

V. Cartographie du stock de carbone au Togo	37
VI. Collaboration et renforcement des capacités	41
VI.1. Collaboration avec les structures nationales et renforcement des capacités	41
VI.2. Renforcement des capacités techniques et scientifiques nationales	41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Occupation du sol de la région des savanes	8
Tableau 2: Occupation du sol de la région Kara	9
Tableau 3: Occupation du sol de la région centrale	10
Tableau 4: Occupation du sol de la région des plateaux	12
Tableau 5: Occupation du sol de la région maritime	13
Tableau 6: Les équations allométriques multi-espèces (D =diamètre, H =hauteur et ρ =densité spécifique, B_t = biomasse totale aérienne)	15
Tableau 7: Equations allométriques mono espèces établies en zone Soudano- guinéenne	18
Tableau 8: Equations allométriques mono espèces établies en zone Soudanienne	19
Tableau 9: Equations établies en zone sahélienne	24
Tableau 10: Plan d'échantillonnage de la collecte des données de biomasse	26
Tableau 11. Equations allométriques retenues pour l'étude de la qualité de prédiction	28
Tableau 12: Données de biomasse des 20 arbres échantillons : dbh=diamètre à 1,30 m en cm, ht=hauteur totale en m, hf= hauteur fut en m, wsd=infra-densité, GB=grosses branches, MB=moyennes branches, PB=petites branches	32
Tableau 13: Valeurs de la biomasse aérienne (AGB^0) et racinaire (BGB) et t/ha par type d'occupation des sols issus des travaux de cartographie. Btot est la biomasse sèche vivante ($AGB+BGB$)	36
Tableau 14: Quantité de carbone en t/ha par type d'occupation des sols, l'erreur standard et les limites de confiances pour un degré de confiance de 95%	36
Tableau 15: Quantité de carbone organique du sol (C_{sol}) en t/ha et l'indice de végétation ($NDVI$) par type d'occupation des sols	37

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Milieu d'étude	5
Figure 2: Zones écologiques du Togo	7
Figure 3: Aperçu des composants nécessaires à un système MRV (Scénario de base et suivi)	25
Figure 4: Distribution du nuage de point de biomasse aérienne en fonction du diamètre (a) et aussi à échelle logarithmique	33
Figure 5: Evolution de l'Erreur quadratique moyenne de prédiction en fonction des modèles allométriques comparés	34
Figure 6: Evolution de l'Erreur Relative Absolue Moyenne de Prédiction en fonction des modèles allométriques comparés	34
Figure 7: Evolution du nombre d'arbre en pourcent dont l'Erreur Absolue relative prédiction est inférieur à 10% et 20% en fonction des modèles allométriques comparés	35
Figure 8: Biais en fonction des modèles allométriques comparés	35
Figure 9: Histogramme des résidus de la modélisation du carbone aérien (a) et carbone total (b) en fonction de la variable ndvi_2015	38
Figure 10: Distribution au niveau national du stock de carbone aérien	39
Figure 11: Distribution au niveau national du stock de carbone total(aérien, souterrain et organique du sol)	40

SIGLES ET ACRONYMES

REDD+	Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des Forêts
UN REDD	Programme des Nations Unies pour la Réduction des Emissions dues à la Déforestation et à la Dégradation des Forêts
IFN	Inventaire Forestier National
D	Diamètre de l'arbre
H	Hauteur de l'arbre
G	Surface Terrière
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
ProREDD	Programme d'Appui au REDD+-Readiness et Réhabilitation des Forêts au Togo
GIZ	Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit
MRV	Mesure Reportage Vérification
GIEC/IPCC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur le Climat
GPS	Global Positioning System (Système Global de Positionnement)
TDR	Termes de Référence
RSE	Residual Standard Error

RESUME EXECUTIF

Le présent rapport présente le cheminement méthodologique pour l'évaluation du stock de carbone dans les différents compartiments des écosystèmes forestiers du Togo. Deux compartiments sont retenus. Il s'agit de la biomasse aérienne des arbres vivants ou morts sur pied et du sol.

Conformément à la méthodologie, un échantillon de 20 arbres a été retenu pour la détermination de la biomasse sèche aérienne par abattage des différentes parties de l'arbre (souche, fût, branches et feuilles). Cette opération a été menée et les résultats sont obtenus. Ensuite, la qualité de prédiction des équations allométriques d'estimation de la biomasse a été étudiée pour choisir la meilleure pour estimer la biomasse (voire le carbone) de chaque arbre mesuré lors de l'inventaire forestier national du Togo.

Avec la meilleure équation d'estimation de la biomasse, la biomasse aérienne de chaque placette a été estimée et les résultats présentés.

En ce qui concerne le carbone du sol, le système amélioré de SoilGrids pour les prévisions globales des propriétés numériques standard de sol été utilisé. La teneur en carbone organique a été extraite sur la couche 0- 30 cm en exploitant la base de données internationale SoilGrids d'une maille de 250m.

Enfin, le calcul et la cartographie du stock de carbone à l'échelle nationale ont été réalisés par la modélisation de la relation carbone et NDVI par strate forestière fournie. Ces strates sont celle des résultats de cartographie d'occupation des terres du Togo. Cette relation peut connaître une amélioration prédictive en explorant l'ajout de SAVI, GAVI et TSAVI. Elle permettrait d'éliminer les erreurs obtenues dans la région maritime.

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte

L'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est connue comme la principale source du changement climatique. Des effets majeurs sont mis en évidence au 21^{ème} siècle à travers différents scénarii qui nécessitent des actions pour la réduction des gaz à effet de serre. Parmi elles, la réduction des émissions par la déforestation et la dégradation des forêts a fait l'objet d'âpres débats qui se sont soldés par le protocole de Kyoto et le programme UN REDD (Vieilledent, et al. 2012).

La gestion durable des écosystèmes forestiers constituent donc une meilleure alternative pour l'atténuation des effets néfastes du changement climatique à travers le REDD+. Ce mécanisme prévoit des compensations financières au niveau national pour les émissions évitées de carbone, dues à la déforestation et à la dégradation des forêts. La mise en place d'un tel mécanisme implique la mesure et le suivi des stocks de carbone forestiers avec des méthodes et combinaison de méthodes éprouvées (Gibbs *et al.*, 2007).

Cet effort de réduction des émissions des gaz à effet de serre devient une préoccupation de chaque pays pour son effort à travers la mise en œuvre de stratégies et actions. Fort de l'appui financier et technique de la Banque mondiale et de la GIZ, le Togo s'est doté depuis juillet 2013 de son RPP dans lequel le pays se propose de développer 5 axes préliminaires. Ces axes seront par la suite affinés à travers diverses études et concertations nationales. Ainsi, comme d'autre pays, le Togo s'est donc engagé dans le processus de préparation au mécanisme REDD+.

Différentes méthodes d'estimation de la biomasse et du stock de carbone forestier sont utilisées. Il s'agit notamment des méthodes du stock de carbone moyen, de l'inventaire forestier avec l'utilisation des équations allométriques, des indices spectraux en corrélation avec la biomasse ou le carbone forestier terrestre (Landsat, MODIS), de la photographie aérienne et l'imagerie digitale aérienne 3D, du signal radar pour mesurer la structure verticale de la forêt (ALOS PALSAR, ERS-1, JERS-1, Envisat) et le laser (LiDAR). Gibbs *et al.* (2007) ont relevé les avantages et les inconvénients de chacune de ces méthodes. En fonction du type de projet REDD+ et de son échelle (sous-régionale, nationale, régionale et locale) une combinaison appropriée de techniques sus-citées devront être mises en place pour l'estimation de la biomasse et de l'évolution des stocks de carbone au regard d'une analyse coût bénéfice.

Les équations allométriques constituent l'outil commun et nécessaire à toutes ces méthodes (Van Breugel *et al.*, 2011). Des relations d'estimation de la biomasse existent au niveau mondial dont les équations pantropicales de Chave *et al.* (2005 et 2014). Mais les résultats de prédictions réalisées mettent en évidence la nécessité pour chaque pays ou sous-région à écosystème similaire de développer leurs propres équations en conformité avec les bonnes pratiques internationales en la matière.

La présente étude vise la définition des méthodes et des outils pour l'évaluation de la biomasse végétale et l'estimation des stocks et des flux de carbone dans les différents compartiments au Togo. Pour ce faire, nous ferons un rappel sur la méthode GIEC de mesure des émissions et du stock de carbone. Ensuite, la compréhension des TDRs sera précisée avec les commentaires pour l'adéquation de la composante 3 de la RPP qui justifie la présente étude. Enfin un cadrage méthodologique sera proposé pour son adoption.

1.2. Justification

Le Togo a ratifié la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUC) le 08 mars 1995. C'est dans le cadre de la mise en œuvre de cette convention et particulièrement dans le cadre de l'implémentation des activités REDD+ qu'a vu la création, en juillet 2014, du Programme d'Appui au REDD+-readiness et réhabilitation de forêts au Togo (ProREDD) avec l'appui financier et technique de l'Allemagne pour une durée de 5 ans. L'objectif du ProREDD est de contribuer à l'amélioration des cadres technique et institutionnel permettant la mise en œuvre effective de la stratégie nationale REDD+ et la réhabilitation des forêts au Togo. C'est dans ce contexte que le premier inventaire forestier national (IFN) a été réalisé. Ce premier IFN a pour objectif d'obtenir des informations quantitatives et qualitatives de base sur les forêts naturelles et les plantations du Togo afin de permettre la mise en place d'un système cohérent et permanent de suivi-évaluation des ressources forestières au niveau national dans le contexte de la REDD+. Un tel suivi ne peut être cohérent sans la disponibilité d'équations allométriques fiables. En effet, le développement et l'utilisation des équations allométriques est la méthode par excellence pour estimer la biomasse et de surcroît le stock de carbone dans les écosystèmes forestiers. L'estimation de la biomasse forestière est cruciale pour des usages partant de la commercialisation du bois (Morgan et Moss, 1985) à la gestion du cycle global du carbone (Henry *et al.*, 2011). L'estimation de la biomasse peut aider à la quantification de la ressource forestière en bois d'œuvre et en bois-énergie disponible. Il fournit aussi d'informations fiables sur les flux d'énergie et de nutriments (Sawadogo, 2010). De plus, l'estimation de la biomasse aérienne est essentielle pour les études d'estimation du stock de

carbone et des effets de la déforestation et de la séquestration du carbone sur le bilan carbone (Litton et Kauffman, 2008). Compte tenu de l'importance du cycle global du carbone (C), l'estimation suffisamment précise de la biomasse totale aérienne des arbres pour le suivi du stock de carbone des milieux forestiers devient une impérieuse nécessité dans le but de quantifier au mieux le facteur d'émission du carbone.

1.3. Objectifs de l'étude

L'objectif de la mission vise la définition des méthodes et des outils simples et robustes adaptés aux écosystèmes du Togo pour l'évaluation de la biomasse et l'estimation des stocks et des flux de carbone dans les différents compartiments. Spécifiquement, il s'agit de :

- Documenter l'ensemble des méthodes et outils disponibles aux niveaux national, sous-régional en Afrique de l'Ouest (en particulier Ghana et Côte d'Ivoire, Bénin) et international (pays REDD+) pour l'évaluation de la biomasse et l'estimation des stocks et des flux de carbone dans les différents compartiments dans les écosystèmes forestiers à savoir la biomasse aérienne, racinaire et du carbone organique.
- Développer sur la base des informations disponibles, les méthodes et outils les plus adaptés et coûts-efficacité pour l'évaluation de la biomasse et l'estimation des stocks et des flux de carbone dans les différents compartiments des écosystèmes du Togo ;
- Tester et valider les méthodes et outils développés pour l'évaluation de la biomasse et l'estimation des stocks et des flux de carbone dans les différents compartiments des écosystèmes forestiers du Togo
- Proposer les méthodes et les équations allométriques à utiliser pour l'évaluation de la biomasse et l'estimation des stocks et des flux de carbone
- Renforcer les capacités des cadres togolais en matière d'utilisation des méthodes et outils proposés pour l'évaluation de la biomasse et l'estimation des stocks et des flux de carbone dans les différents compartiments des écosystèmes du Togo

2. BREVE PRESENTATION DE LA REPUBLIQUE DU TOGO

2.1. Localisation, découpage administratif et climat

Le Togo est situé sur la côte du Golfe de Guinée en Afrique de l'Ouest et couvre une superficie de 56 785 km². Il est limité au Sud par l'Océan Atlantique, au Nord par le Burkina Faso, à l'Est par le Bénin et à l'Ouest par le Ghana. Localisé entre le 6^{ème} et 11^{ème} degré de latitude nord et entre 0 et 2 degré de longitude est, le pays s'étend du nord au sud sur 660 km. Sa largeur varie entre 50 et 150 km.

Selon la figure 1, le territoire national est divisé en cinq régions administratives. Il s'agit :

- Région Maritime, ayant pour chef-lieu Tsévié et une superficie de 6 100 km²;
- Région des Plateaux, ayant pour chef-lieu Atakpamé et une superficie de 16 975 km²;
- Région Centrale, ayant pour chef-lieu Sokodé (deuxième ville du pays) et une superficie de 13 500 km²;
- Région de la Kara, ayant pour chef-lieu Kara et une superficie de 11 630 km².

Le pays jouit d'un climat intertropical qui varie sensiblement des régions méridionales aux régions septentrionales. Il est de ce fait sous l'influence de deux régimes climatiques:

- le régime tropical soudanien au Nord avec une saison pluvieuse qui va de mai à octobre et une saison sèche de novembre à avril. Dans cette région, la pluviométrie annuelle varie de 900 à 1100 mm et la période de croissance des végétaux est inférieure à 175 jours;
- le régime tropical guinéen au Sud est caractérisé par deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses de durées inégales. La pluviométrie annuelle varie de 1000 à 1400 mm/an.

La température moyenne est généralement élevée, jusqu'à 28°C dans les zones septentrionales, 27°C dans la zone côtière, entre 24 et 26°C dans les autres localités avec une croissance des végétaux de moins de 240 jours. L'humidité relative moyenne est élevée dans les zones méridionales (73 à 90%) mais faible dans les régions septentrionales (53 à 67%). La vitesse moyenne du vent est de 1,93 m/s et la durée moyenne de l'insolation est de 6,62 heures par jour, l'évapotranspiration moyenne est de 1540 mm/an.

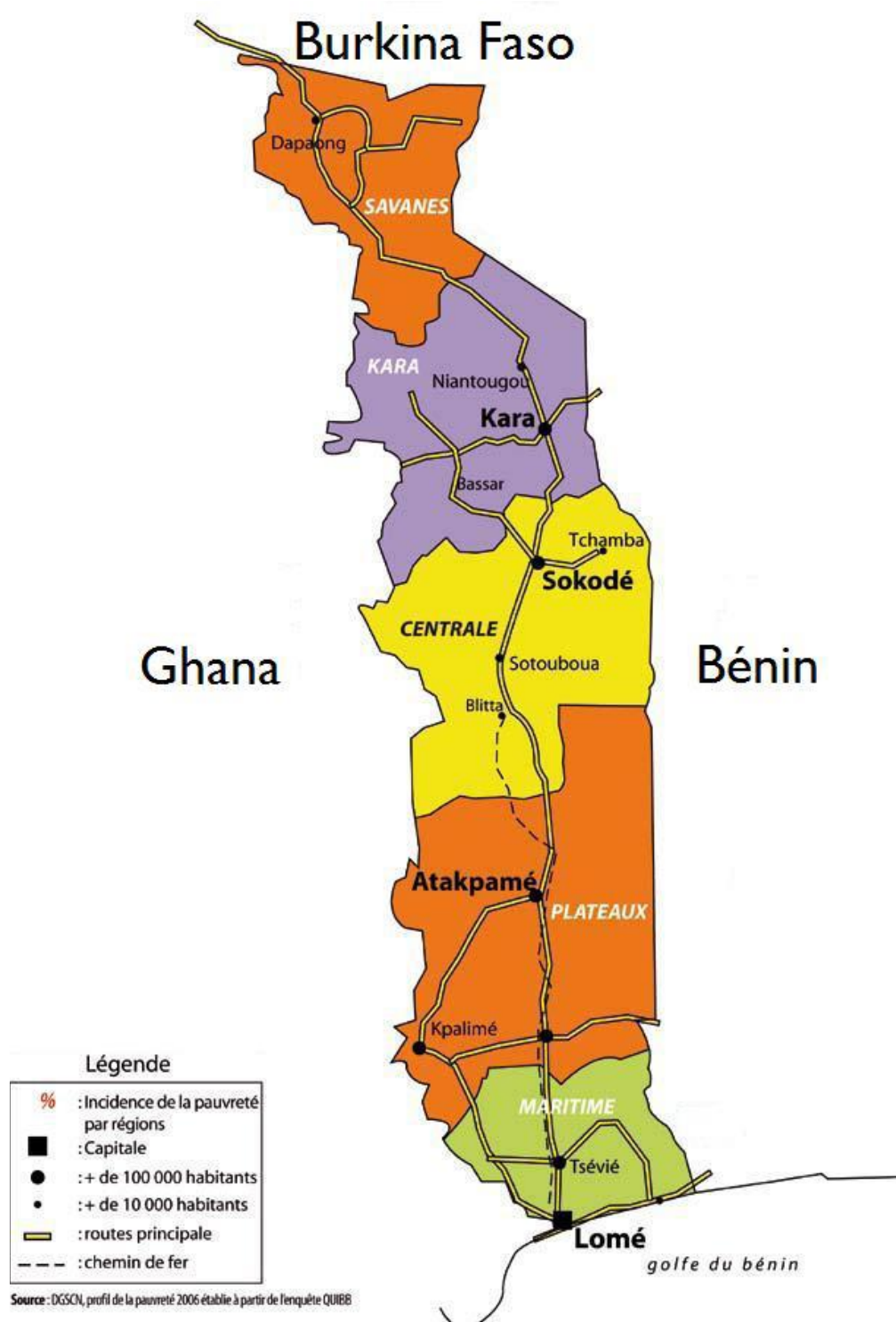


Figure 1: Milieu d'étude

2.2. Zones écologiques

Comme l'indique la figure 2, le pays est subdivisé en cinq (5) zones écologiques au Togo : la Zone I ou zone de la plaine du nord s'étend de la pénéplaine de Dapaong à la limite sud du Bassin de la Volta suivant approximativement l'axe Bandjeli-Kpessidè.

- la Zone II ou zone des montagnes du nord va de la latitude de Sokodé à celle de Dfalé-Kanté.
- la Zone III ou zone des plaines du centre.
- la Zone IV ou zone méridionale des monts Togo et;
- la Zone V ou zone côtière du sud.

2.3. Caractérisation du potentiel forestier du Togo

2.3.1. Aperçu général

Le Togo a réalisé un inventaire forestier national (IFN) afin d'acquérir des informations quantitatives et qualitatives de base sur les forêts naturelles et les plantations. Au plan opérationnel, 945 placettes ont été inventoriées dans les 5 régions administratives du Togo à savoir : la région des Savanes, la région de Kara, la région centrale, la région des plateaux et la région maritime.

L'analyse des résultats de l'IFN révèle que le volume total est de l'ordre de 54,42 m³/ha et le nombre moyen d'arbres est à peu près de 228 tiges/ha, avec un diamètre moyen (Dg) de 21,8 cm. La structure de la végétation forestière togolaise est caractérisée par des essences de faibles diamètres. Ainsi, il a été noté la prédominance des individus de la classe de diamètre comprise entre 20 et 29 cm avec une faible présence des arbres de grands diamètres. De même, les six essences à forte valeurs d'indice d'importance sont : *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertner subsp. *Paradoxa*, *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., *Lannea acida* A. Rich., *Daniellia oliveri* (Rolfé) Hutch. & Dalziel, *Crossopteryx febrifuga* (Afzel. ex G.Don) Benth.

