REPUBLIQUE TOGOLAISE

- -

MINISTERE 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

Septembre 2017

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)

Sommaire

LISTE DES TABLEAUX ..... **iv**

LISTE DES FIGURES ..... **iv**

SIGLES ET ACRONYMES ..... **v**

1. INTRODUCTION **1**

1.1. Contexte 1

1.2. Justification 2

1.3. Méthode GIEC de mesure des émissions et du stock de carbone 2

1.4. Compréhension et commentaires des TDRs 2

2. BREVE PRESENTATION DE LA REPUBLIQUE DU TOGO **5**

2.1. Localisation, découpage administratif et climat 5

2.2. Zones écologiques 6

2.3. Caractérisation du potentiel forestier du Togo 8

2.3.1. Aperçu général 8

2.3.2. Région des savanes 8

2.3.3. Région de Kara 9

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 **14**

3.1. Approche générale d'estimation du stock de carbone 14

3.2. Inventaire des modèles disponibles 14

3.3. Equations d'estimation de la biomasse disponibles 14

3.4. Estimation du carbone du sol au Togo 26

3.4.1. Bref aperçu de l'estimation du carbone organique du sol auTogo 26

3.4.2. Méthodes d'estimation du carbone du sol 26

3.5. Que retenir 27

3.6. Recommandation 28

4. METHODE DE VALIDATION DES OUTILS DISPONIBLES **28**

4.1. Protocole de mesure des données de biomasse 28

4.2. Type forestier pour l'échantillonnage 28

4.3. Echantillonnage et collecte des données de biomasse 28

4.4. Traitement des données et analyse des résultats 30

4.4.1. Estimations de la biomasse totale aérienne 30
4.4.2. Choix des meilleures équations allométriques d'estimations de la biomasse 30
4.4.3. Estimation de la biomasse totale de chaque arbre 31
4.4.4. Estimation de la biomasse et du carbone totale de chaque placette 31
4.4.5. Calcul et cartographie du stock de carbone au niveau national e 31
5. COLLABORATION AVEC LES STRUCTURES NATIONALES ET RENFORCEMENT DES CAPACITES 32
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 33
ANNEXES 35
Annexe 1 : Planning d'exécution 36
Annexe 2. Protocole de collecte des données sur le terrain et au laboratoire 37
1. Objectif du document 1
2. Plan d'échantillonnage 1
2.1. Localisation des arbres-échantillons 1
3. Données collectées avant l'abattage 2
3.1. Mesures sur pieds 2
3.1.1. Mesures dendrométriques 3
4. Données collectées après l'abattage 5
4.1. Remesure des mesures sur pied 5
4.1.2. Houppier 9
5. Mesures au Laboratoire 10
5.1. Volume saturé 10
5.2. Masse fraîche et masse anhydre 11

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Occupation du sol de la région des savanes 9
Tableau 2: Occupation du sol de la région Kara 10
Tableau 3: Occupation du sol de la région centrale 11
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 16
Tableau 7: Equations allométriques mono espèces établies en zone Soudano- guinéenne 19
Tableau 8: Equations allométriques mono espèces établies en zone Soudanienne 20
Tableau 9: Equations établies en zone sahélienne 25
Tableau 10: Teneur en carbone des sols du Togo 26
Tableau 11. Comparaison des méthodes directes d'estimation du carbone du sol 27
Tableau 12: Plan d'échantillonnage pour la collecte des données de biomasse 29

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Aperçu des composants nécessaires à un système MRV (Scénario de base et suivi)..... 7
Figure 2 : Milieu d'étude..... 10
Figure 3 : Zone écologique du Togo 11

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	Mesurer Reportage Verifier
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

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 21ème 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 surcroit 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. Méthode GIEC de mesure des émissions et du stock de carbone

La mesure et le suivi du stock de carbone nécessite des données par pool de carbone. Pour le pool forestier, les estimations de biomasse sont généralement calculées par type forestier. Comme le montre la figure 1, l'inventaire forestier national du Togo permettra de déterminer le facteur d'émission du carbone forestier dans les différents écosystèmes identifiés.

A cet effet, les équations allométriques constituent un outil indispensable. Leur évaluation entre dans la définition de la méthodologie et outils appropriés pour l'estimation de la biomasse au Togo.

1.4. Compréhension et commentaires des TDRs

Les préoccupations exprimées dans les termes de références de la présente étude sont claires. Ces TdR présentent en effet les principales informations ci-après : le contexte et la justification, les objectifs, les résultats attendus, les mandats, le profil de l'équipe, les livrables et la durée d'exécution de la mission. Les TDR ont le mérite d'indiquer une démarche méthodologique et les principaux acteurs à

impliquer dans la conduite de l'étude. Ils confirment la disponibilité de données (IFN) qui doivent permettre d'apprécier les potentialités forestières des écosystèmes du pays.