2.3.2. Région des savanes

- *Présentation de la région des savanes*

La région des savanes s'étend sur une superficie de 8470 km² et fait partie intégrante de la zone écologique 1 du Togo ou zone de la plaine du nord. Elle se présente comme un ensemble de plaines et de plateaux peu élevés où dominent les surfaces horizontales. Dans le cadre de l'IFN, soixante onze (71) placettes ont été inventoriées dans cette région.

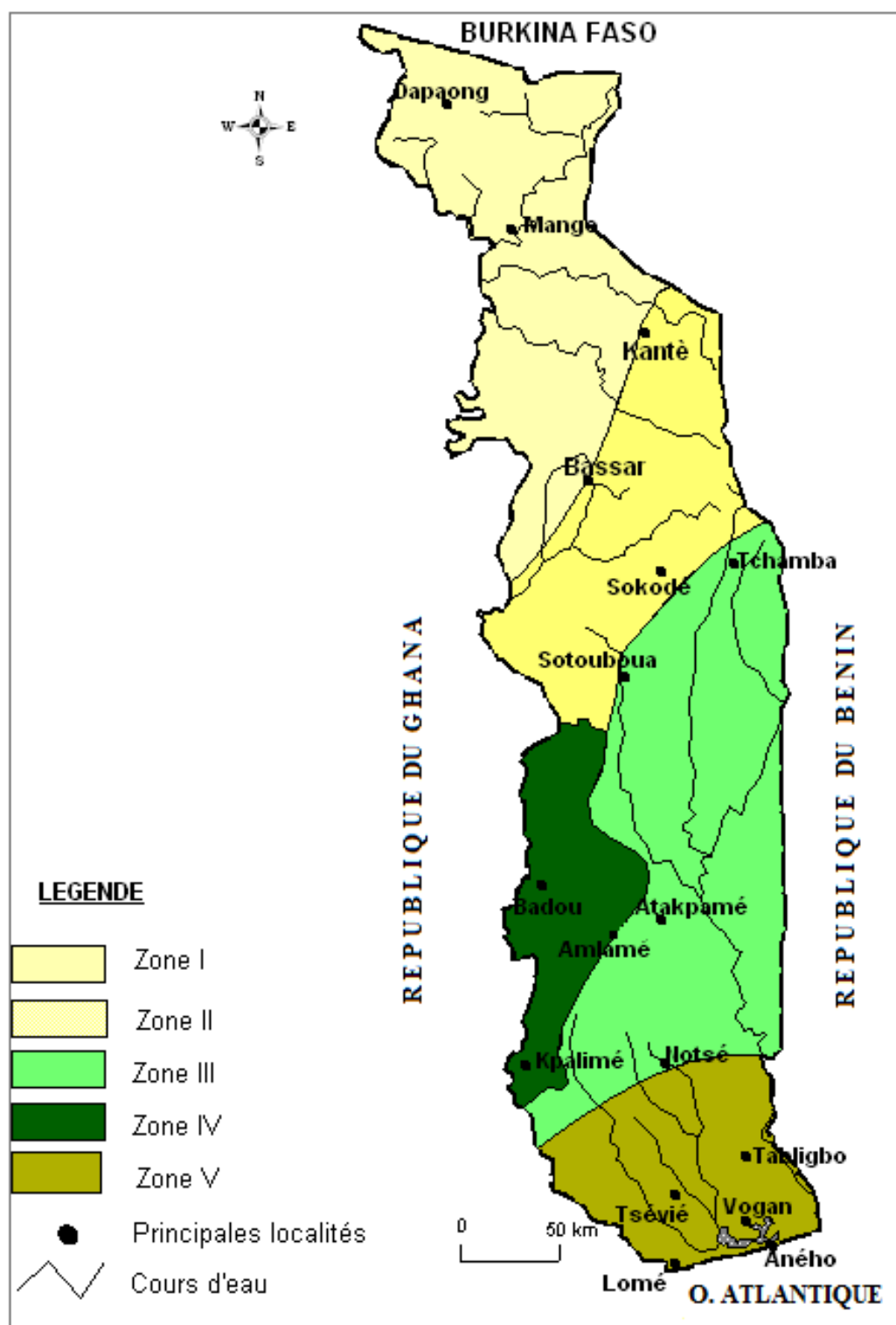


Figure 2: Zones écologiques du Togo

- Potentiel forestier de la région des savanes

La région des savanes est caractérisée par une surface terrière (G) moyenne de 4,02 m²/ha avec un diamètre moyen des peuplements estimé à 20,5 cm pour 121,8 pieds/ha. Le volume total estimé est de l'ordre de 16,66 m³/ha avec 5,59 m³/ha pour le volume fût et 11,07 m³/ha pour le volume de bois-énergie. La répartition par classe de diamètre de référence des volumes de bois donne de fortes valeurs dans la classe de diamètres de 20 à 29 cm (Kammer et Djossou, 2016).

- Formations forestières de la région des savanes

Le tableau 1 présente les différentes unités d'occupation du sol de la région des savanes. Cette région est dominée essentiellement par les terres cultivées estimées à 465900 ha soit 53,4% suivie par les savanes arborée et arbustive, les formations herbeuses, les forêts claire et savane boisée dont les superficies sont respectivement 218077 ha, 67834 ha et 44926 ha. Les six espèces à forte valeur d'indice d'importance de la région des savanes sont : *Lannea acida* A. Rich., *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertner subsp. *Paradoxa*, *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., *Sterculia setigera* Del., *Lannea microcarpa* Engl. & K.Krause.

Tableau 1: Occupation du sol de la région des savanes

Strates	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Forêts denses semi-décidues et décidues	330	0,04
Forêt galerie	36467	4,18
Forêt claire et savane boisée	44926	5,15
Savane arborée et arbustive	218077	25,00
Mangroves	-	-
Plantation	805	0,09
Formations marécageuses	41	0,00
Terres cultivées	465900	53,40
Formations herbeuse	67834	7,78
Etablissements	12584	1,44
Terres humides	4508	0,52
Autres terres	2434	0,28
Autres	7810	0,90
Total	872444	100

Source: Résultat d'IFN, 2016

2.3.3. Région de Kara

- Présentation de la région de Kara

La région de Kara a une superficie de 11738 km² se situe à cheval entre la zone écologique I du Togo ou zone de la plaine du nord et la zone écologique III. Elle est dominée par une succession

de chaînes de montagnes qui vont de la latitude de Sokodé à celle de Défalé-Kanté. Dans le cadre de l'IFN, 192 placettes y ont été installées.

- Potentiel forestier de la région Kara

L'analyse des paramètres dendrométriques de l'IFN de la région de Kara donne une surface terrière (G) moyenne de 7,91 m²/ha avec un diamètre moyen des peuplements estimé à 19,9 cm pour 255,5 pieds par hectare. Le volume total calculé pour cette région est de 39,66 m³/ha avec 18,32 m³/ha pour le volume fût et 21,34 m³/ha pour le volume de bois-énergie. La répartition par classe de diamètre de référence du nombre du pied à l'hectare montre une forte densité de peuplement, dépassant la moyenne nationale, dans la classe de diamètre comprise entre 10 et 19 cm (environ 180 N/ha). Par contre, il a été noté la densité d'arbres à l'hectare faible pour les classes de diamètre supérieur à 40 cm. Concernant les volumes, la tendance est la même qu'au niveau national avec les plus fortes valeurs dans la classe de 20 à 29 cm de diamètre où le volume totale dépasse les 10 m³/ha.

- Formations forestières de la région de Kara

Le tableau 2 renseigne sur l'occupation du sol de la région de Kara. Elle est dominée essentiellement par les savanes arborée et arbustive (466409 ha soit à 40,46%) suivie par des terres cultivées (366096 ha), des forêts claires et savane boisée (125201 ha), des formations herbeuses (89884 ha). Les six espèces à valeurs d'importance les plus élevées sont : *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertner subsp. *paradoxa*, *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Lannea acida* A. Rich., *Daniellia oliveri* (Rolfé) Hutch. & Dalziel, *Isoberlinia doka* Craib & Stapf, *Burkea africana* Hook.

Tableau 2: Occupation du sol de la région Kara

Strates	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Forêts denses semi-décidues et décidues	1604	0,14
Forêt galerie	67920	5,89
Forêt claire et savane boisée	125201	10,86
Savane arborée et arbustive	466409	40,46
Mangroves	-	-
Plantation	1769	0,15
Formations marécageuses	-	-
Terres cultivées	366096	31,76
Formations herbeuse	89884	7,80
Etablissements	22693	1,97
Terres humides	1581	0,14
Autres terres	3013	0,26
Autres	6705	0,58
Total	1152875	100

Source: Résultat d'IFN, 2016

2.3.4. Région centrale

- *Présentation de la région centrale*

La région centrale a une superficie de 13 317 Km² dont plus de 20 % sont constituées en réserves et forêts classées parmi lesquelles la réserve du parc national du Fazao. La région centrale se trouve à cheval entre la zone écologique II, la zone écologique III et la zone IV ou zone des plaines du centre. Dans le cadre de l'IFN du Togo, 289 placettes ont été inventoriées dans cette partie du pays.

- *Potentiel forestier de la région centrale*

L'analyse des paramètres dendrométriques de l'IFN de la région centrale donne une surface terrière (G) moyenne de 11,44 m²/ha avec un diamètre moyen des peuplements estimé à 22,3 cm pour 292,8 pieds par hectare. Les volumes fût et bois-énergie des peuplements ligneux représentent respectivement 41,86 et 36,17 m³/ha pour un volume total de 78,03 m³/ha. L'analyse de la répartition du peuplement par classe de diamètre de référence permet de constater que c'est la classe de diamètre comprise entre 10 et 19 cm qui regorge plus de pieds d'arbres à l'hectare soit 200 /ha. Par contre, on note moins d'un arbre au mètre carré pour des diamètres d'exploitabilité (à partir de 20 cm).

- *Formations forestières de la région centrale*

Le tableau 3 fournit des statistiques sur l'occupation du sol de la région centrale. Elle est essentiellement dominée par les savanes arborée et arbustive (600497 ha soit 45,34%) suivie des terres cultivées (255338 ha), des forêts claires et savane boisée (210933 ha), des forêts galeries (103172 ha) et des formations herbeuses (62586 ha). Les six espèces à valeurs d'indices d'importances les plus élevées de la région centrale sont *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertner subsp. *paradoxa*, *Daniellia oliveri* (Rolfe) Hutch. & Dalziel, *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., *Lannea acida* A. Rich., *Crossopteryx febrifuga* (Afzel. ex G. Don) Benth., *Parinari curatellifolia* Planch. ex Benth.

Tableau 3: Occupation du sol de la région centrale

Strates	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Forêts denses semi-décidues et décidues	30699	2,32
Forêt galerie	103172	7,79
Forêt claire et savane boisée	210933	15,93
Savane arborée et arbustive	600497	45,34
Mangroves	0	0
Plantation	10544	0,80
Formations marécageuses	0	0
Terres cultivées	255338	19,28
Formations herbeuse	62586	4,73
Etablissements	22081	1,67

Strates	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Terres humides	476	0,04
Autres terres	17121	1,29
Autres	11050	0,83
Total	1324497	100

Source: Résultat d'IFN, 2016

2.3.5. Région des Plateaux

- Potentiel forestier de la région des plateaux

La région des plateaux s'étend sur une superficie de 16975 Km². Elle se trouve à cheval entre la zone écologique III ou la zone des plaines du centre et la zone IV ou zone méridionale des monts Togo. Dans le cadre de l'IFN du Togo, 277 placettes ont été inventoriées dans cette partie du pays.

- Potentiel forestier de la région des plateaux

Les résultats de l'IFN indiquent pour la région des plateaux une surface terrière moyenne (G) estimée à 9,26 m²/ha et une densité d'arbres à l'hectare de 221,7 pieds. Le diamètre moyen des peuplements est estimé à 23,1 cm alors que les volumes fût et volume de bois-énergie sont évalués respectivement à 38,44 et 27,16 m³/ha. Le volume total moyen dans la région est estimé à 65,59 m³/ha. La répartition par classe de diamètre de référence montre que les peuplements se retrouvent majoritairement dans la classe de diamètre compris entre 10 et 19 cm de diamètre tandis que moins d'arbres sont enregistrés dans les classes de diamètre où l'on peut espérer exploiter ces ressources. Les peuplements qui présentent des valeurs moyennes les plus fortes en termes de volumes (fût, bois énergie et total) se retrouvent dans les classes de diamètres supérieures à 80 cm.

- Formations forestières de la région des plateaux

Le tableau 4 présente les résultats de l'analyse de l'occupation du sol. Ainsi, la région des plateaux est essentiellement dominée par les savanes arborée et arbustive (578722 ha soit 33,59%) suivie des terres cultivées (460929 ha), des forêts claire et savane boisée (351967 ha), des forêts galeries (115899 ha), des forêts denses semi-décidues et décidues (71930 ha) et des formations herbeuses (67518 ha). Les six espèces à fortes valeurs d'indice d'importance de la région des plateaux sont : *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertner subsp. *Paradoxa*, *Lannea acida* A. Rich., *Ficus sur* Forssk, *Terminalia glaucescens* Planch. ex Benth.

Tableau 4: Occupation du sol de la région des plateaux

Strates	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Forêts denses semi-décidues et décidues	71930	4,18
Forêt galerie	115899	6,73
Forêt claire et savane boisée	351967	20,43
Savane arborée et arbustive	578722	33,59
Mangroves	0	0
Plantation	25347	1,47
Formations marécageuses	0	0
Terres cultivées	460929	26,76
Formations herbeuse	67518	3,92
Etablissements	30614	1,78
Terres humides	13073	0,76
Autres terres	5968	0,35
Autres	721	0,04
Total	1722688	100

Source: Résultat d'IFN, 2016

2.3.6. Région maritime

La région maritime est délimitée sur une superficie de 6 100 Km². Elle se retrouve dans la zone écologique V ou zone côtière du sud. Dans le cadre de l'IFN, 116 placettes y ont été inventoriées.

- Présentation de la région maritime

L'analyse des paramètres dendrométriques issus des résultats de l'IFN indique pour la région maritime, une surface terrière estimée à 99,2 m²/ha pour une densité d'arbres de 99,2 pieds /ha. Le diamètre moyen des peuplements est estimé à 20 cm. Les volumes fût et de bois énergie correspondent respectivement à 7,9 et 8,58 m³ par hectare pour un volume total de 16,49 m³ à l'hectare. Les classes de diamètre disposant des valeurs plus fortes pour les volumes fût, bois-énergie et total se retrouvent au niveau des peuplements disposant d'un diamètre compris entre 10 et 19 cm.

- Occupation du sol de la région maritime

Le tableau 5 présente les données de l'occupation du sol dans la région maritime. Il révèle la prédominance des terres cultivées (200272 ha soit 31,98 %), des forêts claires et savanes boisées (122848 ha), des savanes arborée et arbustive (122848 ha). Les six espèces à valeur d'indice d'importance les plus élevées sont : *Elaeis guineensis* Jacq., *Lonchocarpus sericeus* (Poir.) Kunth,

Anogeissus leiocarpus (DC.) Guill. & Perr. , *Tectona grandis* L.f. , *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., *Albizia zygia* (DC.) J.F.Macbr.

Tableau 5: Occupation du sol de la région maritime

Strates	Superficie (ha)	Pourcentage (%)
Forêts denses semi-décidues et décidues	22968	3,67
Forêt galerie	19516	3,12
Forêt claire et savane boisée	125348	20,01
Savane arborée et arbustive	122848	19,61
Mangroves	0	0
Plantation	14193	2,27
Formations marécageuses	8056	1,29
Terres cultivées	200272	31,98
Formations herbeuse	26062	4,16
Etablissements	56784	9,07
Terres humides	6707	1,07
Autres terres	4910	0,78
Autres	18610	2,97
Total	626274	100

Source: Résultat d'IFN, 2016

3. ETAT DES LIEUX EN MATIERE D'ESTIMATION DES STOCKS DE CARBONE

3.1. Inventaire des modèles disponibles

Conformément à la définition internationale, le terme «biomasse» correspond au poids sec (matière sèche) constant pour un séchage à 105°C. La biomasse aérienne des arbres peut être estimée par le biais des équations allométriques de volume total ou de la biomasse. Bien que le nombre d'équations allométriques aient augmenté ces dernières années, les méthodes d'estimation de la biomasse ne se sont pas nécessairement améliorées. Dans le cadre de ce travail, un premier filtrage des équations allométriques a été réalisé en se basant sur la méthode des Tiers proposée par l'IPCC. Le Tiers représente le niveau de complexité méthodologique. Ainsi, le Tiers 1 représente le niveau méthodologique le plus bas. Des équations généralisées peuvent être utilisées pour estimer la biomasse. Le Tiers 2 est le niveau intermédiaire. Les équations basées sur le volume et la densité spécifique peuvent être utilisées. Le Tiers 3, le plus exigeant en termes de complexité et de fiabilité. Selon REDD+ Togo, c'est le Tiers 3 qui est souhaité en matière

d'estimation de la biomasse. De ce fait, cette synthèse se limitera essentiellement aux équations d'estimation de biomasse et s'intéressera plus aux équations issues des méthodes destructives où l'arbre tout entier (tige+ branches) a été mesuré. Les quelques équations d'estimations de volume identifiées relèvent d'une part de la rigueur méthodologique utilisée lors de leurs élaborations et d'autre part, des pays limitrophes au Togo.

Le Togo dispose de trois zones climatiques : la zone Soudanienne, la zone Soudano-Guinéenne et la zone Guinéenne (Djéri *et al.*, 2001). Tenant compte du fait qu'un grand nombre d'espèces de la zone soudanienne se retrouvent en zone sahélienne, les équations allométriques développées dans cette zone sont considérées dans ce travail.

3.2. Equations d'estimation de la biomasse disponibles

Les principales équations multi-espèces et mono-espèces d'estimation de la biomasse sont consignées dans les tableaux 6, 7, 8 et 9.

Le tableau 6 présente les différentes équations multi-espèces d'estimation de la biomasse aérienne des arbres. En tenant compte du fait que les types de formations végétales dominantes au Togo sont les savanes et les forêts sèches, vingt-quatre (24) équations ont été recensées. Ces équations sont proposées en fonction du nombre de paramètres, de leur simplicité, de leur caractère mathématique peu complexe et du degré d'utilisation de ces dernières dans la littérature. Elles ont été élaborées dans diverses régions et écosystèmes forestiers d'Afrique et d'ailleurs.

Les équations monospécifiques (tableau 7, 8 et 9) portent essentiellement sur les espèces ci-après : Le genre *Acacia*, le genre *Combretum*, le Genre *Terminalia*, *Anogeissus leiocarpa*, *Commiphora africana* (A. Rich.), *Crossopterix febrifuga*, *Daniellia oliveri*, *Detarium microcarpum*, *Entada Africana*, *Faidherbia albida*, *Isoberlinia spp*, *Jatropha curcas*, *Oxytenanthera abyssinica*, *Piliostigma thonnigii*, *Pterocarpus erinaceus*.

Il ressort de l'analyse documentaire effectuée que plusieurs équations allométriques ont été développées dans plusieurs pays et régions de l'Afrique. Les équations multi-spécifiques sont d'usage courant car il serait fastidieux de disposer d'équations pour chaque espèce. Dans le cas des formations écologiques du Togo, il faudrait identifier l'équation multi-spécifique la plus appropriée.

Tableau 6: Les équations allométriques multi-espèces (D=diamètre, H=hauteur et ρ =densité spécifique, B_t = biomasse totale aérienne)

N°	Nbre d'arbres	Equations	Pluviométrie (mm)	R ²	RSE (%)	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
<i>Equations avec un seul prédicteur (D)</i>									
1	91	$B_t = \exp(-1,9967 + 2,3924 \times \ln(D))$	2950	0,965	0,483	D (cm) 1-138	Campo-Ma 2°10'_-2°52'_N 9°50'_- 10°54'_E	Cameroun	Djomo et al. 2010
2	72	$B_t = 0,091 \times D^{2,472}$	1400	0,96	-	D (cm) 3-102	Lower Yala, Middle Yala and Upper Yala	Kenya	Kuyah et al. (2012a)
3	167	$B_t = 0,1027 D^{2,480}$	-	-	-		four sites of Lindi	Tanzanie	Mugasha et al. (2013)
4	113	$B_t = 2,5553 \ln(D) - 2,5265$	894,7	-	-	D 1,6-37,4	15.2167_15.28 33_S et 29.1500_ 29.2333_E	Zambie	Chidumayo (2013)
5	29	$B_t = \exp(2,601 \times \log(D) - 3,629)$	850	0,93	-	D (cm) 5-73	Nhambita 18°58'44" S, 34°10'34" E	Mozambique	Ryan et al. (2011)
6	269	$B_t = 38,4908 - 11,7883(D) + 1,1926(D)^2$	-	-	-	-	-	Pantropical	Brown et al. (1989)
7		$B_t = \exp(-1,996 + 2,32 \times \ln(D))$	-	-	-	D (cm) 5-40	Zone de forêt sèche	Sénégal	Brown et al. (1987)
8		$B_t = 0,0225 \times D^3 - 0,5167 \times D^2 + 13,613 \times D - 58,18$	-	-	-	D (cm) 5-45	Zone de savane	Sénégal	Mbow et al. (2009)

N°	Nbre d'arbres	Equations	Pluviométrie (mm)	R ²	RSE (%)	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
							soudano-guinéennes		
<i>Equations avec deux prédicteurs (D et H)</i>									
10	167	$B_t = 0,0763 \times D^{2,2046} \times H^{0,4918}$	-	-	-		Lindi	Tanzanie	Mugasha et al. (2013)
							o		
<i>Equations avec deux prédicteurs (D et ρ)</i>									
11	101	$B_t = \exp \left[-4,0596 + 4,0624 \ln D - 0,228 (\ln D)^2 + 1,4307 \ln \rho \right]$	-	-	-			Gabon	Ngomanda et al. (2014)
12	137	$B_t = \rho \times \exp \left(-1,183 + 1,940 \ln(D) + 0,239 (\ln D)^2 - 0,0285 (\ln D)^3 \right)$	-	-	-			Cameroun	Fayolle et al. (2013a)
13	91	$B_t = \exp \left(-1,8623 + 2,4023 \ln(D) - 0,3414 \ln(\rho) \right)$	2950	0,967	0,471	D (cm) 1-138	Campo-Ma 2°10'_-2°52'_N 9°50'_-10°54'_E	Cameroun	Djomo et al. (2010)
14	2410	$B_t = \rho \times \exp \left(-1,499 + 2,148 \times \ln(D) + 0,207 \times (\ln(D))^2 - 0,0281 \times (\ln(D))^3 \right)$	-	-	-	D(cm) 5-105	Forêt sèche	Pantropical	Chave et al. (2005)
<i>Equations avec trois prédicteurs (D, H et ρ)</i>									
15	101	$B_t = \exp \left[2,5680 + 0,9517 \ln(D^2 H) + 1,189 \ln \rho \right]$	-	-	-			Gabon	Ngomanda et al. (2014)
16	12	$B = 1,603 \times (\rho D^2 H)^{0,657}$	-	-	-			Cameroun	Ebuy et al. (2011)

N°	Nbre d'arbres	Equations	Pluviométrie (mm)	R ²	RSE (%)	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
17	91	$B_t = -2,4360 + 0,1399 \times (\ln D)^2 + 0,7373 \times \ln(D^2 H) + 0,2790 \ln(\rho)$	2950	0,971	0,437	D (cm) 1-138	Campo-Ma 2°10'_-2°52'_N 9°50'_- 10°54'_E	Cameroun	Djomo <i>et al.</i> (2010)
18	42	$B_t = 3,47 \times 10^{-3} \times \rho D^2 H$	-	-	-				Henry <i>et al.</i> (2010)
19		$B_t = \exp(-1,103 + 1,994 \ln(D) + 0,317 \ln(H) + 1,303 \ln(\rho))$	-	-	-	D(cm) <40			Vieilledent <i>et al.</i> (2012)
20	2410	$\ln(B_t) = -2,294 + \ln(\rho D^2 H)$					Tous les types d'écosystèmes	Afrique, Amérique, Océanie	Chave <i>et al.</i> (2005)
21	2410	$\ln(B_t) = -2,235 + 0,916 \ln(\rho D^2 H)$					Forêts sèches	Afrique, Amérique, Océanie	Chave <i>et al.</i> (2005)
22	4004	$B_t = 0.0673 (\rho * D^2 * H)^{0.976}$				D (cm) 5 - 212			Chave <i>et al.</i> (2014)
23		$B_t = 1,3087 \times 10^{-4} \times D^{2,4949} \times \rho^{1,1804}$						Afrique, soudanienne	Nakou <i>et al.</i> (2017)

Tableau 7: Equations allométriques mono espèces établies en zone Soudano- guinéenne

Espèces	n	Equations	Pluv iom étrie (mm)	R ²	RSE	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
<i>Isoberlinia sp</i>	1138	$V_f = 13,0 + 0,062 D^2 H$	1152	> à 0,93	Faible	Diamètre à 1,30 supérieur ou égale à 10 cm	Forêt classée de Wari-Marou Comprise entre 8°40' et 9°10' de latitude Nord et 1°55' et 2°25' de longitude Est	Bénin	Fonton et <i>al.</i> (2009)
<i>Anogeissus leiocarpa</i>	600	$V_f = 10,5 + 0,0555 D^2 H$	1152	> à 0,93	Faible	Diamètre à 1,30 supérieur ou égale à 10 cm		Bénin	Fonton et <i>al.</i> (2009)
<i>Daniellia oliveri</i>	400	$V_f = 18,8 + 0,0645 D^2 H$	1152	> à 0,93	Faible	Diamètre à 1,30 supérieur ou égale à 10 cm		Bénin	Fonton et <i>al.</i> (2009)
<i>Albizia adanthifolia</i>	304	$\ln(B_f) = -6.16 + 0.992 \ln(C^2 H)$	1400	0,98	0.204	C (cm) : 135-236	Togo (Kpélé-Amou) 6°45 et 8°20 N et 0°40 et 1°50 E, Sud-Ouest du Togo	Togo	Dossa <i>et al.</i> (2007)
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	1546	$V_f = 3,0195 D^{2,068}$	1000 - 1300	86,15	1,006	D(cm) : 15-40	Togo : tout le pays	Togo	Rabiou et <i>al.</i> (2015)

Bf=Biomasse fût, C=circonférence à 1,3 m du sol, H=hauteur totale, VF ?, D ?

Tableau 8: Equations allométriques mono espèces établies en zone Soudanienne

Espèces	n	Equations	Pluviométrie (mm)	R ²	RSE	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
Genre Acacia	20	$B_t = 5,066D - 0,696D^2 + 0,053D^3$	Climat semi-aride Pluviométrie variant de 600 à plus de 1000 mm	0,732	0,109	DBH (cm) 5,5 - 32	Six régions forestières comprises entre 13° et 16° Latitude Nord et 12° à 17 longitude Ouest	Sénégal	Mbow et <i>al.</i> (2014)
Genre Combretum	45	$B_t = -3,524D + 0,946D^2 - 0,010D^3$	Climat semi-aride Pluviométrie variant de 600 à plus de 1000 mm	0,923	0,127	DBH (cm) 5,1 - 27,1	Six régions forestières comprises entre 13° et 16° Latitude Nord et 12° à 17 longitude Ouest	Sénégal	Mbow et <i>al.</i> (2014)
Genre Terminalia	9	$B_t = 9,255D - 1,563D^2 + 0,089D^3$	Climat semi-aride Pluviométrie variant de 600 à plus de 1000 mm	0,993	0,160	DBH (cm) 5,7 - 41,5	Six régions forestières comprises entre 13° et 16° Latitude Nord et 12° à 17 longitude Ouest	Sénégal	Mbow et <i>al.</i> (2014)
Genre Acacia	20	$B_t = -0,566H - 0,588H^2 + 0,372H^3$	Climat semi-aride Pluviométrie variant de 600 à plus de 1000 mm	0,534	0,094	Hauteur (H) (m) 2,5–12,4	Six régions forestières comprises entre 13° et 16° Latitude Nord et 12° à 17 longitude Ouest	Sénégal	Mbow et <i>al.</i> (2014)
Genre Combretum	45	$B_t = 6,071H - 0,959H^2 + 0,225H^3$	Climat semi-aride Pluviométrie variant de 600	0,737	0,113	Hauteur (H) (m) 2,5–12,8	Six régions forestières comprises entre 13° et 16° Latitude	Sénégal	Mbow et <i>al.</i> (2014)

Espèces	n	Equations	Pluviométrie (mm)	R ²	RSE	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
			à plus de 1000 mm				Nord et 12° à 17 longitude Ouest		
Genre Terminalia	9	$B_t = 1,097H - 2,080H^2 + 0,472H^3$	Climat semi-aride Pluviométrie variant de 600 à plus de 1000 mm	0,988	0,161	Hauteur (H) (m) 4,5–12	Six régions forestières comprises entre 13° et 16° Latitude Nord et 12° à 17 longitude Ouest	Sénégal	Mbow et <i>al.</i> (2014)
<i>Jatropha curcas</i>	46	$B_t = 0,897S_h^{1,224}$	815	0,803	Faible	DBH (cm) Supérieur à 6cm	Koulikoro Climat semi-aride	Mali	Degerickx et <i>al.</i> (2016)
<i>Oxytenanthera abyssinica</i>	34	$\ln B_t = -1,404 + 0,109 \ln G + -0,147 \ln D_{10} + 0,601 \ln H + 1,032 \ln D$	1712	0.87	0.148	Diamètre supérieur ou égal à 1,5 cm 1.592 à 4.459	Forêt de Dicho 9°41'00" à 9°50'00"N et 36°35'03" à 36°44'00"E	Ethiopie	Gurmessa et <i>al.</i> (2016)
<i>Oxytenanthera abyssinica</i>		$\ln B_t = 1,524 + 0,222H + 0,650D + 1,222 \times \rho$	1712	0,89	0,318		Forêt de Dicho 9°41'00" à 9°50'00"N et 36°35'03" à 36°44'00"E	Ethiopie	Gurmessa et <i>al.</i> (2016)
<i>Acacia bussei</i> Harms ex Sjoestedt.	20	$\ln(B_t) = -5,6308 + 2,5838 \ln(C_B)$	238-896 Climat aride et semi-aride	0,96	Faible	Circonférence basale (cm) 5-10	Région de Borana (District de Yabelo) (41 06 95 E, 51 79 74 N)	Ethiopie	Hasen-Yusuf et <i>al.</i> (2013)
Acacia	20		238-896	0,96	Faible	Circonférence	Région de Borana	Ethiopie	Hasen-

Espèces	n	Equations	Pluviométrie (mm)	R ²	RSE	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
mellifera (Vahl.) Benth.		$\ln(B_t) = -2,7777 + 0,963 \ln(SB) + 0,7503 \ln(CV)$				basale (cm) 5-10	(District de Yabelo) (41 06 95 E, 51 79 74 N)	e	Yusuf et <i>al.</i> (2013)
<i>Acacia etabaica</i> <i>Schweinf.</i>	20	$\ln(B_t) = -7,0822 + 2,877 \ln(C_B)$	238-896	0,96	Faible	Circonférence basale (cm) 5-10	Région de Borana (District de Yabelo) (41 06 95 E, 51 79 74 N)	Ethiopie	Hasen-Yusuf et <i>al.</i> (2013)
<i>Acacia senegal</i> (L.) Willd.	20	$\ln(B_t) = -1,5515 + 0,5579 \ln(SB) + 0,5922 \ln(CV)$	238-896	0,82	Faible	Circonférence basale (cm) 5-10	Région de Borana (District de Yabelo) (41 06 95 E, 51 79 74 N)	Ethiopie	Hasen-Yusuf et <i>al.</i> (2013)
<i>Acacia drepanolobium</i> Harms ex Sjoest.	20	$\ln(B_t) = -3,3387 + 1,1296 \ln(SB) + 1,7012 \ln(H)$	238-896	0,84	Faible	Circonférence basale (cm) 5-10	Région de Borana (District de Yabelo) (41 06 95 E, 51 79 74 N)	Ethiopie	Hasen-Yusuf et <i>al.</i> (2013)
<i>Acacia oerfota</i> (Forssk.) <i>Schweinf.</i>	20	$\ln(B_t) = -1,32 + 1,1084 \ln(CV)$	238-896	0,85	Faible	Circonférence basale (cm) 5-10	Région de Borana (District de Yabelo) (41 06 95 E, 51 79 74 N)	Ethiopie	Hasen-Yusuf et <i>al.</i> (2013)
<i>Acacia reficiens</i> <i>Wanra.</i>	20	$\ln(B_t) = 0,1774 + 0,872 \ln(CV)$	238-896	0,88	Faible	Circonférence basale (cm) 5-10	Région de Borana (District de Yabelo) (41 06 95 E, 51 79 74 N)	Ethiopie	Hasen-Yusuf et <i>al.</i> (2013)

Espèces	n	Equations	Pluviométrie (mm)	R ²	RSE	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
<i>Commiphora africana</i> (A. Rich.)	20	$\ln(B_t) = -2,7882 + 1,1324 \ln(SB) + 0,3163 \ln(CV)$	238-896	0,93	Faible	Circonférence basale (cm) 5-10	Région de Borana (District de Yabelo) (41 06 95 E, 51 79 74 N)	Ethiopie	Hasen-Yusuf et al. (2013)
<i>Jatropha curcas</i>	390	$B_{est} = 1,01 - 0,609D + 0,089 D^2$	800-900	0,95		Dbh <20 cm	Boni (11_29°N et 3_23°W)	Burkina Faso	Bayen et al. (2015)
<i>Acacia dudgeoni</i>	558	$B_{est} = 0,938 + 0,119D_b + 0,099D + 0,001H - 0,004D_b D$	845-886	0,569		Dbh (cm) : 8.98±0.123	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadogo et al. (2010)
<i>Acacia macrostachya</i>	523	$B_t = 3,935 - 0,0199D_b - 0,088D - 0,007H + 0,017D_b D + 0,0008D_b \times H + 0,006DH - 0,00006D_b DH$	845-886	0,428		Dbh (cm) : 7.206±0.110	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadogo et al. (2010)
<i>Anogeissus leiocarpa</i>	120	$B_t = 0,889 + 0,107D_b + 0,304D + 0,004H - 0,006D_b D - 0,00002DH + 0,000004D_b DH$	845-886	0.905		Dbh (cm): 19.752±1.173	Burkina Faso Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadogo et al. (2010)
<i>Combretum ghasalense</i>	433	$B_t = 0,961 + 0,086D_b + 0,168D + 0,0009H - 0,004D_b D$	845-886	0.708		Dbh (cm): 8.975±0.196	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadogo et al. (2010)
<i>Combretum glutinosum</i>	103		845-886	0.852		Dbh in cm: 9.594±0.392	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N,	Burkina Faso	Sawadogo et al.

Espèces	n	Equations	Pluviométrie (mm)	R ²	RSE	Paramètres dendrométriqu es	Localités	Pays	Auteurs
		$B_t = 0,661 + 0,121D_b + 0,190D - 0,005D_b D$					2°42' W)		(2010)
<i>Combretum micranthum</i>	89	$B_t = 0,827 + 0,184D_b + 0,0337D - 0,001D_b D + 0,0004DH$	845-886	0.671		Dbh in cm:7.490±0.379	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadog o et <i>al.</i> (2010)
<i>Combretum nigricans</i>	98	$B_t = 0,213 + 0,0132D_b + 0,204D + 0,0007H - 0,005D_b D$	845-886	0.900		Dbh (cm):17.509±0.6 94	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadog o et <i>al.</i> (2010)
<i>Crossopterix febrifuga</i>	253	$B_t = 0,933 + 0,030D_b + 0,178D + 0,002H - 0,002D_b D + 0,00007D - 0,0002DH - 0,0001D \times H$	845-886	0,800		Dbh (cm) 15.293±0.355	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadog o et <i>al.</i> (2010)
<i>Detariummicr o carpum</i>	1177	$B_t = 0,758 + 0,028D_b + 0,237D + 0,0009H - 0,003D + 0,0001D - 0,0002DH$	845-886	0,731		Dbh (cm):12.731±0.1 05	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadog o et <i>al.</i> (2010)
<i>Entada Africana</i>	957	$B_t = 0,232 + 0,101D_b + 0,141D + 0,002H - 0,004D_b D$	845-886	0,763		Dbh (cm) :9.920±0.123	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadog o et <i>al.</i> (2010)
<i>Piliostigma thonnigii</i>	443	$B_t = 0,358 + 0,100D_b + 0,169D + 0,001H - 0,004D_b D$	845-886	0,693		Dbh (cm) : 9.303±0.167	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadog o et <i>al.</i> (2010)

B_t= Biomasse totale aérienne, Sh= Surface du houppier, G=surface terrière, D₁₀= diamètre à 10 cm du sol, CV=volume houppier, CB=Circonférence a la base de la tige principale

Tableau 9: Equations établies en zone sahélienne

Espèces	n	Equations	Pluviométrie (mm)	R ²	RSE	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
Acacia senegal	44	$B_t = 0,0323D^3 - 1,0169D^2 + 10,873D + 7,4298$	Climat semi-aride, chaud 300mm (CSE, 2009)	0,9632	Faible	Diamètre (cm) 2,5-15	Zone sylvopastorale : sud du bassin du fleuve Sénégal 15° 53' N 15° 15' W 15,88	Sénégal	Thiam et <i>al.</i> (2014)
<i>Faidherbia albida</i>	14	$Y = 0,112X^{2,23}$	503,17 mm	0,96	0,428	Dbh (cm) 7,3 - 36,6	(Maradi)	Niger	Laminou et <i>al.</i> (2015)

B_t, la biomasse totale aérienne, D=Diamètre à 1,3 m du sol

4. Méthodologie développée

4.1. Approche générale d'estimation du stock de carbone

L'estimation du stock de carbone au niveau des écosystèmes est basée sur l'estimation de la biomasse de l'arbre, ensuite au niveau de la parcelle à l'hectare puis, par extrapolation au niveau de l'écosystème forestier et enfin au niveau national au besoin comme le montre la figure 3..