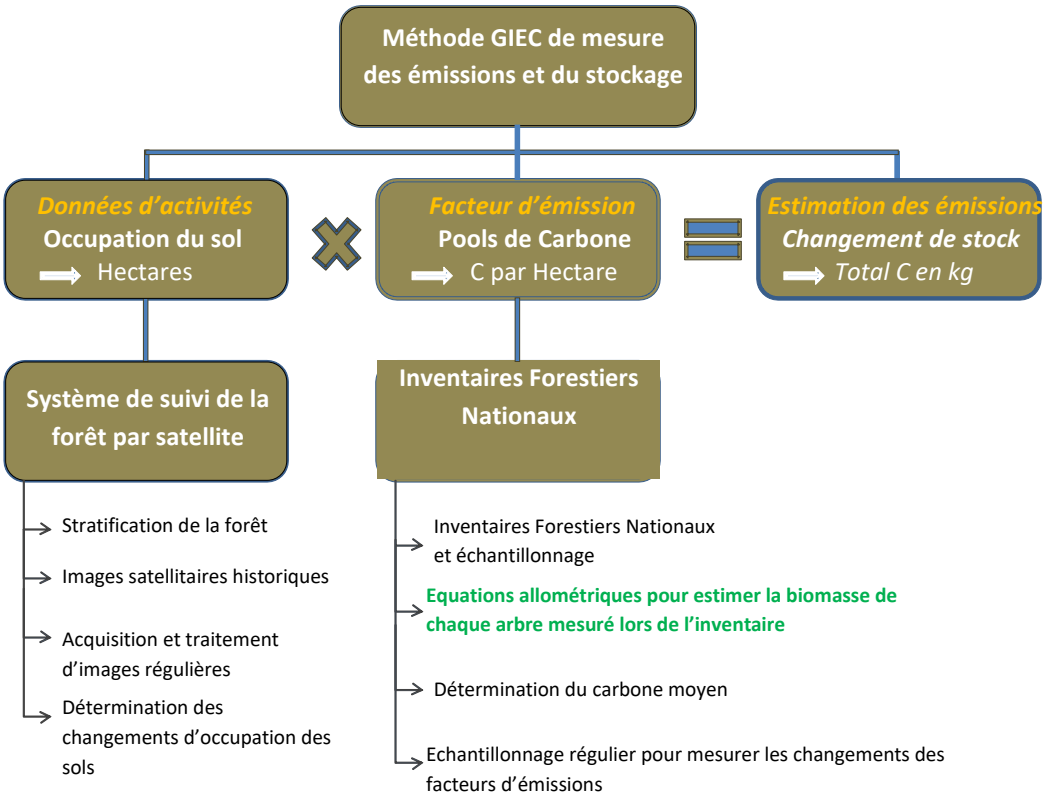


Figure 1: Aperçu des composants nécessaires à un système MRV (Scénario de base et suivi)

La présente étude a pour but de contribuer à 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.

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

- la biomasse aérienne ;
- la biomasse du carbone du sol (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.

Dans un premier temps, il s'agira d'analyser la base de données de l'IFN du Togo en vue d'établir la liste des espèces dominantes dans les différents secteurs phytogéographiques du pays. Ensuite, une

analyse documentaire approfondie des travaux effectués dans la sous-région en Afrique de l'Ouest (en particulier Ghana, Côte d'Ivoire, Bénin et Mali) et au niveau international (pays REDD+) sur des modèles d'estimation de la biomasse et de stock de carbone sera effectuée. Sur la base des informations collectées, des critères simples seront élaborés pour dégager les modèles les plus adaptés du point de vue écologique et en coût-efficacité pour l'évaluation de la biomasse et des stocks et flux de carbone dans les différents écosystèmes du pays.

Dans un second temps, une campagne légère de collecte de données sur des arbres d'espèces dominantes retenues devra être organisée en collaboration avec la coordination du projet afin de tester et de valider les modèles présélectionnés. Après cette étape, une validation du rapport provisoire en atelier en présence des différents acteurs est prévue. Ce rapport donnera lieu à un guide méthodologique.

Enfin, la mission prévoit le renforcement des capacités techniques nationales 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.

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 6ème et 11ème 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 2, 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.

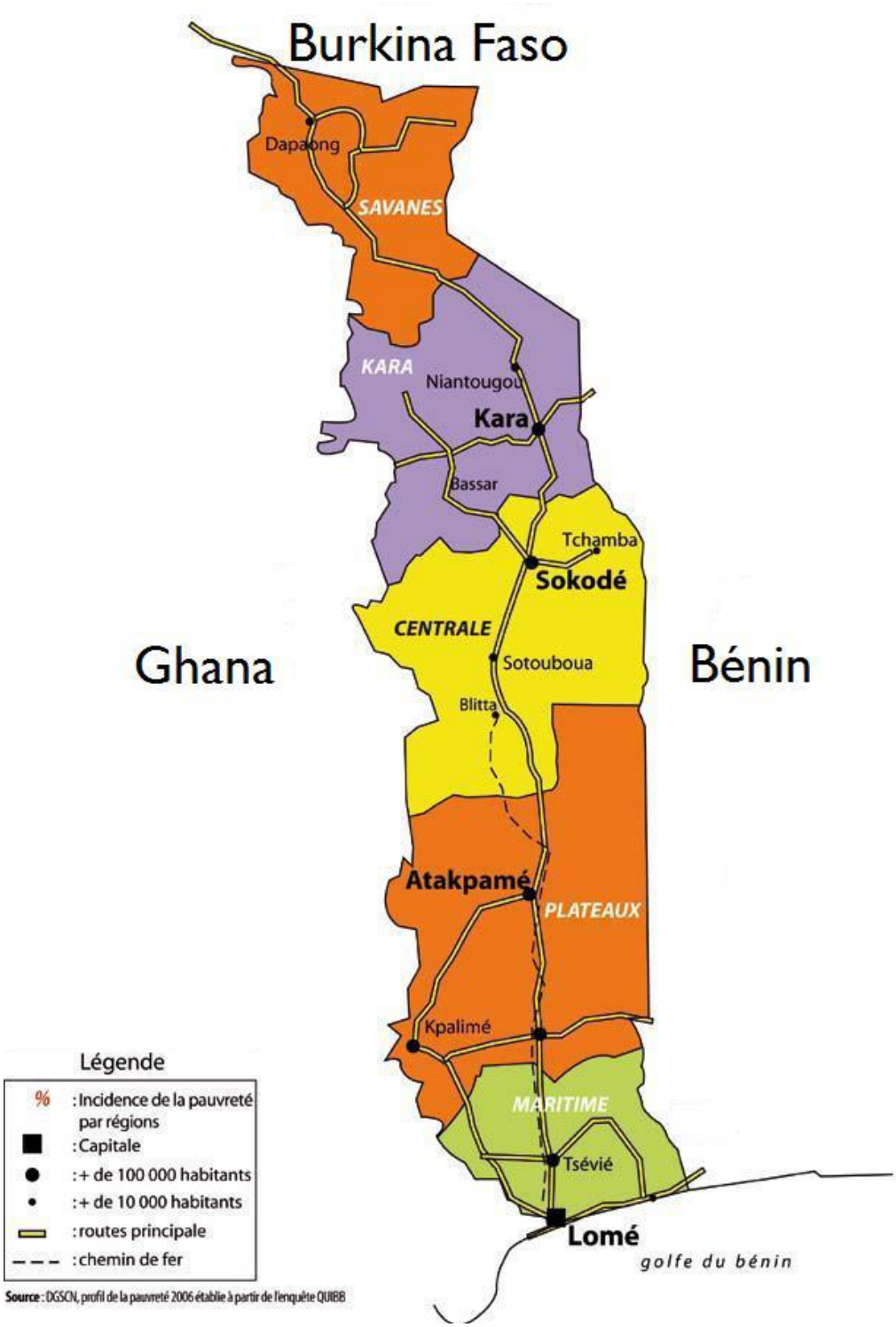


Figure 2: Milieu d'étude

2.2. Zones écologiques

Comme l'indique la figure 3, 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 Défalé-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.

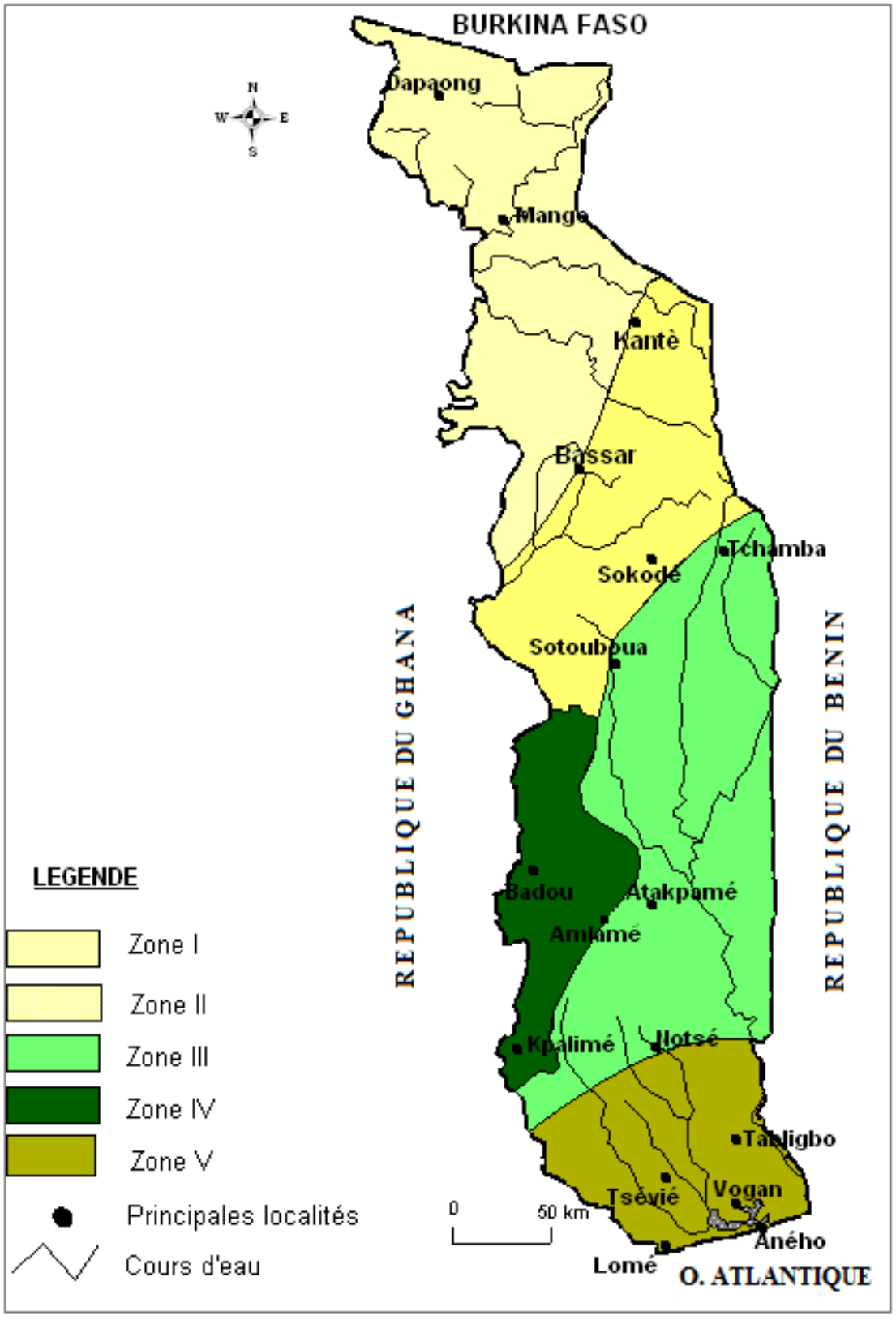


Figure 3: Zones écologiques du Togo

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 m^3/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 (Rolfe) 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 km^2 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.