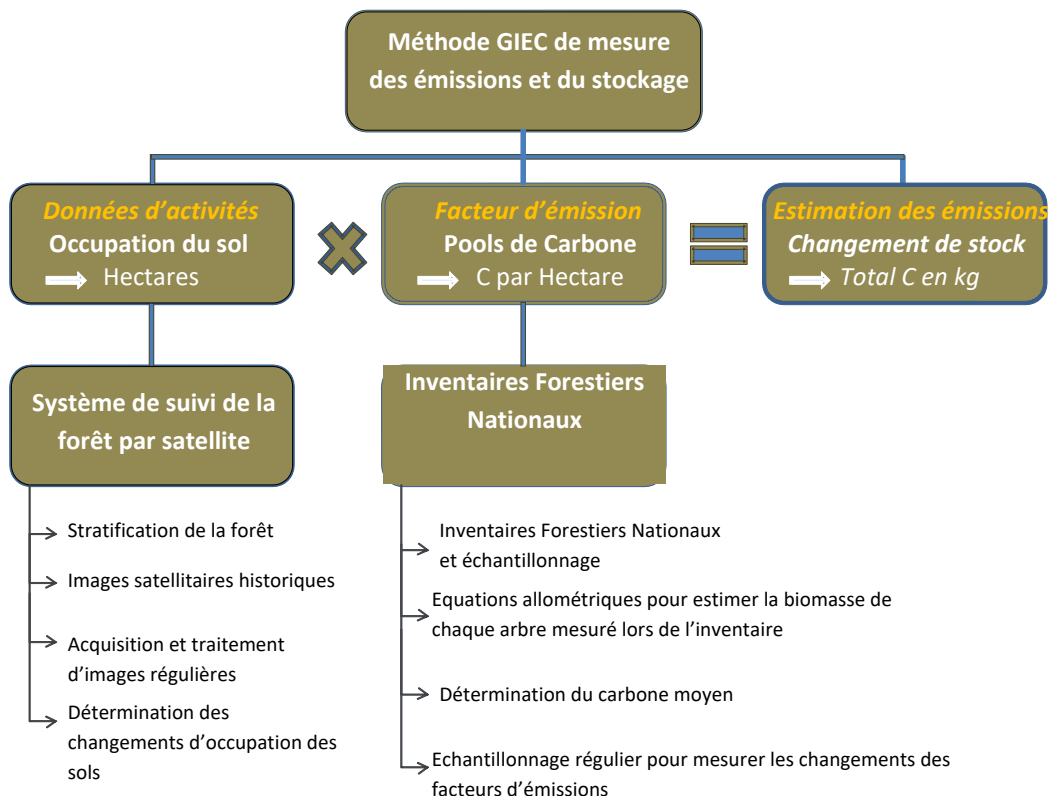


Figure 3: Aperçu des composants nécessaires à un système MRV (Scénario de base et suivi)

Selon la RPP du Togo, les compartiments des puits de carbone sont :

- la biomasse aérienne ;
- le carbone organique du sol ;
- la biomasse racinaire.

Pour leur quantification, les méthodes de GIEC basées sur les Tiers sont proposées. Il s'agit pour la biomasse aérienne, du Tiers 3, pour celle du carbone du sol du Tiers 2, tandis que le Tiers 1 est celui retenu pour la biomasse racinaire. Il faut préciser que les compartiments non retenus sont la biomasse des bois mort et de la litière (matière organique morte). Les niveaux d'incertitudes sur

les estimations diminuent du Tiers 1 à Tiers 3. Selon les recommandations du GIEC (IPCC, 2003, 2006), ces méthodes dépendent de la quantité de données nécessaires et de la complexité qu'elles exigent pour l'évaluation des stocks de carbone.

Pour la présente étude, il s'agit de faire le choix d'un modèle allométrique d'estimation de la biomasse aérienne pour répondre aux exigences de la RPP. Ensuite la biomasse racinaire et le stock du carbone du sol seront estimés en lien avec la RPP.

4.2. Choix du modèle de prédiction de la biomasse aérienne

Le choix du modèle d'estimation de la biomasse a été réalisé par la comparaison de plusieurs modèles allométriques d'estimation de la biomasse.

Pour l'évaluation de la qualité de prédiction des modèles, les équations ayant fait objet de publications scientifiques et d'usage courant pour l'estimation de la biomasse des forêts tropicales, en l'occurrence les forêts sèches, de même que pantropicales, ont été recensées. Leur qualité de prédiction a été évaluée avec le jeu de données de biomasse de 20 arbres échantillons pour le choix de la meilleure équation d'estimation de la biomasse.

4.2.1. Echantillonnage et collecte des données de biomasse des arbres échantillons

L'analyse des données d'inventaire forestier national a permis d'identifier les espèces à fortes valeurs d'indice d'importance dans les deux régions les plus pourvues en ressources forestières du pays. Les 4 premières espèces à valeurs d'indice d'importance élevées ont été retenues. Il s'agit de : *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertner subsp. *Paradoxa* et *Lannea acida* A. Rich. 20 arbres-échantillons sont choisis et répartis en 5 classes de diamètre de référence (tableau 1).

Tableau 10: Plan d'échantillonnage de la collecte des données de biomasse

Espèces	10-20	20-30	30-40	40-50	>50	Total
<i>Anogeissus leiocarpus</i>	1	1	1	1	1	5
<i>Pterocarpus erinaceus</i>	1	1	1	1	1	5
<i>Vitellaria paradoxa</i> subsp. <i>Paradoxa</i>	1	1	1	1	1	5
<i>Lannea acida</i>	1	1	1	1	1	5
Total						20

Les arbres-échantillons ont été localisés en se servant de la base de données de l'IFN. En effet, avec les données de l'IFN, l'abondance d'une espèce dans les placettes d'inventaire présage de sa présence dans leur environnement immédiat. Une analyse des données de l'IFN a été faite pour

relever la liste de ces placettes et leurs coordonnées géographiques relevées. A l'aide du GPS, un cheminement a été fait vers chaque placette au cours duquel les arbres échantillons ont été sélectionnés..

Avant l'abattage, différentes informations ont été notées sur la position (coordonnées géographiques, localité) et l'environnement (type de formation végétale) de l'arbre sur pied, et différentes mesures ont été réalisées sur la taille et l'architecture de l'arbre. Les mesures dendrométriques portent sur les variables d'entrée des équations allométriques : le diamètre de référence, la hauteur totale et les rayons du houppier dans les quatre directions (Nord, Sud, Est et Ouest).

Après l'abattage, la longueur totale de la tige a été mesurée. L'arbre a été ensuite subdivisé en compartiments, la souche, la bille, les grosses branches, les moyennes branches, les petites branches et, les feuilles/fleurs/fruits.

Le houppier a été tout d'abord subdivisé en compartiments, les grosses branches (diamètre gros bout ≥ 20 cm), les moyennes branches (entre 6 et 19 cm de diamètre gros bout), les petites branches (diamètre gros bout ≤ 5 cm) et, les feuilles/fleurs/fruits. Les branches ont été coupées en petits billons et/ou éléments transportables et pesables. Les branches présentes sur la bille ou la grume ont été incorporées aux tas de branches venant du houppier. Les branches mortes ont été également pesées.

Les mesures en laboratoire réalisées sur les échantillons de bois ont pour but de déterminer deux paramètres extrêmement importants, l'infra-densité (ID) et la teneur en eau (TE), respectivement utilisés pour convertir les volumes issus du cubage et les biomasses fraîches issues des pesées en biomasses sèches. L'infra-densité correspond au rapport entre la masse anhydre et le volume saturé ou volume à l'état vert d'un échantillon. Conformément à la définition internationale, le terme « biomasse » employé ici correspond à la masse anhydre (matière sèche) constant pour un séchage à 65°C pour les feuilles/fleurs/fruits et 105°C pour le bois.

La biomasse aérienne totale (AGB_{obs}) de chaque arbre échantillon a été déterminée. Elle est la somme de la biomasse de la souche (Bs), de la biomasse du fût (Bf), de la biomasse des branches (Bb) et éventuellement de la biomasse feuilles/fleurs/fruits.

4.2.2. Equations allométriques comparées

Quinze équations multi-spécifiques, dont 5 pantropicales et une régionale Afrique tropicale, ont été retenues pour l'évaluation de la qualité de prédiction de la biomasse aérienne (AGB) des types forestiers échantillonnés (Tableau 11.).

Tableau 11. Equations allométriques retenues pour l'étude de la qualité de prédiction
AGB=biomasse aérienne de l'arbre en kg, D=diamètre à hauteur de référence en cm, ρ =infra-
densité en g/cm³

N°	Auteurs	Equations allométriques	lieu
Eq1	Vieilledent et al. (2012)	$AGB_{est} = \exp(-1,103 + 1,994 \times \ln D + 0,317 \times \ln H + 1,303 \times \ln \rho)$	Madagascar forêt sèche
Eq2	Nakou et al. (2017)	$AGB = 0,13087 \times D^{2,4949} \times \rho^{1,1804}$	Benin Soudanien
Eq3	Ngomanda et al. (2014)	$AGB = \exp(-4,0596 + 4,0624 \times \ln D - 0,228 \times (\ln D)^2 + 1,4307 \times \ln \rho)$	Gabon
Eq4	Fayolle et al. (2013)	$AGB = \rho \times \exp(-1,183 + 1,940 \times \ln D + 0,239 \times (\ln D)^2 - 0,0285 \times (\ln D)^3)$	Cameroun
Eq5	Djomo et al. (2010)	$AGB = \exp(-1,8623 + 2,4023 \times \ln D - 0,3414 \times \ln \rho)$	Cameroun
Eq6	Chave et al. (2005)	$AGB = \rho \times \exp(-1,499 + 2,148 \times \ln D + 0,207 \times (\ln D)^2 - 0,0281 \times (\ln D)^3)$	Pantropical forêt humide
Eq7	Ngomanda et al. (2014)	$AGB = \exp(-2,5680 + 0,9517 \times \ln(D^2 \times H) + 1,189 \times \ln \rho)$	Gabon
Eq8	Henry et al. (2010)	$AGB = 0,00347 \times (\rho \times D^2 \times H)$	Ghana
Eq9	Djomo et al. (2010)	$AGB = \exp(-2,4360 + 0,1399 \times (\ln D)^2 + 0,7373 \times \ln(D^2 \times H) + 0,2790 \times \ln \rho)$	Cameroun
Eq10	Chave et al., (2014)	$AGB = 0,0509 \times (\rho \times D^2 \times H)$	Pantropical
Eq11	Chave et al., (2014)	$AGB = 0,0673 \times (\rho \times D^2 \times H)^{0,976}$	Pantropical
Eq12	Djomo et al., (2016)	$AGB = \exp(-2,308 + 1,325 \times \ln D + 0,469 \times \ln(D^2 \times H) + 0,802 \times \ln \rho)$	Afrique
Eq13	Chave et al., (2005)	$AGB = \rho \times \exp(-0,667 + 1,784 \times \ln D + 0,207 \times (\ln D)^2 - 0,0281 \times (\ln D)^3)$	Pantropical forêt sèche
Eq14	Chave et al., 2005	$AGB = \exp(-2,235 + 0,916 \times \ln(\rho \times D^2 \times H))$	Pantropical forêt sèche
Eq15	Djomo et Chimi, 2017	$AGB = 0,0799 \times (D^2 \times H)^{0,939} \times \rho^{0,891}$	Cameroun

Elles ont été établies dans les écosystèmes de type *moist* et *dry* notamment au Cameroun (Djomo et al., 2010 et Fayolle et al., 2013, Djomo et Chimi, 2017), au Gabon (Ngomanda et al. 2014), au Ghana (Henry et al. 2010), avec les données de l'Afrique tropicale (Djomo et al., 2016, Vieilledent et al., 2012). Les équations pantropicales de Chave et al. (2005 et 2014) ont été aussi retenues pour les types forestiers *moist* et *dry*.

Deux types d'erreur de prédiction ont été déterminés pour chaque arbre *i*. Il s'agit de l'erreur de prédiction ($e_i = AGB_{obs,i} - AGB_{p,i}$) et de l'erreur de prédiction relative par rapport à la valeur observée ($er_i = e_i / AGB_{obs,i}$) avec $AGB_{obs,i}$ la biomasse observée et $AGB_{p,i}$ la valeur prédite

de l'arbre i . Pour évaluer la qualité de prédiction de chaque équation avec les données de biomasse des 20 arbres-échantillons, l'erreur quadratique moyenne de prédiction ($EQMP$) et l'erreur relative moyenne absolue de prédiction ($ERAMP$) ont été calculées.

$$EQMP = \sqrt{\frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} e_i^2}$$

$$ERAMP = \frac{100}{n'} \sum_{i=1}^{n'} |er_i|$$

Ces deux paramètres $EQMP$ et $ERAMP$ sont généralement utilisés pour l'appréciation de la qualité de prédiction des modèles de régression (Miller, 1990 ; de Myttenaere et al., 2016). $EQMP$ est encore appelé *Mean Square Error of Prediction* (MSEP), et $ERAMP$ est l'équivalent de *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). Une équation ayant de bonnes qualités prédictives par rapport aux autres est caractérisée par la plus faible valeur de ces deux paramètres. Ensuite, pour chaque arbre i et par équation, l'erreur absolue relative ($EAR_i\%$) a été déterminée, soit $EAR_i\% = 100 \times |er_i|$ qui peut être assimilée à un biais relatif de prédiction. Les nombres en pourcent d'arbres ($N\%$) ont été calculés par équation pour $EAR_i\%$ inférieures ou égales au seuil de 10%, 20%, 30%, 40% et 50%. Une équation dont les $N\%$ associés sont les plus élevés pour un seuil donné, apparaît comme la meilleure en matière de prédiction par rapport aux autres. Le biais global a été aussi déterminé pour préciser s'il a surestimation ou sous-estimation de la biomasse des arbres-échantillons, soit :

$$biais = \sum_{i=1}^n (AGB_{p,i} - AGB_{obs,i}) / AGB_{obs,i}.$$

4.3. Estimation du carbone forestier

4.3.1. Estimation de la biomasse totale de chaque arbre

Avec l'équation allométrique retenue (paragraphe IV.2), la biomasse aérienne de chaque arbre des placettes de l'IFN a été estimée. A cette biomasse, a été ajoutée la biomasse souterraine racinaire des arbres pour l'obtention de la biomasse totale B_{tot} . La biomasse souterraine est estimée à environ 20% de la biomasse aérienne (IPCC, 2006). Mokany et al. (2006) ont été proposé d'autres valeurs de conversion propres à chaque écosystème et en relation avec la quantité de biomasse à l'hectare. Elles peuvent être utilisées pour les résultats finaux de détermination du scénario de base.

4.3.2. Estimation de la biomasse et du carbone total de chaque placette

La quantité totale de carbone séquestrée par placette est la somme des quantités de carbone des différents compartiments à savoir : le carbone des arbres vivants et morts, le carbone foliaire, le carbone du sol et de la litière. Les biomasses vivante et morte sont estimées par l'équation allométrique retenue. La quantité de carbone séquestré a été obtenue en multipliant la biomasse totale de la placette par 0,47 (facteur de conversion de la biomasse en carbone, FAO, Lignes directrices GIEC, Tableau 4.3).

La somme de chacune de ces valeurs donne la quantité totale de carbone séquestrée de la placette. Cette quantité a été ramenée à l'hectare en la multipliant par $10^4/S$; S étant la surface en m^2 de chaque placette d'inventaire ($S=20*20*\pi$).

4.4. Estimation du carbone du sol

L'estimation du carbone du sol a été réalisée en utilisant le système SoilGrids développé par Hengl et al. (2014 ; 2017). Des échantillons de sol ont été collectés à travers le monde, et les caractéristiques physico-chimiques (carbone, densité apparente, pH, etc.) correspondantes déterminées. Ce système de SoilGrids à la résolution de 250m (juin 2016 mise à jour) fournit des prévisions globales pour les propriétés numériques standard de sol (carbone organique, densité de la masse, capacité d'échange cationique (CCE), pH, fractions de texture de sol et fragments bruts) à sept profondeurs standard (0, 5, 15, 30, 60, 100 et 200 le cm) (Hengl et al., 2017) et des cartes de prédiction globale ont été réalisées suivant la profondeur du sol (www.soilgrids.org). Ces cartes sont facilement accessibles et permettent un téléchargement des informations géo-référencées. Dans le cadre de ce travail, la quantité de carbone du sol de chaque point d'échantillonnage de l'IFN a été extraite sur la profondeur 0-30 cm.

4.5. Relation Carbone et Indice de végétation (NDVI)

L'établissement de la relation du carbone séquestré en fonction de l'indice de végétation avec les données de placettes d'inventaire permet de cartographier le stock de carbone sur l'ensemble d'une région ou d'un territoire national donné (Chenge & Osho, 2018, Zhu X. & Liu D., 2015, Adeniyi P.A. & Ezekiel A. 2015).

Les indices de végétation les plus simples sont basés sur des opérations arithmétiques entre deux bandes spectrales, généralement le rouge et le proche infrarouge, mais également les bandes du

proche et du moyen infrarouge. Dans le cadre de ce travail, l'indice de végétation par différence normalisé ou indice de Tucker (NDVI), qui est l'indice le plus connu et le plus utilisé a été choisi.

Son expression est la suivante :

$$NDVI = \frac{\rho_{PIR} - \rho_R}{\rho_{PIR} + \rho_R} \quad \text{où}$$

ρ_{PIR} est la réflectance dans le proche infra-rouge

ρ_R est la réflectance du rouge

Théoriquement, les valeurs du NDVI sont comprises entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge. Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7 ; les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses.

Dans un premier temps, pour chaque placette de l'IFN, l'indice NDVI a été calculé à partir des images satellitaires avec le logiciel QGIS. Après une analyse exploratoire sur la qualité des modèles de régression une meilleure équation de la quantité de carbone séquestrée en fonction de l'indice de végétation NDVI a été retenue. Cette équation a été utilisée pour générer une couche qui représente la quantité de Carbone séquestrée sur l'ensemble du territoire national.

5. Détermination de la biomasse et du carbone par placette et par type forestier

5.1. Description des données de biomasse échantillons

Les arbres-échantillons appartiennent aux types forestiers de forêt claire et de savane arborée et à quatre espèces les plus importantes sur la base des résultats de l'IFN. Les grosseurs en diamètre varient de 14,5 cm à 74,5 cm, la hauteur totale de 7,20 m à 26,9 m (Tableau 13).

Les valeurs de l'infra-densité déterminées avec cette étude sont conformes aux valeurs des différentes tables de densité du bois, notamment celle des espèces en zone soudanienne d'Afrique (WAF, Global wood density, CIFOR ; Dryad). Pour les arbres de petits diamètres, les valeurs obtenues sont inférieures alors qu'elles sont supérieures pour les gros diamètres. Ces résultats corroborent avec ceux des divers travaux en la matière (Wassenberg et *al.*, 2015).

Quant à la répartition de la biomasse pour les différentes parties de l'arbre, elle est en moyenne de l'ordre de 2,6%, 36,5% et 60,6% respectivement pour la souche, le fût et le houppier.