- ***Potentiel forestier de la région des savanes***

La région des savanes est caractérisée par une surface terrière (G) moyenne de 4,02 m^2/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 m^3/ha avec 5,59 m^3/ha pour le volume fût et 11,07 m^3/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 km^2 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 m^2/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 m^3/ha avec 18,32 m^3/ha pour le volume fût et 21,34 m^3/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 m^3/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 (Rolfe) 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 Km^2 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 m^2/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 m^3/ha pour un volume total de 78,03 m^3/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 claire et savane boisée (210933 ha), des forêts galeries (103172 ha) et des formations herbeuses (62586 ha). Les six espèces a 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
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 Km^2. 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 m^2/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 m^3/ha. Le volume total moyen dans la région est estimé à 65,59 m^3/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 Km^2. 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 m^2/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. 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. L'estimation de la biomasse de l'arbre est fonction des caractéristiques mesurables sur le pied d'arbre (notamment le diamètre et la hauteur) et des paramètres du houppier. A cet effet, plusieurs équations allométriques d'estimation de la biomasse de l'arbre ont été établies et ont fait l'objet de publications scientifiques. Ce dernier aspect fait d'elles une certaine précision admise par la communauté scientifique internationale.

3.2. Inventaire des modèles disponibles

Pour réaliser ce travail de synthèse bibliographique, il a été procédé à l'identification, au repérage, à la collecte puis à l'analyse des informations contenues dans des publications récentes et d'autres documents hautement scientifiques.

Conformément à la définition internationale, le terme «biomasse » correspond au poids sec (matière sèche) constant pour un séchage à 65°C. La biomasse des écosystèmes forestiers peut être obtenue par le biais des équations allométriques de volume ou de la biomasse. Bien que le nombre d'équations allométrique 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.

3.3. 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.

Les équations monospécifiques 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.

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 dives régions et écosystèmes forestiers d'Afrique et d'ailleurs.

- $AGB_{est} = \exp(-1,996 + 2,32 * \ln(D))$ de Brown et al. (1997) ; avec le diamètre (D) des arbres compris entre 5-40 cm (forêt sèche) ;

- $AGB_{est} = 0,0225 \times D^3 - 0,5167 \times D^2 + 13,613 \times D - 58,18$ de Mbow (2009) (zones typiquement de savanes soudano-guinéennes au Sénégal avec diamètre (D) compris entre 5 cm et 45 cm) ;

- $AGB_{est} = \exp(-2,235 + 0,916 \ln(\rho D^2 H))$ et
$AGB\ est = \rho \times \exp(-0,667 + 1,784 \ln(D) + 0,207 (\ln D)^2 - 0,0281 (\ln D)^3$ de Chave et *al.* (2005) avec diamètre (D) compris entre 5 cm et 105 cm (forêt sèche) ;

- $AGB_{est} = expo(-1,103 + 1,994 \ln(D) + 0,317 \ln(H) + 1,303 \ln(\rho))$ de Vieilledent et *al*. (2012) avec un diamètre inférieur à 40 cm (forêt sèche), avec ρ la densité spécifique du bois ;

$AGB_{est} = 1,3087 \times 10^{-4} \times D^{2,4949} \times \rho^{1,1804}$ de Nakou *et al* 2017 avec un diamètre inférieur à 115 cm dans la zone soudano-guinéenne au Bénin ;

- $AGB_{est} = 3,47\ 10^{-3} \times \rho D^2 H$ Henry *et al.* (2010) mais dans la zone de forêt dense au Ghana avec 42 données de biomasse arbres ;

- $AGB_{est} = 0,0673\ (\rho * D^2 * H)^{0.976}$ de Chave et *al*. (2014) avec un diamètre compris entre 5 cm et 212 cm pour un total de 4004 arbres prenant en compte une large gamme de type des végétations à travers toute la zone tropicale.

En ce qui concerne les équations monospécifiques, elles portent sur un grand nombre d'espèces dominantes mais certaines les espèces

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

N°	Nbre d'arbres	Equations	Pluviométrie (mm)	R^2	RSE (%)	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
Equations avec un seul prédicteur (D)									
1	91	$B_{est} = \exp(-1{,}9967 + 2{,}3924 \times \ln(D))$	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	$B_{est} = 0{,}091 \times D^{2{,}472}$	1400	0,96	-	D (cm) 3-102	Lower Yala, Middle Yala and Upper Yala	Kenya	Kuyah et *al.* (2012a)
3	167	$B_{est} = 0{,}1027 D^{2{,}480}$					four sites of Lindi	Tanzanie	Mugasha et *al.* (2013)
4	113	$B_{est} = 2{,}5553 \ln(D) - 2{,}5265$	894,7	-	-	D 1,6-37,4	15.2167_15.2833_S et 29.1500_29.2333_E	Zambie	Chidumayo (2013)
5	29	$B_{est} = \exp(2{,}601 \times \log(D) - 3{,}629)$	850	0,93		D (cm) 5-73	Nhambita 18°58'44'' S, 34°10'34'' E	Mozambique	Ryan et *al.* (2011)
6	269	$B_{est} = 38{,}4908 - 11{,}7883(D) + 1{,}1926(D)^2$	-	-	-	-	-	Pantropical	Brown *et al.* (1989)
7		$B_{est} = \exp(-1{,}996 + 2{,}32 * \ln(D))$				D (cm) 5-40	Zone de forêt sèche	Sénégal	Brown *et al.* (1987)
8		$AGB_{est} = 0{,}0225 \times D^3 - 0{,}5167 \times D^2 + 13{,}613 \times D - 58{,}18$				D (cm) 5-45	Zone de savane soudano-guinéennes	Sénégal	Mbow et *al.* (2009)
Equations avec deux prédicteurs (D et H)									

N°	Nbre d'arbres	Equations	Pluviométrie (mm)	R^2	RSE (%)	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
9	91	$B = \exp(-2{,}9946 + 0{,}9317\ln(D^2H))$	2950	0,971	0,443	D (cm) 1-138	Campo-Ma 2◦10_–2◦52_N 9◦50_–10◦54_E	Cameroun	Djomo et *al.* (2010)
10	167	$B = 0{,}0763 \times D^{2{,}2046} \times H^{0{,}4918}$					Lindi	Tanzanie	Mugasha et *al.* (2013)
							‘’		
Equations avec deux prédicteurs (D et ρ)									
11	101	$B = \exp[-4{,}0596 + 4{,}0624\ln D - 0{,}228(\ln D)^2 1{,}4307\ln \rho]$						Gabon	Ngomanda et *al.* (2014)
12	137	$B = \rho \times \exp(-1{,}183 + 1{,}940\ln(D) + 0{,}239(\ln D)^2 - 0{,}0285(\ln D)^3)$						Cameroun	Fayolle et *al.* (2013a)
13	91	$B = \exp(-1{,}8623 + 2{,}4023\ln(D) - 0{,}3414\ln(\rho))$	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	$B = \rho \times \exp(-1{,}499 + 2{,}148 \times \ln(D) + 0{,}207 \times (\ln(D))^2 - 0{,}0281 \times (\ln(D))^3)$				D(cm) 5-105	Forêt sèche	Pantropical	Chave et *al.* (2005)
Equations avec trois prédicteurs (D, H et ρ)									
15	101	$B = \exp[2{,}5680 + 0{,}9517\ln(D^2H) + 1{,}189\ln \rho]$						Gabon	Ngomanda et *al.* (2014)
16	12	$B = 1{,}603 \times (\rho D^2 H)^{0{,}657}$						Cameroun	Ebuy et *al.* (2011)
17	91	$B = -2{,}4360 + 0{,}1399 \times (\ln D)^2 + 0{,}7373 \times \ln(D^2H) + 0{,}2790\ln(\rho)$	2950	0,971	0,437	D (cm) 1-138	Campo-Ma 2◦10_–2◦52_N 9◦50_–10◦54_E	Cameroun	Djomo *et al.* (2010)

N°	Nbre d'arbres	Equations	Pluviométrie (mm)	R^2	RSE (%)	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
18	42	$AGB_{est} = 3{,}47\,10^{-3} \times \rho D^2 H$							Henry *et al.* (2010)
19		$AGB_{est} = \exp(-1{,}103 + 1{,}994\ln(D) + 0{,}317\ln(H) + 1{,}303\ln(\rho))$				D(cm) <40			Vieilledent et *al*. (2012)
20	2410	$B = \exp\left(-2{,}187 + 0{,}916 \times \log\left(D^2 H \rho\right)\right)$					Forêt sèche	Afrique	Chave *et al.* (2005)
21	2410	$Ln(B_t) = -2{,}294 + \ln\left(\rho D^2 H\right)$					Tous les types d'écosystèmes	Afrique, Amérique, Océanie	Chave *et al.* (2005)
22	2410	$Ln(B_t) = -2{,}235 + 0{,}916\ln\left(\rho D^2 H\right)$					Forêts sèches	Afrique, Amérique, Océanie	Chave et *al.* (2005)
23	4004	$B_t = 0.0673\ (\rho * D^2 * H)^{0.976}$				D (cm) 5 - 212			Chave *et al.* (2014)
24		$B_t = 1{,}3087 \times 10^{-4} \times D^{2{,}4949} \times \rho^{1{,}1804}$							Nakou et *al.* (2017)

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

Espèces	n	Equations	Pluviométrie (mm)	R^2	RSE	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
Isoberlinia spp	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-Maro Comprise entre 8°80' et 9°10' de latitude Nord et 1°55' et 2°25' de longitude Est	Bénin	Fonton et *al.* (2009)
Anogeissus leiocarpa	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 *al.* (2009)
Daniellia oliveri	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 *al.* (2009)
Albizia adianthifolia	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 *et al.* (2007)
Pterocarpus erinaceus	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 *al.* (2015)

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

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 *al.* (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 *al.* (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 *al.* (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 *al.* (2014)
Genre Combretum	45	$B_t = 6{,}071H - 0{,}959H^2 + 0{,}225H^3$	Climat semi-aride Pluviométrie	0,737	0,113	Hauteur (H) (m) 2,5–12,8	Six régions forestières comprises entre 13° et 16°	Sénégal	Mbow et *al.* (2014)

Espèces	**n**	**Equations**	**Pluviométrie (mm)**	**R^2**	**RSE**	**Paramètres dendrométriques**	Localités	Pays	**Auteurs**
			variant de 600 à plus de 1000 mm				Latitude 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 *al.* (2014)
Jatropha curcas	46	$B_t = 0{,}897S_h^{1,224}$	815	0,803	Faible	DBH (cm) Supérieur à 6cm	Koulikoro Climat semi-aride	Mali	Degerickx et *al.* (2016)
Oxytenanthera abyssinica	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 *al.* (2016)
Oxytenanthera abyssinica		$\ln B_t = 1{,}524 + 0{,}222H + 0{,}650D + 1.222 \times \rho$	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 *al.* (2016)
Acacia bussei Harms ex Sjostedt.	20	$\mathrm{Ln}\,(B_t) = -5{,}6308 + 2{,}5838\ln(C_B)$	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 *al.* (2013)
Acacia mellifera	20		238-896	0,96	Faible	Circonférence basale (cm)	Région de Borana (District de Yabelo)	Ethiopie	Hasen-Yusuf et