Tableau 12: Données de biomasse des 20 arbres échantillons : dbh=diamètre à 1,30 m en cm, ht=hauteur totale en m, hf= hauteur fut en m, wsd=infra-densité, GB=grosses branches, MB=moynnes branches, PB=petites branches

N°	Espèce	Type forestier	dbh	hf	ht	wsd	Biomasse bois anhydre en Kg					Feuille	Total
							Souche	Fût	GB	MB	PB		
1	Vitellaria paradoxa	Savane arborée	41,1	2,6	11,4	0,741	8,4	234,2	571,2	282,7	179,1	34,6	1310,2
2	Vitellaria paradoxa	Savane arborée	57,6	4,9	14,5	0,811	64,0	651,2	1546,4	748,3	510,2	24,1	3544,2
3	Lannea acida	savane boisée	47,4	6,4	13,5	0,523	25,9	299,7	77,0	165,7	53,8	0,0	622,0
4	Pterocarpus erinaceus	Forêt claire	50,3	3,9	14,9	0,644	39,4	324,8	658,7	353,9	232,7	7,5	1617,0
5	Pterocarpus erinaceus	forêt claire	43,8	4,6	14,5	0,736	23,5	267,8	337,9	263,2	130,7	0,0	1023,1
6	Pterocarpus erinaceus	Savane arborée	31,8	3,8	15,3	0,623	16,5	121,2	109,8	95,8	83,8	0,1	427,1
7	Lannea acida	Savane arborée	14,5	6,3	7,9	0,477	1,6	33,2	0,0	4,1	3,6	0,0	42,5
8	Lannea acida	Savane arborée	26,3	7,7	12,5	0,468	6,8	123,2	26,9	20,3	18,6	0,0	195,8
9	Lannea acida	Savane arborée	35	2,3	8,7	0,476	7,7	67,1	102,2	109,3	35,9	0,0	322,2
10	Vitellaria paradoxa	Savane arborée	34,7	3,1	9,7	0,736	20,6	176,4	188,8	253,6	106,0	0,0	745,4
11	Anogeissus leiocarpus	Savane arborée	35,6	5,2	16	0,724	33,1	208,9	79,0	270,1	114,2	1,1	706,3
12	Anogeissus leiocarpus	Savane arborée	21,5	6,2	14,4	0,652	4,4	149,6	0,0	73,5	31,6	0,0	259,2
13	Pterocarpus erinaceus	Savane arborée	16,2	5,3	11,1	0,543	1,3	47,6	0,0	24,7	14,5	0,0	88,0
14	Anogeissus leiocarpus	Savane arborée	74,5	9,8	26,9	0,761	117,2	1315,9	760,3	345,6	173,8	0,5	2713,3
15	Anogeissus leiocarpus	Savane arborée	40,3	2,9	16,1	0,758	24,3	235,9	430,9	187,2	150,2	12,8	1041,3
16	Anogeissus leiocarpus	Savane arborée	16,9	2,5	10,7	0,710	2,6	34,9	0,0	64,4	18,4	0,4	120,7
17	Pterocarpus erinaceus	Savane arborée	23,7	3,8	11,4	0,615	8,1	72,4	0,0	126,3	45,9	1,6	254,3
18	Vitellaria paradoxa	Savane arborée	14,7	4,4	7,2	0,587	1,7	41,5	0,0	17,5	12,2	0,2	73,1
19	Lannea acida	Savane arborée	59,2	6,2	17,2	0,559	12,4	344,2	1079,1	158,6	68,5	0,0	1662,9
20	Vitellaria paradoxa	Savane arborée	28,3	3,1	8,1	0,662	4,6	122,3	0,0	133,6	67,1	1,7	329,2

L'allométrie biomasse aérienne et diamètre suit la même allure que celle couramment observée comme le montre la figure 4 avec la transformation logarithmique qui fournit une réduction de la variabilité autour d'une droite.

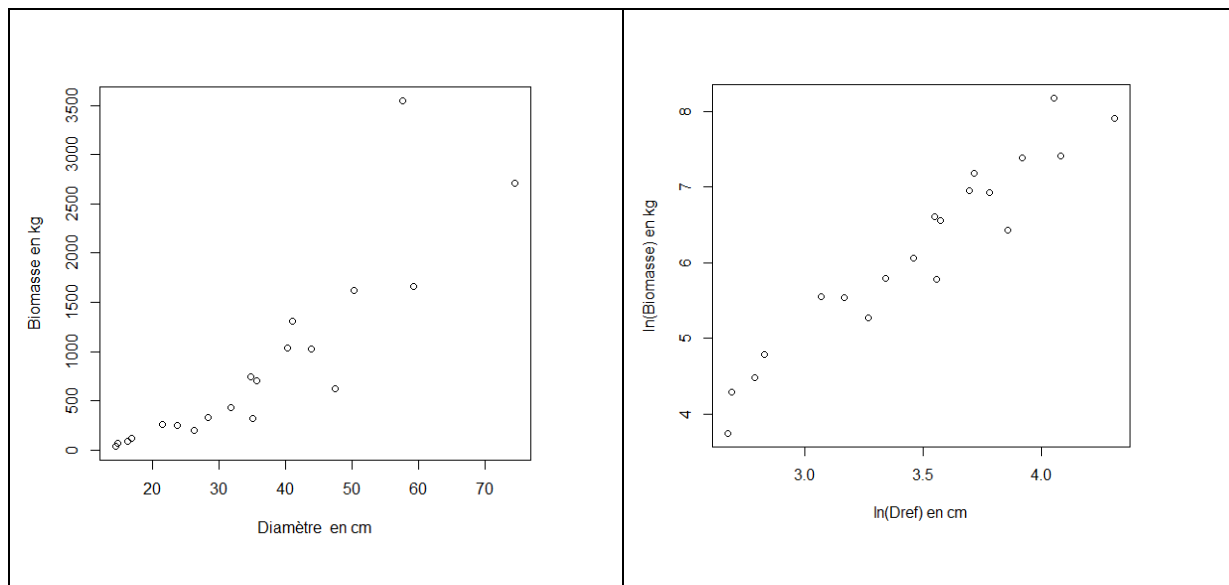


Figure 4: Distribution du nuage de point de biomasse aérienne en fonction du diamètre (a) et aussi à échelle logarithmique

4.2. Meilleure équation d'estimation de biomasse aérienne

L'erreur quadratique moyenne de prédiction de la biomasse des 20 arbres échantillons varie entre 454 à 1606 kg par arbre. Quant au biais relatif, il varie entre 19% et 100%. Tous ces résultats sont présentés à l'annexe 1.

L'erreur quadratique moyenne la plus faible est obtenue avec Eq1 (Nakou et al., 2017 , et Eq1 (Vieilledent et *al.*, 2012) suivies des Eq7, 8 et 13 comme le montre la figure 5. Par rapport au biais relatif, Eq1 se caractérise par la plus faible valeur suivie de Eq2 (Figure 6).

En observant le nombre d'arbre en pourcent d'arbres inférieur à une erreur absolue relative de 10% et 20%, il ressort que l'équation allométrique Eq1 est la meilleure avec un nombre de 40% et 65% respectivement pour 10% et 20% d'erreur relative absolue (Figure 7). De même, en analysant les résultats avec le paramètre biais (Figure 8), il ressort que le modèle 1 se caractérise par un biais pratiquement nul comme les modèles 2, 7, 8, et 13. En combinant les 5 critères de choix, le modèle allométriques qui apparaît le plus approprié est celui de Vieilledent et *al.* (2012) avec trois prédicteurs qui s'écrit :

$$AGB_{est} = \exp(-1,103 + 1,994 \times \ln D + 0,317 \times \ln H + 1,303 \times \ln \rho)$$

Cette équation été retenue pour estimer la biomasse des arbres inventoriés lors de l'inventaire forestier national du Togo.

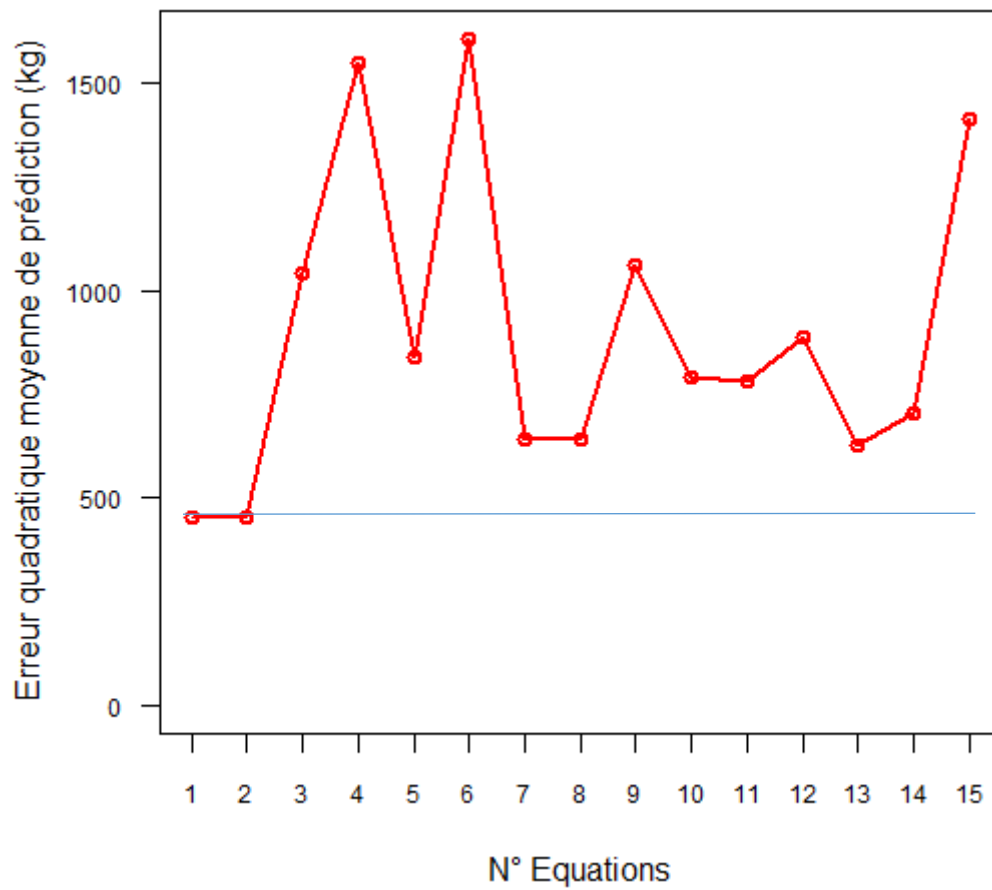


Figure 5: Evolution de l'Erreur quadratique moyenne de prédiction en fonction des modèles allométriques comparés

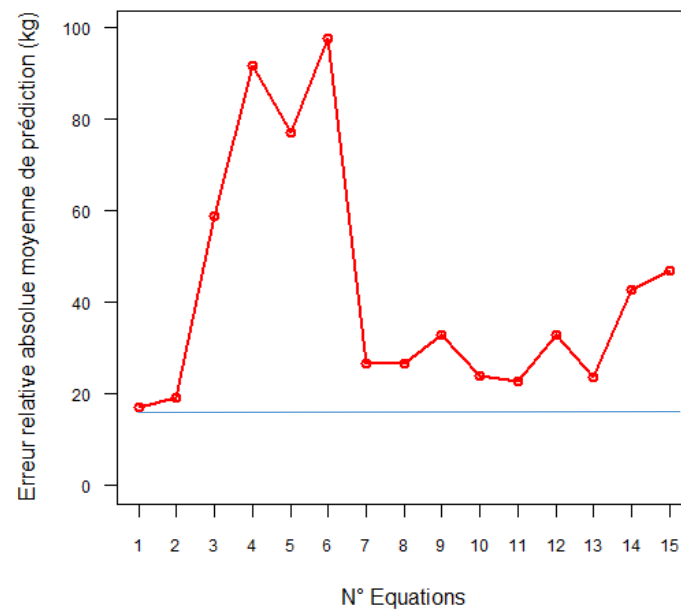


Figure 6: Evolution de l'Erreur Relative Absolue Moyenne de Prédiction en fonction des modèles allométriques comparés

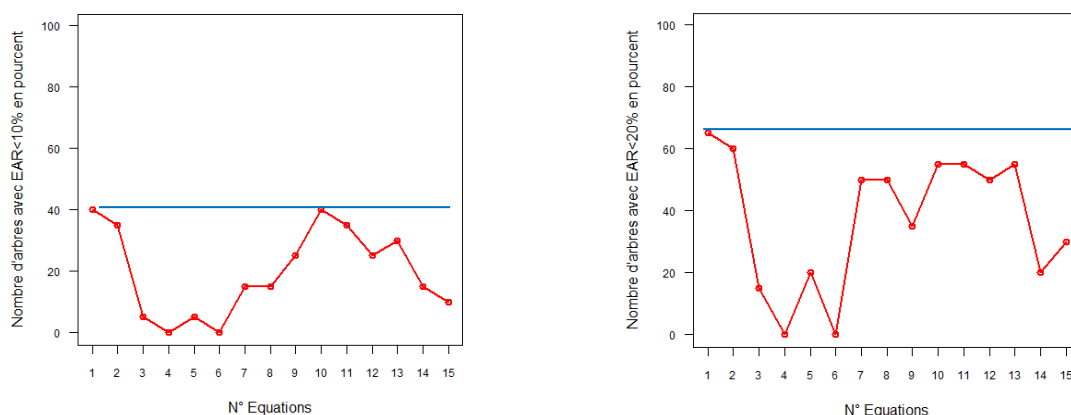


Figure 7: Evolution du nombre d'arbre en pourcent dont l'Erreur Absolue relative prédiction est inférieure à 10% et 20% en fonction des modèles allométriques comparés

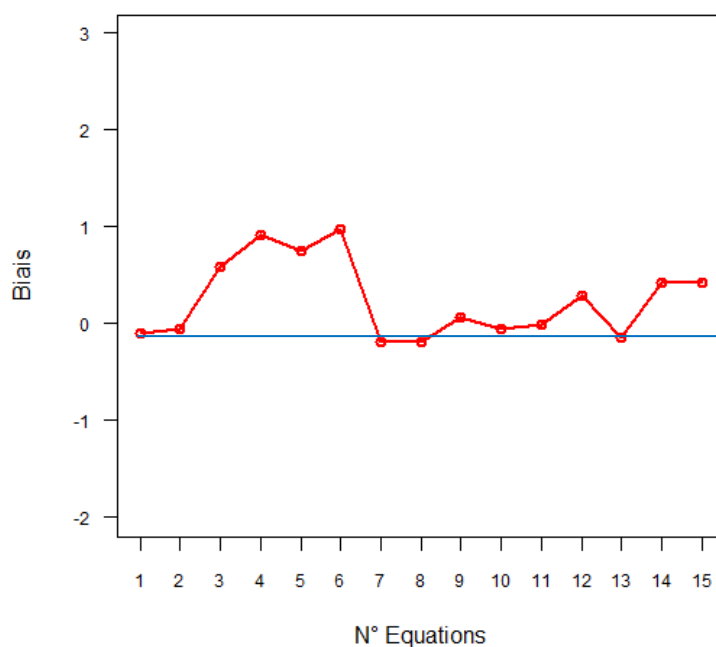


Figure 8: Biais en fonction des modèles allométriques comparés

4.3. Biomasse par placette et par type forestier

La biomasse aérienne par placette inventoriée varie de 0,21 t à 245,22 t par ha avec une moyenne de 40,37 t/ha. Globalement, les forêts denses, les forêts claires et les forêts riveraines/marécageuses sont caractérisées par des valeurs de biomasse aérienne élevées respectivement 50 t/ha, 49,96 t/ha et 70,32 t/ha (Tableau 13). Les erreurs standard sont aussi estimées par type d'occupation des sols et varie entre 2,6 (Savane arborée/arbustive) et 10,2 (Forêt dense). Il faut noter ici qu'il s'agit des strates cartographiques et non celles rapportées par

l'inventaire forestier. Un fichier Excel sera fourni pour plus de détail sur l'estimation de la biomasse aérienne des arbres par placette de même que les NDVI.

Tableau 13: Valeurs de la biomasse aérienne (AGB°) et racinaire (BGB) et t/ha par type d'occupation des sols issus des travaux de cartographie. Btot est la biomasse sèche vivante (AGB+BGB)

Type occupation sol	Nb_Plac	AGB	Erreur standard	BGB	Btot_ligneuse
Cultures/Jachères	71	20,00	4,73	4,00	24,00
Forêt claire	205	49,96	5,14	9,99	59,95
Forêt claire/Savane boisée	30	32,78	9,89	6,56	39,33
Forêt dense	54	50,00	10,17	10,00	60,00
Forêt riveraine	125	70,32	7,78	14,06	84,39
Plantation	6	9,60	7,42	1,92	11,52
Savane arborée/arbustive	353	31,68	2,56	6,34	38,01
Savane herbeuse	64	20,05	5,02	4,01	24,06

La quantité de carbone contenue dans cette biomasse ligneuse par type d'occupation des sols, comme le montre le tableau 14 est comprise entre 5,4 t/ha (Plantation) à 39,7 t/ha (Forêt riveraine).

Tableau 14: Quantité de carbone en t/ha par type d'occupation des sols, l'erreur standard et les limites de confiances pour un degré de confiance de 95%

Type occupation sol	Nb_Plac	Carbone	Erreur standard	Limite inférieure	Limite supérieure
Cultures/Jachères	71	11,28	5,67	5,61	16,95
Forêt claire	205	28,18	6,17	22,01	34,35
Forêt claire/Savane boisée	30	18,49	11,87	6,62	30,36
Forêt dense	54	28,20	12,20	16,00	40,40
Forêt riveraine	125	39,66	9,34	30,32	49,00
Plantation	6	5,42	8,90	0	14,32
Savane arborée/arbustive	353	17,87	3,07	14,80	20,93
Savane herbeuse	64	11,31	6,02	5,29	17,33

4.4. Estimation du carbone du sol

La quantité du carbone du sol varie de 30 t/ha à 80 t/ha avec une moyenne de 47,16 t/ha pour l'ensemble des placettes inventoriées. La distribution par type d'occupation du sol est présentée dans tableau 15. Il ressort que les forêts denses, les forêts claires/savanes boisées et les forêts riveraines sont caractérisées par des valeurs de carbone de sol relativement élevées

respectivement 58,1 t/ha, 50,2 t/ha, 49,5 t/ha. Ces valeurs apparaissent relativement élevées et s'apparentent à ceux des zones volcaniques en milieu tropical sec.

Tableau 15: Quantité de carbone organique du sol (C_sol) en t/ha et l'indice de végétation (NDVI) par type d'occupation des sols

Type occupation sol	Nb_Plac	C_sol	Erreur standard	NDVI	Erreur standard
Cultures/Jachères	71	42,68	1,51	0,29	0,02
Forêt claire	205	50,20	1,63	0,36	0,02
Forêt claire/Savane boisée	30	47,23	2,15	0,26	0,03
Forêt dense	54	58,13	3,15	0,44	0,03
Forêt riveraine	125	49,54	2,16	0,34	0,02
Plantation	6	42,67	3,11	0,27	0,05
Savane arborée/arbustive	353	44,56	0,88	0,26	0,01
Savane herbeuse	64	43,84	1,56	0,23	0,01

V. Cartographie du stock de carbone au Togo

L'année 2015 a été choisie pour l'indice de végétation. Ces indices sont déterminés par mois sur chacune des placettes-échantillons. En moyenne sur l'année, les NDVI varient de 0,088 à 0,644 par placette avec une moyenne de 0,306. Le tableau 17 présente les NDVI par type d'occupation des sols. Il ressort que les types d'occupation des sols avec les NDVI élevés sont les forêts denses, les forêts claires et les forêts riveraines avec pour valeurs respectives des 0,44 ; 0,36 et 0,34.