Espèces	**n**	**Equations**	**Pluviométrie (mm)**	**R^2**	**RSE**	**Paramètres dendrométriques**	Localités	Pays	**Auteurs**
(Vahl.) Benth.		$Ln(B_t) = -2,7777 + 0,963\ln(SB) + 0,7503\ln(CV)$				5-10	(41 06 95 E, 51 79 74 N)		*al.* (2013)
Acacia etabaica Schweinf.	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 *al.* (2013)
Acacia senegal (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 *al.* (2013)
Acacia drepanolobium 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 *al.* (2013)
Acacia oerfota (Forssk) Schweinf.	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 *al.* (2013)
Acacia reficiens Wawra.	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 *al.* (2013)

Espèces	**n**	**Equations**	**Pluviométrie (mm)**	**R^2**	**RSE**	**Paramètres dendrométriques**	Localités	Pays	**Auteurs**
Commiphora africana (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)
Jatropha curcas	390	$B_{est} = 1{,}01 - 0{,}609D + 0{,}089D^2$	800-900	0,95		Dbh <20 cm	Boni (11_29°N et 3_23°W)	Burkina Fasso	Bayen et *al.* (2015)
Acacia dudgeoni	558	$B_{est} = 0{,}938 + 0{,}119Db + 0{,}099D + 0{,}001H - 0{,}004D_bD$	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)
Acacia macrostachya	523	$B_t = 3{,}935 - 0{,}0199D_b - 0{,}088D - 0{,}007H + 0{,}017D_bD + 0{,}0008D_b \times H + 0{,}006DH - 0{,}00006D_bDH$	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)
Anogeissus leiocarpa	120	$B_t = 0{,}889 + 0{,}107D_b + 0{,}304D + 0{,}004H - 0{,}006D_bD - 0{,}00002DH + 0{,}000004D_bDH$	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)
Combretum ghasalense	433	$B_t = 0{,}961 + 0{,}086D_b + 0{,}168D + 0{,}0009H - 0{,}004D_bD$	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)
Combretum glutinosum	103	$B_t = 0{,}661 + 0{,}121D_b + 0{,}190D - 0{,}005D_bD$	845-886	0.852		Dbh in cm:9.594±0.392	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadogo et *al.* (2010)

Espèces	n	Equations	Pluviométrie (mm)	R^2	RSE	Paramètres dendrométriques	Localités	Pays	Auteurs
Combretum micranthum	89	$B_t = 0,827 + 0,184D_b + 0,0337D - 0,001D_bD + 0,0004DH$	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	Sawadogo et *al.* (2010)
Combretum nigricans	98	$B_t = 0,213 + 0,0132D_b + 0,204D + 0,0007H - 0,005D_bD$	845-886	0.900		Dbh (cm):17.509±0.694	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadogo et *al.* (2010)
Crossopterix febrifuga	253	$B_t = 0,933 + 0,030D_b + 0,178D + 0,002H - 0,002D_bD + 0,00007D - 0,0002DH - 0,0001D \times H$	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	Sawadogo et *al.* (2010)
Detariummicro carpum	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±0.105	Laba (11°40' N, 2°50' W) Tiogo (12°13' N, 2°42' W)	Burkina Faso	Sawadogo et *al.* (2010)
Entada Africana	957	$B_t = 0,232 + 0,101D_b + 0,141D + 0,002H - 0,004D_bD$	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	Sawadogo et *al.* (2010)
Piliostigma thonnigii	443	$B_t = 0,358 + 0,100D_b + 0,169D + 0,001H - 0,004D_bD$	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	Sawadogo et *al.* (2010)

B_t= Biomasse totale aérienne, Sh= Surface du houppier, G=surface terrière, D_{10}= 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 *al.* (2014)
Faidherbia albida	14	$Y = 0,112X^{2,23}$	503,17 mm	0,96	0,428	Dbh (cm) 7,3 - 36,6	(Maradi)	Niger	Laminou et *al.* (2015)

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

3.4. Estimation du carbone du sol au Togo

3.4.1. Bref aperçu de l'estimation du carbone organique du sol au Togo

La revue de littérature révèle un certains nombres de travaux relatif à l'estimation du carbone organique du sol (Fontodji et al. 2009 ; Kintche 2011, Koriko et al. 2013, Akpakpi et al. 2014,). Fontondji et *al.* (2009) et Akpakpi et *al.* (2014) ont utilisé la méthode d'oxydation chimique pour déterminer la teneur en matière organique et en carbone dans les sols. La détermination de la teneur en carbone organique totale par combustion sèche a été faite par Koriko et al. (2013), tandis que Kintchè (2011) a utilisé l'approche basé sur les modèles pour évaluer la dynamique temporelle des propriétés physico-chimique du sol. Cependant toutes études sont éparses, peu représentatives et limitées au sol en zone de production de charbon, sous cultures cotonnières, ou juste les substances humiques naturelles du sol.
A l'échelle nationale, d'après le rapport sur les tendances d'évolution et facteurs de dégradation des terres au Togo (2017), l'évaluation de la teneur en stock de carbone organique du sol dans la couche de 0 à 30 cm,(sur la base des modèles de prédictions provenant de SoilGrids250m), indique qu'au Togo sur la période 2000 à 2010, le stock de carbone organique en zone forestière est passée en 2000 de 44,5 t/ha à 33,4 t/ha en 2010. En ce qui concerne les savanes arbustives, herbeuses et les prairies, la teneur en carbone est demeurée constante et est égale à 35,9 t/ha entre 2000 et 2010.

Tableau 10: Teneur en carbone des sols du Togo

Occupation des terres	**Teneur en carbone organique (tonne/ha)**	
	2000	**2010**
Zones forestières	44,5	33,4
Savanes arbustives, savanes herbeuses, prairies (faible couverture végétale)	35,9	35,9

Source: Tendances d'évolution et facteurs de dégradation des terres au Togo (2017).