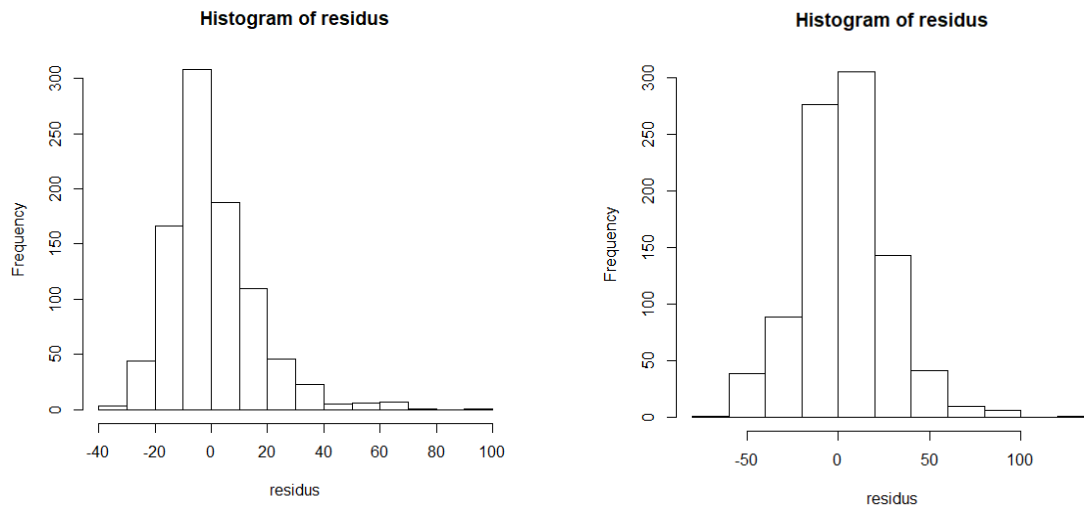
Pour modéliser le stock de carbone en fonction des NDVI, une analyse exploratoire a été réalisée. Elle consiste à choisir les meilleures variables explicatives de la quantité de carbone. Comme le montre les résultats présentés à l'annexe 3, au seuil de 10% 10 mois sont sélectionnés et au seuil de 5%, 5 mois (janvier, avril, juin, octobre et décembre) sont des variables potentielles retenues. Toutefois, la qualité d'ajustement ($R^2=0.20$) n'est pas admissible. Pour ce faire la valeur moyenne sur les douze mois (ndvi_2015) a été utilisée comme variable explicative. Le modèle sans ordonnée à l'origine apparaît meilleur avec une distribution des résidus presque normale (Figure 9).

Ainsi, la quantité de carbone aérienne est liée au NDVI par la relation suivante :

$$\text{Carbone aérien (t.ha)} = 60,128 \times \text{ndvi}_{2015} \quad \text{avec un } R^2 \text{ de } 0,608.$$

De même, la quantité totale de carbone (aérien, racinaire et organique) est liée au NDVI par :

Carbone total = $216,6 \times \text{ndvi_2015}$ avec R^2 de 0,90.



a) Carbone aérien

b) Carbone total

Figure 9: Histogramme des résidus de la modélisation du carbone aérien (a) et carbone total (b) en fonction de la variable ndvi_2015

Les figures 10 et 11 présentent en tonne par hectare la distribution en chaque point au niveau national respectivement de la quantité de carbone forestier aérien et de la quantité totale de carbone.

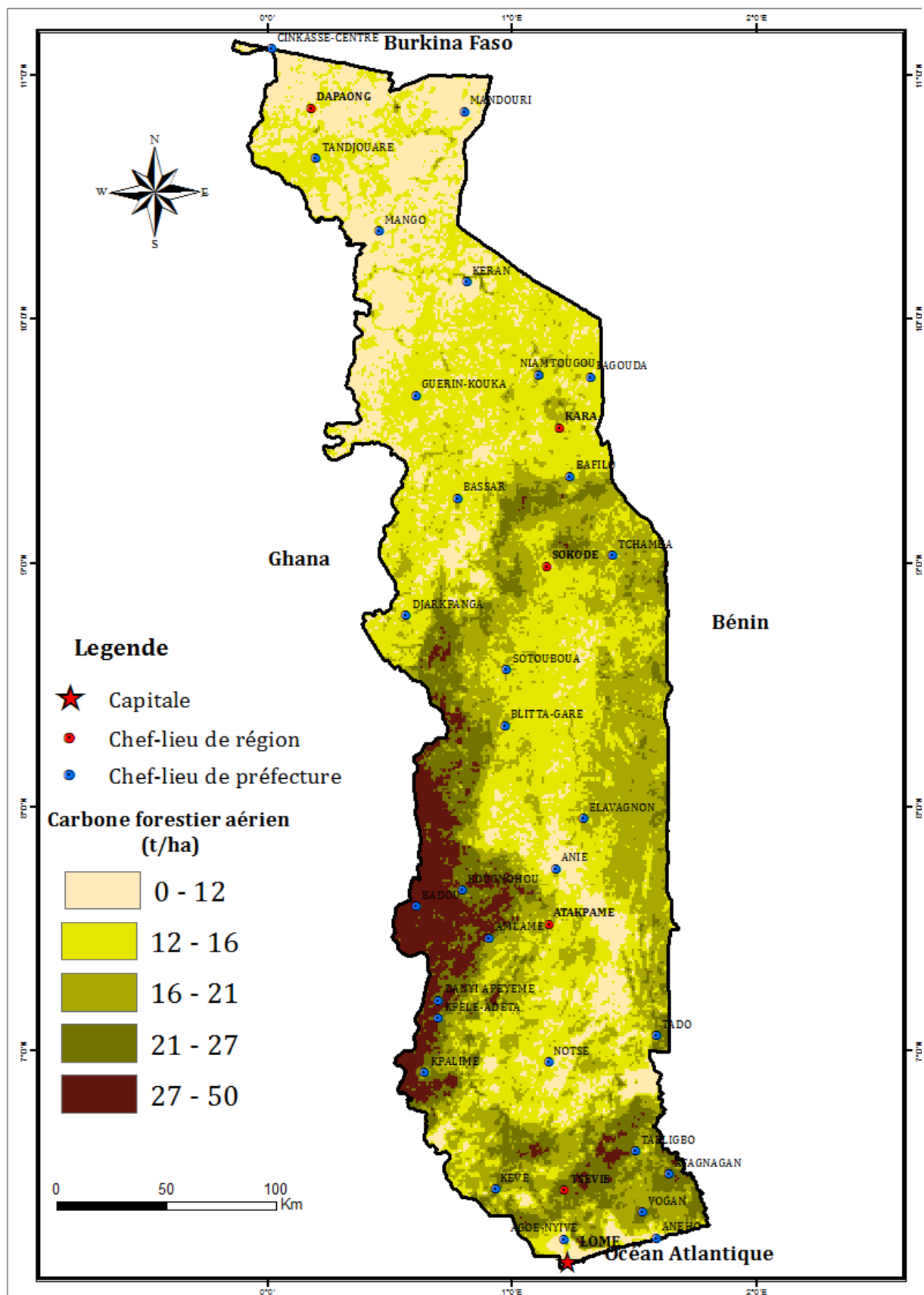


Figure 10: Distribution au niveau national du stock de carbone aérien

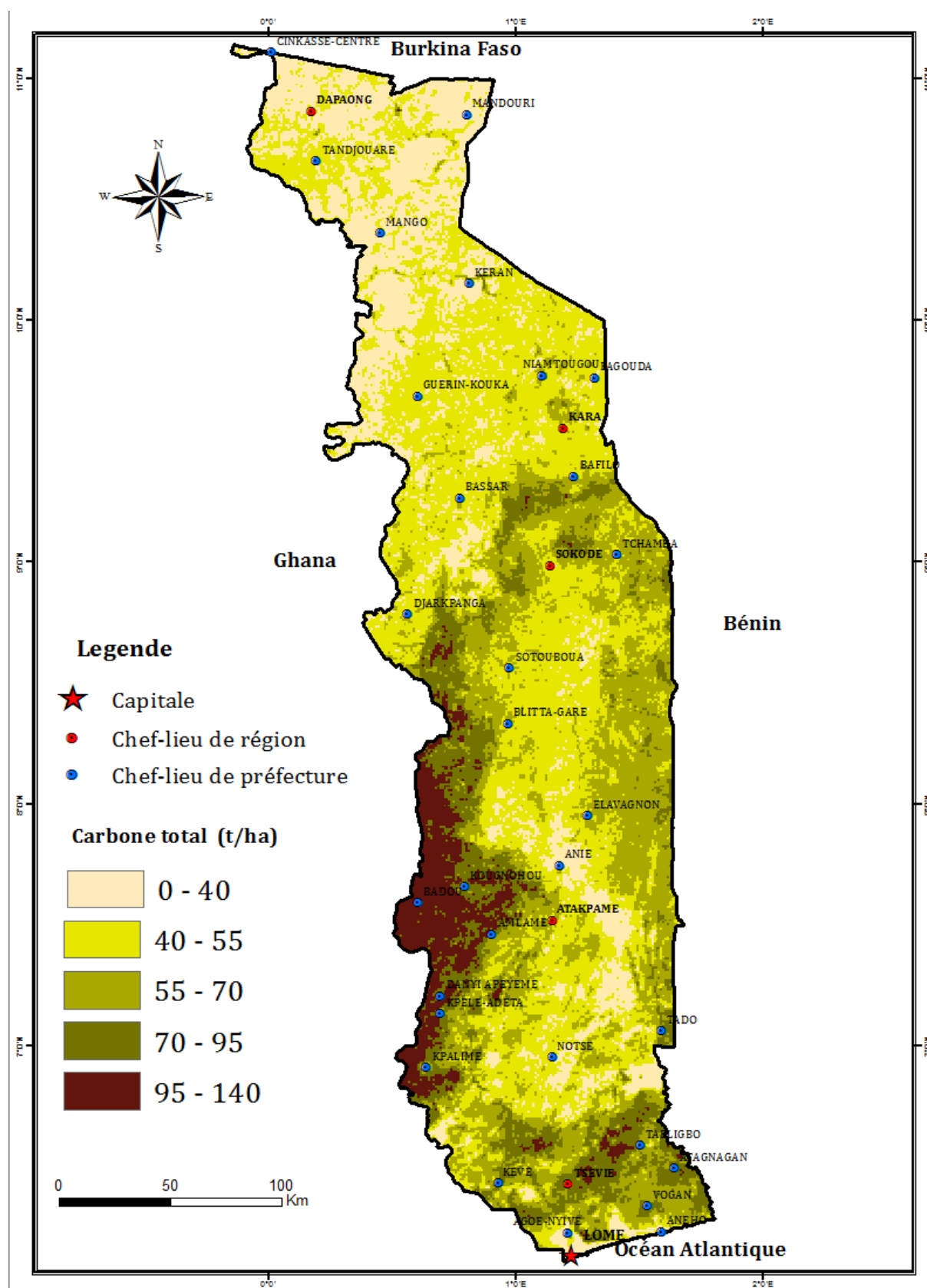


Figure 11: Distribution au niveau national du stock de carbone total(aérien, souterrain et organique du sol

VI. Collaboration et renforcement des capacités

VI.1. Collaboration avec les structures nationales et renforcement des capacités

Pour l'atteinte des objectifs de l'étude, des collaborations avec les structures ont été suscitées pour permettre l'accès à des informations importantes de même que le renforcement des capacités, notamment :

- a) La cellule en charge de la gestion de la base de données de l'IFN. En effet des données d'inventaire seront utilisées pour localiser les zones d'occurrence des espèces retenues et les données sur les ressources forestières du Togo.
- b) La cellule en charge de la gestion des données cartographiques pour la mise à jour des cartes, les informations cartographiques de base et les données pédologiques pour la réalisation de la carte de répartition du carbone au Togo.
- c) Les structures nationale et régionale (Plateau et Centrale) en charge de la gestion des ressources forestières pour passer l'information aux populations locales concernant l'activité d'abattage des arbres et la mise à disposition de deux tronçonneurs expérimentés disposant de tronçonneuse ou Scie en état.
- d) Les représentants des structures partenaires de la Coordination REDD+ du Togo, dont les institutions universitaires, recevront des renforcements des capacités sur les aspects de la collecte des données de biomasse, l'estimation de quantité de carbone et de sa distribution à l'échelle nationale. A cet effet, la Coordination REDD+ communiquera leur liste pour permettre au Consultant de prendre des dispositions d'apprentissages nécessaires.

Enfin, un renforcement des capacités techniques des acteurs sectoriels à l'utilisation des modèles validés pour l'évaluation de la biomasse et des stocks et flux de carbone dans les différents compartiments des écosystèmes forestiers du Togo est envisagé.

VI.2. Renforcement des capacités techniques et scientifiques nationales

Par ailleurs, la mission d'étude en collaboration avec le Projet REDD+ a organisé courant janvier 2018, une formation pratique d'environ une douzaine de cadres du Ministère de l'Environnement

et des Ressources Forestières (MERF) et de l'Université de Lomé (UL). D'après les photos 1 & 2, ces bénéficiaires ont renforcé leurs connaissances techniques et scientifiques à travers la mise en œuvre du protocole de collecte des données d'évaluation de la biomasse carbone des écosystèmes forestiers.



Photo 1 & 2: Bénéficiaires sur les lieux de la formation

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adeniyi P.A. & Ezekiel A. 2015.** Modelling and Comparison of Above-Ground Tree Biomass of Omo Biosphere Reserve Using Field and Landsat 8 Data. *British Journal of Applied Science & Technology*, ISSN: 2231-0843, Vol.: 19, Issue 4.
- Aebiyir, R. 2016.** Charcoal production and its implication for woodland degradation and climate change in the Forest-Savannah Transition Zone of Ghana: the case of Kintampo Municipality. Thesis, 192p.
- Bied-Charreton, M. 2009.** Sécheresse, Désertification et Développement en Afrique. Cours de master2 – 2007- UVSQ et CERDI. 53p.
- Casey R., Mathew W., John G., 2011.** Above- and Belowground Carbon Stocks in a Miombo Woodland Landscape of Mozambique. *BIOTROPICA*. 2011. pp. 43: 423–432. Vol. 4.
- Chave J., Andalo C., Brown S., Cairns M.A., Chambers J.Q., Eamus D., Folster H., Fromard F., Higuchi N., Kira T., Lescure J.P., Nelson B.W., Ogawa H., Puig H., Riera B., Yamakura T., 2005.** Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests, *Oecologia*, 145, 87– 99.
- Chave J., Rejou-Mechain M., Burquez A., Chidumayo E., Colgan S.M., Delitti B.C.W., Duque A., Eid T., Fearnside M.P., Goodman C.R., Matieu H., Martinez- Yrizar A., Mugasha A.W., Muller-Landau C.H., Mencuccini M., Nelson W.B., Ngomanda A., Nogueira M.E., Ortiz-Malavassi E., Pelissier R., Ploton P., Ryan M.C., Juan G., Saldarriaga G.J., Vieilledent G., 2014.** *Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical*. *Global Change Biol.* <http://dx.doi.org/10.1111/gcb.12629>
- Chenge Iveren B & Osho Johnson SA. 2018** Mapping tree aboveground biomass and carbon in Omo Forest Reserve Nigeria using Landsat 8 OLI data, *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, DOI: [10.2989/20702620.2018.1463150](https://doi.org/10.2989/20702620.2018.1463150)
- Chidumayo, E. 2013.** Forest degradation and recovery in a miombo woodland landscape in Zambia: 22 years of observations on permanent sample plots. *Forest Ecology and Management/ Elsevier*. 2013. pp. 291:154–161.
- Cisse, M.I. 1980.** Production fourragère de quelques arbres sahéliens: relation entre biomasse foliaire maximale et divers paramètres physiques. Pages 203-208 *in* Les fourrages ligneux en Afrique. Etat des connaissances: (Le Houerou, H.N., ed.). Addis Ababa, Ethiopia: International Livestock Centre for Africa.
- Colin, A., 2004.** Evaluation des stocks et des flux de carbone liés à l'activité forestière en Aquitaine. Convention de prestations IFN/ CRPF-n° 2004-03-056. 88 p.
- Degerickx, J., Almeida, J., Pieter, C.J., Moonen, Vervoort L., Muys, B., Wouter M. J. Achten. 2016.** Impact of land-use change to *Jatropha* bioenergy plantations on biomass and soil carbon stocks: a field study in Mali. *GCB Bioenergy* (2016) 8, 443–455, doi: 10.1111/gcbb.12288

Djomo A.N., Ibrahima A., Saborowski J., Gravenhorst G., 2010. Allometric equations for biomass estimations in Cameroon and pan moist tropical equations including biomass data from Africa. *Forest Ecology and Management*, 260, 1873–1885.

Djomo N.A., Picard N., Fayolle A., Henry M., Ngomanda A., Ploton P., McLellan J., Saborowski J., Adamou I., Lejeune P., 2016. Tree allometry for estimation of carbon stocks in African tropical forests. *Forestry* 1–10.<http://dx.doi.org/10.1093/forestry/cpw025>

Djomo A.N., Chimi C.D., 2017. Tree Allometric Equations for Estimation of Above, Below and Total Biomass in a Tropical Moist Forest: Case Study with Application to Remote Sensing. *Forest Ecology and Management*, 381, 184-193.

Fayolle A., Doucet J-L., Gillet J-F., Bourland N. & Lejeune P., 2013. Tree allometry in Central Africa: Testing the validity of pantropical multi-species allometric equations for estimating biomass and carbon stocks. *Forest Ecology and Management* **305**, 29–37.

Feldpausch T.R., Lloyd J., Lewis S.L., Brien R.J.W., Gloor E., Monteagudo Mendoza A., Lopez-Gonzalez G., Banin L., Abu Salim K. & Affum-Baffoe K., 2012. Tree height integrated into pan-tropical forest biomass estimates. *Biogeosciences Discuss.* 9, 2567–2622.

Gurmesa, F., Gemechu, T., Soromessa, T., Kelbessa, E. 2016. Allometric Equations to Estimate the Biomass of *Oxytenanthera Abyssinica* (A. Rich.) Munro. (Ethiopian Lowland Bamboo) in Dichu Forest, Oromia Region, Western Ethiopia. *International Journal of Research Studies in Biosciences (IJRSB)* Volume 4, PP 34-48

Hasen-Yusuf, M., Treydte, A.C., Abule, E., Sauerborn, J. 2016. Predicting aboveground biomass of woody encroacher species in semi-arid rangelands, Ethiopia. *Journal of Arid Environments* 96 : 64-72.

Hengl T., Heuvelink G.B., Kempen B., Leenaars J.G., Walsh M.G., Shepherd KD., Sila A, MacMillan R.A., de Jesus J.M., Tamene L., Tondoh J.E., 2015. Mapping soil properties of Africa at 250 m resolution: random forests significantly improve current predictions. *PLoS One* 10(6):e0125814.

Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink G.B.M., Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A., Shangguan W., Wright M.N., Geng X., Bauer-Marschallinger B., Guevara M.A., Vargas R., MacMillan R.A., Batjes N.H., Leenaars J.G.B., Ribeiro E., Wheeler I., Mantel S., Kempen B.; 2017. SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLOS ONE* 12(2):1–40. doi: 10.1371/journal.pone.0169748.

Henry M., Besnard A., Asanté W., Eshun J., Adu Bredu S., Valentini R., Brenoux M., Saint-André L., 2010. Wood density, phytomass variations within and among trees, and allometric equations in a tropical rainforest of Africa. *Forest Ecology and Management*, **260** (8), 1375-1388.

IPCC 2006. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* ed H S Eggleston, L Buendia, K Miwa, T Ngara and K Tanabe Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, IGES, Japan

Kammer, F., Adjossou K. 2016: Résultats de l'Inventaire Forestier National du Togo, DFS – UNIQUE, 106 P.

Kuyah, S., Dietz, J., Muthuri, C., Jamnadass, R., Mwangi, P., Coe, R., Neufeldt, H. 2012. Allometric equations for estimating biomass in agricultural landscapes: Above ground biomass. *Agriculture, Ecosystems and Environment/ Elsevier*. 2012a. pp. 216– 224.

Marshall A.R. et al., 2012. Measuring and modeling aboveground carbon and tree allometry along a tropical elevation gradient. *Biol. Conserv.*, **154**, 20-33.

Mbow, C., Michel, M., Verstraet, Sambou, B., Diaw, A.T., Neufeldt, H. 2014. Allometric models for aboveground biomass in dry savanna trees of the Sudan and Sudan–Guinean ecosystems of Southern Senegal. *J For Res* 19:340–347.

Mokany K., Raison R.J., and Prokushkin A.S., 2006. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* **12**: 84-96.

Mugasha, W. A., Eid, T., Bollandas, O. M., Malimbwi, R.E., Chamshama, S. A. O., Zahabu, E., Katani, J. Z. 2013. Allometric models for prediction of above- and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. *Forest Ecology and Management/ Elsevier*. 2013a. pp. 310: 87–101.

Nakou L. Fonton H.N. Atindogbé G. (2016) *Estimation de biomasse aérienne: Savane soudano-guinéenne (Bénin)*, Editions Universitaires Européennes, 84 p.

Ngomanda A., Engone Obiang N.L., Lebamba J., Moundounga Mavouroulou Q., Gomat H., Mankou G.S., Loumeto J., Midoko Iponga D., Kossi Ditsouga F. & Zinga Koumba R., 2014. Site-specific versus pantropical allometric equations: Which option to estimate the biomass of a moist central African forest? *Forest Ecology and Management*, **312**, 1–9.

Thiam, S., Sambou, B., Mbow, C., Guisse, A. 2014. Élaboration de modèles allométriques d'Acacia Sénégal L. Willd pour l'analyse du carbone ligneux en milieu sahélien : cas de la zone sylvopastorale au Sénégal. *Afrique SCIENCE* 10(3) (2014) 304 – 315.

Vieilledent, G., R. Vaudry, S. F. D. Andriamanohisoa, S. O. Rakotonarivo, Z. H. Randrianasolo, H. N. Razafindrabe, R. C. Bidaud, J. Ebeling, and M. Rasamoelina. 2012. A Universal Approach to Estimate Biomass and Carbon Stock in Tropical Forests Using Generic Allometric Models. *Ecological Applications* 22: 572–583. doi:10.1890/11-0039.1.

Wassenberg, M., Chiu H.S., Guo, W., Spiecker, H. 2015. Analysis of wood density profiles of tree stems: incorporating vertical variations to optimize wood sampling strategies for density and biomass estimations. *Trees*, 29: 551-561.

Zhu X. & Liu D., 2015. Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. [ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing](https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014), 102, 222-231, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014>

ANNEXES

ANNEXE 1: Coordonnées géographiques, date de mesure, environnement local et diamètre de référence des arbres échantillons	47
ANNEXE 2: VALEURS DES CRITERES DE QUALITE DES EQUATIONS DISPONIBLES. EQMP=ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DE PREDICTION, ERAMP=ERREUR RELATIVE ABSOLUE MOYENNE DE PREDICTION, EAR=ERREUR ABSOLUE RELATIVE	48
ANNEXE 3: Résultats de la régression pas à pas (Stepwise) de la quantité de carbone aérienne en fonction des NDVI des 12 mois	49
ANNEXE 4: Résultat de modélisation du Carbone avec le logiciel R	50
ANNEXE 5: Protocole de collecte des données sur le terrain et au laboratoire	51

ANNEXE 1: Coordonnées géographiques, date de mesure, environnement local et diamètre de référence des arbres échantillons

Num_arbre	N° Fiche	Nom_scientifique	Date	x_utm	y_utm	N° photo d'arbre	Formation_veg	Région	Prefecture	Canton	Village	D (dbh) en (cm)
1	1	Vitellaria paradoxa	16/01/2018	285433	914810	2866-2869	Savane arborée	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	129
2	2	Vitellaria paradoxa	17/01/2018	285659	914855	2941-2947	Savane arborée	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	181
3	3	Lannea acida	17/01/2018	284791	914638	2981-2983	savane boisée	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	149
4	4	Pterocarpus erinaceus	18/01/2018	286850	914989	4324-3031	Forêt claire	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	158
5	5	Pterocarpus erinaceus	18/01/2018	286889	914967	3078-3079	forêt claire	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	137,5
6	6	Pterocarpus erinaceus	18/01/2018	286687	915018	3098-3103	Savane arborée	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	100
7	7	Lannea acida	19/01/2018	286634	914557	3117	Savane arborée	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	45,7
8	8	Lannea acida	19/01/2018	286739	914046	3139-3140	Savane arborée	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	82,5
9	9	Lannea acida	19/01/2018	286455	914559	3156	Savane arborée	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	110
10	10	Vitellaria paradoxa	19/01/2018	286377	915217	3162	Savane arborée	Centrale	Blitta	Warangni	Warangni	109
11	11	Anogeissus leiocarpus	20/01/2018	257432	904885	3186-3190	Savane arborée	Centrale	Blitta	Tchifama	Tchifama	111,9
12	12	Anogeissus leiocarpus	20/01/2018	257417	904864	3210-3211	Savane arborée	Centrale	Blitta	Tchifama	Tchifama	67,5
13	13	Pterocarpus erinaceus	20/01/2018	257382	904873	3226-3228	Savane arborée	Centrale	Blitta	Tchifama	Tchifama	51
14	14	Anogeissus leiocarpus	21/01/2018	270354	925391	3265-3268	Savane arborée	Centrale	Blitta	Blitta	Tindjassi	234
15	15	Anogeissus leiocarpus	21/01/2018	270296	925363	3272-3274	Savane arborée	Centrale	Blitta	Blitta	Tindjassé	126,6
16	16	Anogeissus leiocarpus	22/01/2018	284841	858808	1265-1269	Savane arborée	Plateau	Amou	Amou	Gamè	53
17	17	Pterocarpus erinaceus	22/01/2018	284856	858809	1274-1276	Savane arborée	Plateau	Amou	Amou	Gamè	74,5
18	18	Vitellaria paradoxa	22/01/2018	285137	858797	1306	Savane arborée	Plateau	Amou	Amou	Gamè	46,2
19	19	Lannea acida	22/01/2018	285050	858591	1322-1324	Savane arborée	Plateau	Amou	Amou	Gamè	186
20	20	Vitellaria paradoxa	23/01/2018	270296	925364	3333-3335	Savane arborée	Centrale	Blitta	Blitta	Tindjassi	89

ANNEXE 2: VALEURS DES CRITERES DE QUALITE DES EQUATIONS DISPONIBLES. EQMP=ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE DE PREDICTION, ERAMP=ERREUR RELATIVE ABSOLUE MOYENNE DE PREDICTION, EAR=ERREUR ABSOLUE RELATIVE

Model	Equation	EQMP	ERAMP	Biais	Nombre en % d'arbres avec EAR inférieur à				
					10%	20%	30%	40%	50%
$\exp(-1.103+1.994*\log dbh+0.317*\log ht+1.303*\log rho)$	Eq.1	456,1	17,1	-0,1	40	65	80	95	100
$0.13*D^{2.49}*rho^{1.180}$	Eq.2	453,8	19,1	-0,1	35	60	80	90	95
$\exp(-4.0596 + 4.0624*\log(dbh)-0.228*(\log(dbh))^2 + 1.4307*\log(rho))$	Eq.3	1040,5	58,7	0,6	5	15	20	35	45
$rho*\exp(-1.183+1.940*\log(ddbh)+0.239*(\log(dbh))^2-0.0285*(\log(dbh))^3)$	Eq.4	1547,2	91,5	0,9	0	0	5	10	25
$\exp(-1.8623 + 2.4023*\log(dbh)- 0.3414*\log(rho))$	Eq.5	841,2	77	0,7	5	20	30	40	50
$rho*\exp(-1.499+2.148*\log(dbh)+0.207*(\log(dbh))^2 -0.0281*(\log(dbh))^3)$	Eq.6	1605,9	97,5	1	0	0	5	5	20
$\exp(-2.5680 + 0.9517*\log(donne\$dbh^2*donne\$ht)+1.189*\log(donne\$rho))$	Eq.7	641,4	26,6	-0,2	15	50	60	80	85
$0.00347*(rho * dbh^2 *H)$	Eq.8	641,4	26,6	-0,2	15	50	60	80	85
$\exp(-2.4360+0.1399*(\log(dbh))^2+0.7373*\log(dbh^2*H)+0.2790*\log(rho))$	Eq.9	1059,5	32,9	0,1	25	35	65	85	85
$0.0509*(rho*(dbh^2)*H)$	Eq.10	790,6	23,9	-0,1	40	55	70	80	95
$0.0673*(rho*(dbh^2)*H)^{0.976}$	Eq.11	783,5	22,7	0	35	55	75	85	95
$-2.308+1.325*\log(dbh)+0.469*\log(dbh^2*H)+0.802*\log(rho))$	Eq.12	889,8	33	0,3	25	50	60	65	90
$-0.0799*(dbh^2*H)+rho$	Eq.13	625,7	23,5	-0,1	30	55	65	80	85
$rho*\exp(-1.239+1.980*\log(dbh)+0.207*(\log(dbh))^2 -0.0281*(\log(dbh))^3)$	Eq.14	706,2	42,7	0,4	15	20	45	55	65
$0.0776*(rho*dbh^2*H)$	Eq.15	1410,8	46,9	0,4	10	30	40	55	65

ANNEXE 3: Résultats de la régression pas à pas (Stepwise) de la quantité de carbone aérienne en fonction des NDVI des 12 mois

Résultat de stepwise	Résultat avec NDVI moyen sans ordonnée à l'origine
<p>Call: lm(formula = CA_ha ~ ndvi_avr + ndvi_mai + ndvi_jui + ndvi_mars + ndvi_jan + ndvi_dec + ndvi_fev + ndvi_oct + ndvi_jul + ndvi_sept, data = ndvi)</p> <p>Residuals: Min 1Q Median 3Q Max -36.903 -9.258 -2.794 6.609 88.801</p> <p>Coefficients: Estimate Std. Error t value Pr(> t) (Intercept) 4.571 3.441 1.329 0.184326 ndvi_avr 67.087 8.068 8.315 3.31e-16 *** ndvi_mai -13.473 6.960 -1.936 0.053214 . ndvi_jui -7.718 2.545 -3.033 0.002492 ** ndvi_mars -10.394 6.200 -1.676 0.093993 . ndvi_jan 55.234 11.578 4.770 2.14e-06 *** ndvi_dec -27.890 8.216 -3.395 0.000717 *** ndvi_fev -17.594 9.418 -1.868 0.062059 . ndvi_oct 7.603 3.757 2.024 0.043291 * ndvi_jul -3.900 2.264 -1.722 0.085385 . ndvi_sept -2.864 1.901 -1.506 0.132320 --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1</p> <p>Residual standard error: 14.83 on 911 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.2045, Adjusted R-squared: 0.1957 F-statistic: 23.41 on 10 and 911 DF, p-value: < 2.2e-16</p>	<p>Call: lm(formula = CA_ha ~ ndvi_2015 - 1, data = ndvi)</p> <p>Residuals: Min 1Q Median 3Q Max -33.900 -9.482 -2.593 8.474 90.102</p> <p>Coefficients: Estimate Std. Error t value Pr(> t) ndvi_2015 60.451 1.609 37.57 <2e-16 *** --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1</p> <p>Residual standard error: 15.75 on 907 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.6088, Adjusted R-squared: 0.6084 F-statistic: 1411 on 1 and 907 DF, p-value: < 2.2e-16 *****</p> <p>Call: lm(formula = C_tot ~ ndvi_2015 - 1, data = ndvi)</p> <p>Residuals: Min 1Q Median 3Q Max -64.548 -11.494 2.149 17.625 123.174</p> <p>Coefficients: Estimate Std. Error t value Pr(> t) ndvi_2015 216.649 2.495 86.83 <2e-16 *** --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1</p> <p>Residual standard error: 24.43 on 907 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.8926, Adjusted R-squared: 0.8925 F-statistic: 7539 on 1 and 907 DF, p-value: < 2.2e-16</p>

ANNEXE 4: Résultat de modélisation du Carbone avec le logiciel R

Carbone aérien	Carbone total
Call: lm(formula = CA_ha ~ ndvi_2015 - 1, data = ndvi)	Call: lm(formula = C_tot ~ ndvi_2015 - 1, data = ndvi)
Residuals: Min 1Q Median 3Q Max -33.714 -9.378 -2.564 8.403 90.237	Residuals: Min 1Q Median 3Q Max -57.573 -10.400 3.053 16.452 105.387
Coefficients: Estimate Std. Error t value Pr(> t) ndvi_2015 60.128 1.595 37.69 <2e-16 *** --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1	Coefficients: Estimate Std. Error t value Pr(> t) ndvi_2015 203.998 2.204 92.55 <2e-16 *** --- Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
Residual standard error: 15.75 on 915 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.6082, Adjusted R-squared: 0.6078 F-statistic: 1420 on 1 and 915 DF, p-value: < 2.2e-16	Residual standard error: 21.76 on 915 degrees of freedom Multiple R-squared: 0.9035, Adjusted R-squared: 0.9034 F-statistic: 8566 on 1 and 915 DF, p-value: < 2.2e-16

ANNEXE 5: Protocole de collecte des données sur le terrain et au laboratoire

MINISTRE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DES RESSOURCES FORESTIERES

SECRETARIAT GENERAL

DIRECTION GENERALE DE L'ODEF

Projet de Soutien à la Préparation à la REDD+

REPUBLIQUE TOGOLAISE
Travail-Liberté - Patrie

Atelier de formation des acteurs sur la collecte des données et sur l'évaluation de la Biomasse végétale dans les différents compartiments dans le cadre de l'étude sur "la définition de la méthodologie et des outils pour l'évaluation de la biomasse végétale dans les différents compartiments du Togo"

Liste de présence des participants

LIEU : Blitta

DATE : 16/01/2018


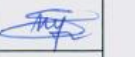
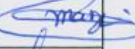




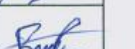

N°	Noms et prénoms	Sexe	Structure / Titre	Lieu de provenance	Contact téléphonique	Adresse e-mail	Signature
1	ABALO N. Mangnigani	M	ODEF / MERF	Lomé	90840712	odeftdepl@gmail.com	[Signature]
2	KOMBATE Aoufon	M	ODEF / MERF	Lomé	9029586	arifonkombat@hotmail.fr	[Signature]
3	GNAMA W. Yan	M.	CBRL / DFI / DLF	Lomé	90365806	princegnama@yahoo.fr	[Signature]
4	OURO-AGBANDADZ	M	CBDR / FEN - DFI	Lomé	90716951	edl881@gmail.com	[Signature]
5	SAMAROU Mouda	M	DRF / MERF	Lomé	90348856	modamarou@yahoo.fr	[Signature]
6	MIBERKASSA Bataa	M	UL / LBEY	Lomé	90486387	bataa.miberkassa@gmail.com	[Signature]
7	ASSOUMANOU Bataa	M	DRF / MERF	Lomé	90667728	issaka8500@yahoo.fr	[Signature]

Atelier de formation des acteurs sur la collecte des données et sur l'évaluation de la Biomasse végétale dans les différents compartiments dans le cadre de l'étude sur "la définition de la méthodologie et des outils pour l'évaluation de la biomasse végétale dans les différents compartiments du Togo"

Liste de présence des participants

LIEU : Blitta

DATE :

N°	Noms et prénoms	Sexe	Structure / Titre	Lieu de provenance	Contact téléphonique	Adresse e-mail	Signature
8	ZEGLA Kossi	M	UL/IRF Docteur	Lomé	90934433	zeglakossi@gmail.com	
9	ADOTCHAMON Alphonsine	F	FSA/UAC Docteur	Bénin	97468836	adotchamon@yahoo.fr	
10	ATINDOGBE Gilbert	M	Expert ACDD	Cotonou Bénin	00229 95713684	gilbertatindogbe@gmail.com	
11	COULYSSANOU Cedric	M	Expert ACDD	Bénin	00229 95413365	cedricfoussarou@gmail.com	
12	AKPOA Horace	M	Associe expert ACDD	Bénin	66657727	horaceakpo@yahoo.fr	
13	AGOSSOUKPE Fidèle	M	Chauffeur	Bénin	00229 9788978	abfika@gmail.com	
14	BAKABIMA D. Bakéna	M	Responsable MRV/SE	Lomé	90739417	liborgue@gmail.com	
15	AGNIGLO Yao dodji	M	Chauffeur	Lomé	90275244	—	
16	AKPEYE Afawa	F	Assist. Responsable MRV/SE	Lomé	9020466	afawey@yahoo.com	
17							

ANNEXE 6: Protocole de collecte des données sur le terrain et au laboratoire



REPUBLIQUE DU TOGO
MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES RESSOURCES FORESTIERES

DIRECTION GENERALE DE L'ODEF

PROJET DE SOUTIEN A LA PREPARATION A LA REDD+



DEFINITION DE LA METHODOLOGIE ET DES OUTILS POUR L'EVALUATION DE LA BIOMASSE VEGETALE DANS
LES DIFFERENTS COMPARTIMENTS AU TOGO

Protocole de collecte des données sur le terrain et au laboratoire



**ACTION – CONSEILS POUR LE
DEVELOPPEMENT DURABLE (ACDD)**

Tél : (+229) 96 27 95 45/ 95 85 89 80

Email : agbgafid@gmail.com

Septembre 2017

TABLE DES MATIERES

1. Objectif du document.....	1
2. Plan d'échantillonnage	1
3. Données collectées avant l'abattage.....	2
4. Données collectées après l'abattage	5
5. Mesures au Laboratoire.....	9

PROTOCOLE DE COLLECTE DES DONNEES SUR LE TERRAIN ET AU LABORATOIRE

1. OBJECTIF DU DOCUMENT

Le présent document propose un **protocole simplifié de collecte des données de terrain** et de laboratoire nécessaires à la quantification de la biomasse aérienne totale des arbres pour l'établissement d'équations allométriques.

2. PLAN D'ECHANTILLONNAGE

Vu le caractère de simple validation des équations allométriques disponibles, et eu égard au temps imparti pour ce travail, le type forestier choisi est la savane arborée et arbustive de la région du plateau.

Dans Le cadre de ce travail les 4 premières espèces à valeurs d'indice d'importance sont retenues. Il s'agit de : *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertner subsp. *Paradoxa* et *Lannea acida* A. Rich.

Les arbres-échantillons au nombre de 20 sont répartis en 5 classes de diamètres en fonction des résultats d'inventaire forestier. Le plan d'échantillonnage se présente comme suit (Tableau 1)

Tableau 1 : Plan d'échantillonnage pour la collecte des données de biomasse.

Espèces	10-20	20-30	30-40	40-50	>50	Total
<i>Anogeissus leiocarpus</i> (DC.) Guill. & Perr	1	1	1	1	1	5
<i>Pterocarpus erinaceus</i> Poir	1	1	1	1	1	5
<i>Vitellaria paradoxa</i> C.F. Gaertner subsp. <i>Paradoxa</i>	1	1	1	1	1	5
<i>Lannea acida</i> A. Rich.	1	1	1	1	1	5
Total						20

2.1. Localisation des arbres-échantillons

Les arbres-échantillons seront localisés en se servant de la base de données de l'IFN. Un arbre sera choisi. A l'aide des GPS, ces arbres sélectionnés seront identifiés sur le terrain grâce à leurs coordonnées géographiques.