3.4.2. Méthodes d'estimation du carbone du sol

Les mesures directes et les modélisations sont utilisées pour l'estimation du stock de carbone. Les mesures directes requièrent la collecte d'échantillons de sol entre 0 et 2m. La profondeur de 30 cm est souvent considérée dans l'estimation du stock de carbone du sol Etant donné qu'entre 0 et 30 cm de profondeur, le carbone organique est le plus chimiquement décomposable et le plus affecté par les perturbations anthropiques et naturelles (IPCC, 2006), les approches de collectes considèrent donc cette profondeur pour les mesures. Il existe principalement 3 méthodes de mesures directes à savoir : la méthode de Walkley-Black, la méthode de perte-au-feu, et la combustion sèche dont les principes, avantages et inconvénients sont présentés dans le tableau 11.
Les approches basées sur les modèles décrivent les processus de décomposition de la litière dans le sol avec des facteurs clés (chute de litière, décomposition de litière, variables climatiques, type de sol, type d'occupation du sol, relief, pente, etc.) et leur interaction. Ces modèles simulent le processus de décomposition basé sur les données collectées sur le terrain. En termes de modèles élaborés nous avons Yasso 07 (Liski et al. 2005), DocMod (Currie & Aber 1997), Roth C (Coleman & Jenkinson 1996), ROMUL (Chertov et al. 2001; Komarov et al. 2003), Century Soil Organic Matter Model (Parton et al. 1987; Parton et al. 1994). Malheureusement, certaines de ces données sont manquantes ou peu fiables a l'échelle Ouest Africaine réduisant la calibration desdits modèles.

Tableau 11. Comparaison des méthodes directes d'estimation du carbone du sol

Méthodes directes	Principes	Avantages	Inconvénients	Sources
méthode de Walkley-Black	Oxydation chimique	Fraction de carbone	Couteux Laborieux Rejets toxiques Oxydation incomplète du carbone	Walkley and Black, 1934
la méthode de perte-au-feu	Combustion	Détermination de la matière organique Rapidité Peu couteux	Utilisation facteur de conversion pour déterminer le carbone Imprécision	Wright et al 2008
La méthode de combustion sèche	Combustion	Précis Détermination de la teneur en carbone, en hydrogène, en azote et en sulfure	Couteux Equipements and infrastructures adéquats Opérateurs qualifiés	McCarty et al., 2002

Cependant, une autre alternative d'estimation du carbone du sol (SoilGrids system) a été développée 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. Par les méthodes de régression logique et des images satellitaires (MODIS), des cartes de prédiction globale des propriétés physico-chimiques ont été réalisées suivant la profondeur du sol (www.soilgrids.org). Ces cartes sont facilement accessibles et permettent un téléchargement des informations géo-référencées. Ces informations sont ensuite introduites dans un logiciel de cartographie (ArcMap, Qgis, etc.) pour subir des méthodes de géotraitement pour extraire les propriétés physico-chimiques du sol au niveau local ou nationale.
Cette dernière méthode cadre bien avec le RPP du Togo qui a choisi le Tiers 2 pour l'estimation du stock de carbone du sol.

3.5. Que retenir

Il ressort de l'analyse documentaire effectuée que plusieurs équations allométriques ont été développées dans plusieurs pays et régions de l'Afrique. Ces équations identifiées reflètent les variabilités de biomasse et de carbone dans certaines zones écologiques.
Cette étude qui s'est limitée au choix d'équations de qualité a permis également de constater que les équations existantes concernent très souvent des espèces dominantes et quelques espèces d'intérêt pour les populations locales. Les équations monospécifiques bien que propices pour l'estimation de la biomasse totale des arbres n'arrivent pas à couvrir les multiples espèces rares propres aux écosystèmes tropicaux.
Enfin, il ressort que beaucoup d'espèces présentes dans la base de données de l'IFN-Togo (Kammer et Djossou, 2016) ne possèdent pas d'équations allométriques fiables d'estimation de la biomasse.

3.6. Recommandation

Cette étude recommande qu'en lieu et place des équations monospécifiques, des équations multispécfiques qui ont fait leurs preuves en termes de qualité scientifiques dans plusieurs travaux en Afrique et partout ailleurs dans le monde. Mais avant leur utilisation, il est indispensable de vérifier leur qualité de prédiction dans le contexte local, à l'échelle d'un écosystème, d'une zone agro-écologique et/ou du pays.

En ce qui concerne le carbone du sol, des estimations fiables existent sur le pays couvrant la période 2000-2010. Dans le cadre de ce travail, il sera procédé à une actualisation sur la base des données disponibles sur la teneur en carbone organique en exploitant la base de données internationale SoilGrids d'une maille de 250m.

4. METHODE DE VALIDATION DES OUTILS DISPONIBLES

4.1. Protocole de mesure des données de biomasse

La méthode utilisée pour la collecte des données de biomasse est la méthode destructive sur un certain nombre d'arbres répartis dans les 4 espèces les plus dominantes à l'échelle nationale. Le protocole de mesure des donnés de biomasse est présenté à l'annexe 1.

4.2. Type forestier pour l'échantillonnage

Les espèces végétales les plus dominantes sont retrouvées dans différents écosystèmes à l'échelle nationale. Les résultats de l'IFN indiquent que les régions centrale et des plateaux sont potentiellement les mieux pourvues en ressources ligneuses. Elles sont retenues pour la collecte des données devant servir au test et à la validation des outils d'évaluation de la biomasse carbone.

4.3. Echantillonnage et collecte des données de biomasse

L'analyse des données d'inventaire forestier national a permis d'identifier les espèces à fortes valeurs d'indice d'importance dans deux régions comme le montre le tableau 12. On a : *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertner subsp. *Paradoxa*, *Lannea acida* A. Rich., *Ficus sur* Forssk etc.