3. DONNEES COLLECTEES AVANT L'ABATTAGE

3.1. Mesures sur pieds

Avant l'abattage, différentes informations seront notées sur la position et l'environnement de l'arbre sur pied, et différentes mesures seront réalisées sur la taille et l'architecture de l'arbre (Figure 1). Il s'agit :

- du numéro d'identification de l'arbre (numéro unique pour le site),
- de l'identification botanique de l'arbre (nom pilote de l'essence ou nom scientifique si possible au niveau de l'espèce, sinon au niveau du genre ou de la famille),
- des coordonnées GPS. Il faudra veiller à paramétrer le GPS pour afficher les coordonnées en degré décimal.
- des éléments permettant l'identification botanique de l'arbre (ou la confirmation de l'identification). Il s'agit de la présence d'exsudat, de l'odeur et de la couleur de la tranche. Ces informations seront complétées après l'abattage par un échantillon d'herbier et une photographie de la tranche, des feuilles, et des fleurs et des fruits, s'ils sont présents.
- des mesures dendrométriques de l'arbre sur pied. Il s'agit du diamètre de référence, de la hauteur de mesure du diamètre de référence, de la hauteur du fût, de la hauteur totale et de la hauteur des contreforts.
- des mesures sur la structure du houppier qui permettront de quantifier la surface de la projection du houppier au sol.

Fiche 1: Données d'identification de l'arbre						ver Mai 2017
ID Arbre :	<input style="width: 95%;" type="text"/>	N° Fiche:	<input style="width: 95%;" type="text"/>	N° photo d'arbre:	<input style="width: 95%;" type="text"/>	
Code_essence :	<input style="width: 95%;" type="text"/>					
Nom scientifique:	<input style="width: 95%;" type="text"/>					
Date :	<input style="width: 95%;" type="text"/>	Coord X :		<input style="width: 95%;" type="text"/>		
Equipe :	<input style="width: 95%;" type="text"/>	Coord Y :		<input style="width: 95%;" type="text"/>		
Arbre sur pied :						
diam_réf (cm) :	<input style="width: 95%;" type="text"/>	V_ fût 1 (m):	<input style="width: 95%;" type="text"/>	V_ haut1 (%) :	<input style="width: 95%;" type="text"/>	
Visée bas (%) :	<input style="width: 95%;" type="text"/>	V_ fût 2 (m) :	<input style="width: 95%;" type="text"/>	V_ haut2(%) :	<input style="width: 95%;" type="text"/>	
Arbre abattu :						
	Lf (m) :	<input style="width: 95%;" type="text"/>	Lt (m):	<input style="width: 95%;" type="text"/>		
VUE DU HOUPPIER AU SOL (m)						
N (0°):	<input style="width: 95%;" type="text"/>	S (180°):	<input style="width: 95%;" type="text"/>	N° de photo du houppier:		
NE (45°):	<input style="width: 95%;" type="text"/>	SO (225°):	<input style="width: 95%;" type="text"/>	Statut de l'arbre:		
E (90°):	<input style="width: 95%;" type="text"/>	O (270°):	<input style="width: 95%;" type="text"/>			
SE (135°):	<input style="width: 95%;" type="text"/>	NO (315°):	<input style="width: 95%;" type="text"/>			
Remarque:						
Nom et Prénom:						

Figure 1 : Extrait de la fiche de terrain concernant les données à récolter sur l'identification des arbres.

3.1.1. Mesures dendrométriques

Les mesures dendrométriques portent sur les variables d'entrée des équations allométriques : le diamètre de référence et la hauteur totale et des variables d'intérêt pour les forestiers telles que la longueur de la bille, des déformations à la base du tronc (Figure 2, Cailliez, 1980). Il existe un certain nombre de **conventions internationales** en ce qui concerne la mesure des arbres à savoir

le diamètre de référence, la hauteur de mesure du diamètre de référence, de la hauteur fût, de la hauteur totale et les mesures des rayons du houppier (Figure 3) (Rondeux 1999).

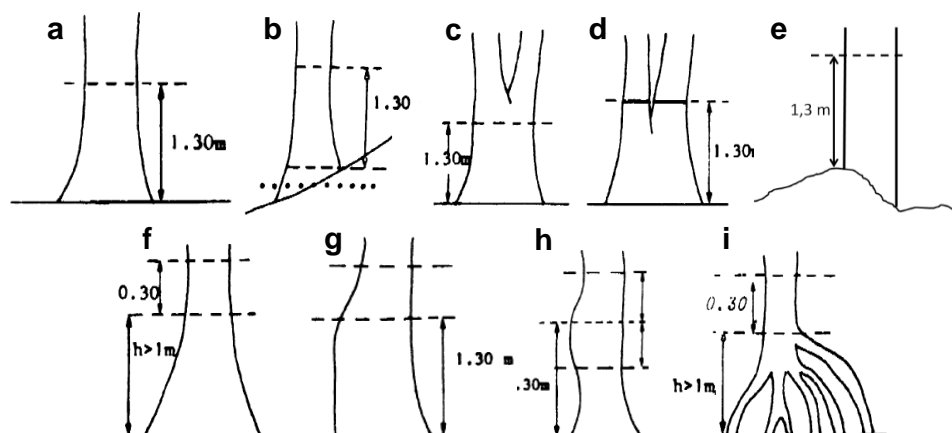


Figure 2 : Convention de mesure du diamètre de référence (d'après Cailliez, 1980).

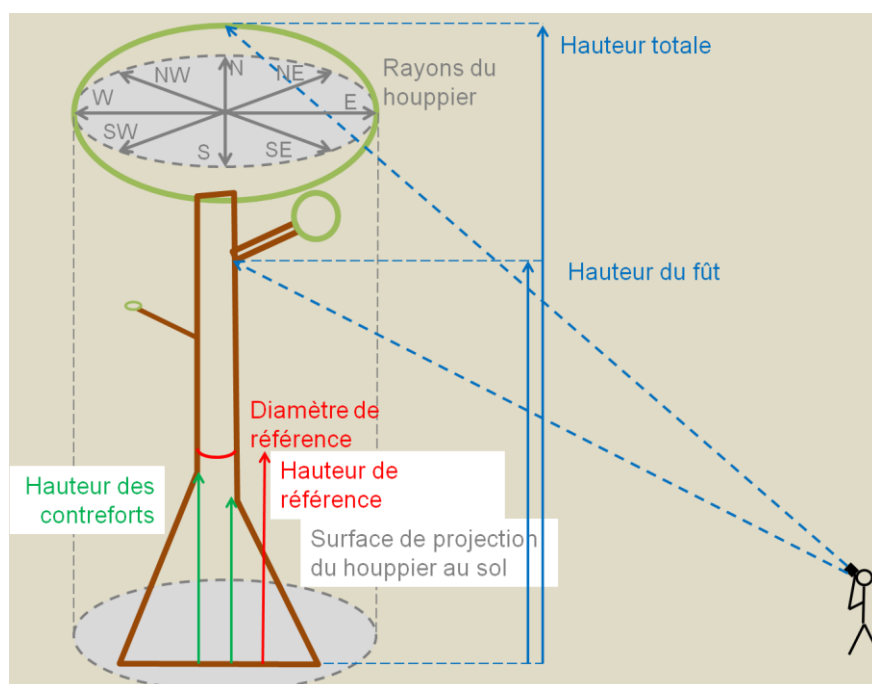


Figure 3 : Schéma représentant les mesures dendrométriques réalisées sur les arbres sur pied.

✚ Le **diamètre de référence** (en cm) correspond au diamètre de l'arbre mesuré au ruban diamétrique à une hauteur de 1,3 m au-dessus du sol si le tronc ne présente aucune irrégularité à cette hauteur, ou 30 cm au-dessus des déformations. Dans le cas d'un terrain plat, mais avec une différence de niveau du sol autour du pied de l'arbre, c'est toujours la partie la plus haute du sol qui est considéré comme le niveau 0 (Figure 2).

- 5

quartiers de tarte (QT). Les échantillons seront pesés en forêt à l'aide d'un peson de précision. Les échantillons seront conservés dans des sacs hermétiques, placés à l'ombre, et protégés un maximum de la chaleur jusqu'au laboratoire. Les échantillons trop volumineux et/ou trop lourds seront subdivisés.

Deux échantillons de bois (B1 et B2) d'une épaisseur de 5 à 10 cm et en forme de quartiers de tarte (QT) seront prélevés à l'extrémité de la bille de chaque arbre. Deux échantillons supplémentaires seront prélevés sur les arbres non exploités pour lesquels la bille sera entièrement billonnée et les billons pesés séparément. Lors du prélèvement, il faudra veiller à ce que les deux faces transversales (distantes de 5 à 10 cm) soient autant que possible parallèles. La pointe des quartiers de tarte doivent aboutir au niveau de la moelle. Les échantillons seront pesés en forêt à l'aide d'un peson de précision. Les échantillons seront conservés dans des sacs hermétiques, placés à l'ombre, et protégés un maximum de la chaleur jusqu'au laboratoire. Les échantillons trop volumineux et/ou trop lourds seront subdivisés.

4.2. Données de biomasse du houppier

Le houppier sera tout d'abord subdivisé en compartiments, les grosses branches (diamètre gros bout ≥ 20 cm), les moyennes branches (entre 5 et 20 cm de diamètre gros bout), les petites branches diamètre (gros bout ≤ 5 cm) et, les feuilles/fleurs/fruits. Les branches seront coupées en petits billons et/ou éléments transportables et pesables. Un gabarit forestier simplifié (diamètres de 5 et 20 cm) sera utilisé pour faciliter le tri des branches. Les branches présentes sur la bille ou la grume seront incorporées aux tas de branches venant du houppier. Les branches mortes seront pesées. Lors de la chute de l'arbre certaines branches peuvent s'enfoncer dans le sol. S'il n'est pas possible de manipuler ces branches pour les incorporer au tas correspondant, ces branches seront cubées.

Les tas de grosses branches, de branches moyennes, et de petites branches sera pesé en positionnant la balance à proximité du tas. Deux échantillons en forme de rondelle de 5 cm d'épaisseur seront prélevés aléatoirement sur chaque tas de branches.

L'émondage des feuilles, fruits et fleurs sera réalisé sur un sous-échantillon (1/8) du tas de petites branches pour quantifier la proportion des feuilles/fleurs/fruits par rapport aux petites branches. Il s'agira ensuite de mesurer la masse de branches et de feuilles/fleurs/fruits dans le sous-échantillon avec une balance de capacité adaptée à la taille des éléments à peser.

Deux échantillons de feuilles/fleurs/fruits (F1 et F2) seront prélevés. Les échantillons seront pesés en forêt à l'aide d'un peson de précision. Les échantillons seront conservés dans des sacs hermétiques, placés à l'ombre, et protégés un maximum de la chaleur jusqu'au laboratoire. Les échantillons trop volumineux et/ou trop lourds seront subdivisés.

4.3. Cubage des arbres

La première étape du cubage consiste à dérouler le pentadécamètre le long de la bille ou de la grume en veillant à bien épouser la forme. Les billons successifs sont alors matérialisés par des marques à la craie ou à la griffe forestière (Figure 5). Le diamètre gros bout de chaque billon est alors mesuré à l'aide d'un ruban diamétrique et rapporté sur la fiche 2 (Figure 6). Quand le tronc repose complètement sur le sol et que la mesure au ruban n'est pas possible, il faut alors effectuer deux mesures perpendiculaires de diamètre au compas forestier. La mesure au compas étant moins précise, il est recommandé de privilégier les mesures au ruban, même s'il faut creuser en dessous du tronc.

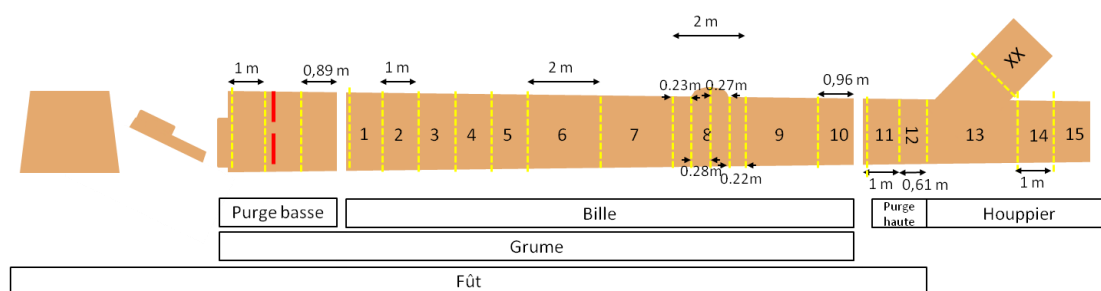


Figure 5 : Cubage de la bille ou de la grume par la méthode des billons successifs (Fayolle et al., 2014).

En cas de présence de déformation sur la bille ou la grume (bosse), il est recommandé de mesurer le diamètre juste avant, au milieu et juste après la déformation. A la fin du cubage, il est recommandé de faire un schéma de l'arbre semblable aux schémas réalisés pour expliquer les différents scénarii sur lequel le numéro de chacun des billons sera reporté.

Fiche 2: Données à récolter sur la tige principale et les branches					
ID Arbre :	<div style="border: 1px solid black; height: 20px;"></div>				
Code_essence :	<div style="border: 1px solid black; height: 20px;"></div>				Partie mesurée: <input type="checkbox"/> La bille <input type="checkbox"/> La grume
Nom scientifique:	<div style="border: 1px solid black; height: 20px;"></div>				
Date :	<div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 20px;"></div>				
Equipe :	<div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 20px;"></div>				
Hauteur de la section d'abattage jusqu'au diamètre de référence (h₂) (cm):	<div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 20px;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 20px;"></div>			
Longueur de la bille/grtume (m):	<div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 20px;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 20px;"></div>			
Epaisseur de l'écorce du Ø petit bout avec le pied à coulisse (cm)	<div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 20px;"></div>	<div style="border: 1px solid black; width: 80px; height: 20px;"></div>			
Faire un schéma de l'arbre et les n° de billons à la page suivante:	<input type="checkbox"/> Réalisé				
Bille/grume pesée (non commerciale):	<input type="checkbox"/> Non		<input type="checkbox"/> Oui		
Présence de pourriture ou creux sur bille/grume:	<input type="checkbox"/> Non		<input type="checkbox"/> Oui		
N° Billon	Longueur (m)	diamètre (cm)	Masse (kg)	remarque	N° photo(s)
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
Matériel utilisé pour la peser:					
<input type="checkbox"/> Filet	<input type="checkbox"/> Sac	<input type="checkbox"/> Corde			
Masse du matériel utilisé (kg)					
Prélèvement QT	Niveau de prélèvement:	N° Echantillon			
	Gros bout du billon n° _____	n° arbre_____ B1 n° arbre _____ B2			
		Masse: _____(g) Masse: _____(g)			
Si non commercial,	Gros bout du billon n° _____	n° arbre_____ B1 n° arbre _____ B2			
		Masse: _____(g) Masse: _____(g)			

5. MESURES AU LABORATOIRE

Les mesures en laboratoire réalisées sur les échantillons de bois ont pour but de déterminer deux paramètres extrêmement importants, l'**infra-densité** (ID) et la **teneur en eau** (TE), respectivement utilisés pour convertir les volumes issus du cubage et les biomasses fraîches issues des pesées en biomasses. Les mesures en laboratoire réalisées sur les échantillons de feuilles/fleurs/fruits ont pour but de déterminer la teneur en eau seulement.

L'infra-densité correspond au rapport entre la masse anhydre et le volume saturé ou volume à l'état vert d'un échantillon. Le volume à l'état vert est considéré comme étant le volume à une humidité supérieure ou égale au point de saturation des fibres (soit une humidité de 30%). Etant donné que les parties cubées de l'arbre (la souche, les purges et la bille) représentent la majeure partie de la biomasse aérienne, une bonne estimation de ce paramètre est donc primordiale. La teneur en eau correspond au rapport entre la masse anhydre et la masse fraîche de l'échantillon de bois ou de feuilles/fleurs/fruits.

5.1. Volume saturé

La méthode préconisée pour déterminer précisément le volume saturé d'un échantillon de bois est la méthode par la **pesée hydrostatique** (Picard et *al.*, 2012; Rondeux, 1999) comme le montre la figure 7. Lors de l'immersion de l'échantillon de bois dans une cuve remplie d'eau, le volume de l'échantillon en cm³ est égal à la masse du volume d'eau déplacé en g. Cette pesée est cependant souvent délicate à réaliser.

- Il faut tout d'abord immerger l'ensemble du dispositif d'immersion (masse de plomb, panier et partie du fil qui soutient le panier) sans l'échantillon dans la cuve remplie d'eau (11).
- Lorsque le dispositif d'immersion dans l'eau est stable, il faut tarer la balance.
- Il faut ensuite remonter le dispositif, insérer l'échantillon de bois et immerger à nouveau l'ensemble.
- La masse du volume d'eau déplacé en g est égale au volume saturé exprimé en cm³.

Il faut faire extrêmement attention pendant la mesure à ce que le dispositif immergé ne touche pas les parois de la cuve.

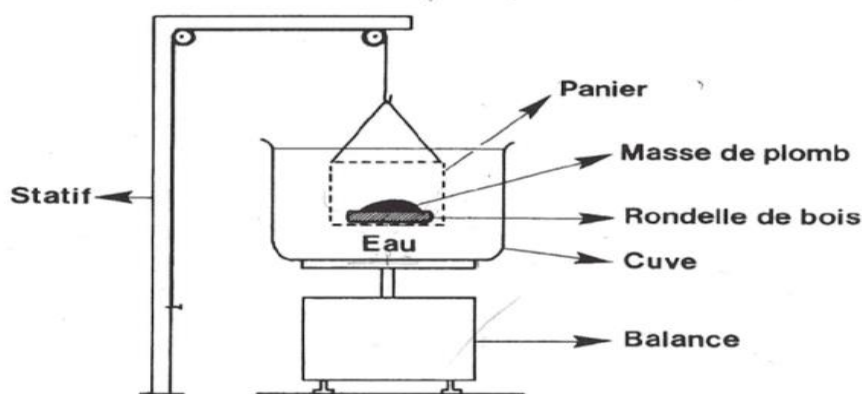


Figure 7 :Dispositif de mesure du volume d'un échantillon de bois par la méthode de pesée hydrostatique (extrait de Rondeux, 1999)

5.2. Masse fraîche et masse anhydre

La masse fraîche de tous les échantillons de bois et de feuilles/fleurs/fruits aura été mesurée en forêt, directement après le prélèvement de l'échantillon, à l'aide d'un peson de précision. Cette mesure sera également réalisée au laboratoire avec une balance de précision. L'échantillon sera pesé dans son sachet, et il faudra bien veiller à noter la masse du sachet sur la fiche laboratoire. Cette remesure n'est pas indispensable mais permet d'effectuer un contrôle de la qualité des données.

Les échantillons de bois et de feuilles/fleurs/fruits seront séchés à une température de 100°C et de 70°C, respectivement (Picard et *al.*, 2012). Les échantillons de bois seront séchés à l'étuve, et les échantillons de feuilles/fleurs/fruits seront séchés dans le séchoir de la société dans la mesure du possible, ou à l'étuve avant ou après les échantillons de bois. Trois échantillons de grande dimension seront pesés tous les jours jusqu'à l'obtention d'une masse constante. La masse d'un échantillon est considérée comme constante quand la différence entre deux mesures consécutives et espacées de 6 h est négligeable (inférieur à 1%). Les autres échantillons, alors considérés comme secs, seront ensuite pesés. Selon Williamson et Wiemann (2010), le séchage d'un échantillon de bois prend entre 24 à 72 h selon la taille de l'échantillon.