Cette étude vise essentiellement la validation des équations allométriques disponibles. 20 arbres-échantillons des 4 premières espèces à valeurs d'indice d'importance les plus élevées : *Anogeissus leiocarpus* (DC.) Guill. & Perr., *Pterocarpus erinaceus* Poir., *Vitellaria paradoxa* C.F. Gaertner subsp. *Paradoxa* et *Lannea acida* A. Rich. seront choisis et répartis en 5 classes de diamètre (tableau 13).

Les arbres-échantillons seront localisés à partir des données disponibles dans la base de données de l'IFN. Rappelons qu'aucun arbre des placettes de l'IFN ne fera partie des arbres-échantillons de cette étude. Toutefois, l'abondance d'une espèce dans les placettes d'inventaire présage de sa présence dans leur environnement immédiat. Une liste de ces placettes sera établie avec leurs coordonnées géographiques. A l'aide de GPS, ces placettes seront repérées sur le terrain et les espèces d'arbre retenues identifiées. Un arbre sera choisi au hasard pour chacune des 4 espèces retenues et dans chacune des 5 classes de diamètres définies (tableau 11).

Tableau 12: Poids (Importance value) des 4 espèces dominantes au niveau des régions des Plateaux et du Centre

	Espèces dominantes			
Paramètres	*Anogeissus leiocarpus*	*Pterocarpus erinaceus*	*Vitellaria paradoxa*	*Lannea acida*
Pour tout le pays				
Importance value	33,7	38,4	44,7	33,0
Fréquence relative	23,3	31,0	34,4	28,6
Densité relative	4,0	3,8	6,0	2,6
Dominance relative	6,4	3,6	4,3	1,9
Région du Plateau				
Importance value	43,6	37,3	31,4	22,4
Fréquence relative	32,1	29,6	24,2	19,9
Densité relative	5,9	4,5	4,9	1,5
Dominance relative	5,5	3,3	2,3	1,1
Région Centre				
Importance value	39,8	33,7	57,0	38,0
Fréquence relative	28,4	28,7	46,4	34,6
Densité relative	3,4	2,4	6,2	2,2
Dominance relative	8,1	2,6	4,5	1,5

Tableau 13: Plan d'échantillonnage pour la collecte des données de biomasse

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

Avant l'abattage, différentes informations seront notées sur la position (coordonnées géographiques, localité) et l'environnement (type de formation végétale) de l'arbre sur pied, et différentes mesures seront 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 des variables d'intérêt telles que les rayons du houppier dans les quatre directions (Nord, Sud, Est et Ouest) etc.

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

Le cubage de la bille des arbres-échantillon sera réalisé par la **méthode des billons successifs** (Rondeux, 1999), qui consiste en la mesure du diamètre régulièrement le long de la bille, tous les mètres sur les cinq premiers mètres de la bille puis tous les deux mètres pour le reste de la bille.

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.

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. Rappelons que 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 plus de détail sur les techniques de collecte des données de biomasse, le lecteur peut se référer au document : Protocole de mesure des données de biomasse.

4.4. Traitement des données et analyse des résultats

4.4.1. Estimations de la biomasse totale aérienne

La biomasse aérienne totale (AGB_{obs}) de chaque arbre échantillon sera 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.

4.4.2. Choix des meilleures équations allométriques d'estimations de la biomasse

A cette étape, chacune des principales équations multi-espèces retenues (confère section 3.3) sera testée. On introduira dans chaque équation, le diamètre, la hauteur et/ou la densité spécifique de chacun des 20 arbres-échantillons.

Les écarts entre les biomasses estimées (AGB_{est}) et les biomasses observées (AGB_{obs}) seront appréciés à travers par les calculs des paramètres statistiques destinés à évaluer la qualité de prédiction des équations choisies. Il s'agit du biais moyen relatif (RMAE%), de l'erreur quadratique moyenne de prédiction (PMSE) et de l'erreur relative moyenne de prédiction (RPMSE).

$$RMAE\% = 100 \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{\left| \ln AGB_{est,i} - \ln AGB_{obs,i} \right|}{\ln B_{obs,i}},$$

$$PMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (\ln AGB_{est,i} - \ln AGB_{obs,i})^2)},$$

$$RPMSE = 100 * \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} [(\ln AGB_{est,i} - \ln AGB_{obs,i}) / \ln AgB_{obs,i}]^2},$$

avec $AGB_{est,i}$, la valeur prédicte et $AGB_{obs,i}$ la valeur observée de la biomasse de l'arbre i , n la taille de l'échantillon. Les équations retenues sont celles qui auront les valeurs les plus faibles de ces trois paramètres de prédictions (RMAE%, PMSE, RPMSE).

4.4.3. Estimation de la biomasse totale de chaque arbre

Avec l'équation allométrique retenue, la biomasse aérienne de chaque arbre des placettes de l'IFN sera estimée. A cette biomasse sera ajoutée la biomasse souterraine des arbres pour l'obtention de la biomasse totale B_{tot}. La biomasse souterraine est estimée à environ 20% du de la biomasse aérienne (IPPC, 2006).

4.4.4. Estimation de la biomasse et du carbone totale 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 sera obtenue en multipliant la biomasse totale de la placette par 0,47. Les quantités de carbone du sol et de la litière sont estimées par placette et par type de formation végétale (confère section 3.6).

La somme de chacune de ces valeurs donne la quantité totale de carbone séquestrée de la placette. Cette quantité sera ramenée à l'hectare en la multipliant par $10^4/S$; S étant la surface en m^2 de chaque placette d'inventaire.

4.4.5. Calcul et cartographie du stock de carbone au niveau national e

Cette étape consiste à extrapoler les quantités de carbone séquestré obtenue à partir de données d'inventaire forestier national en utilisant l'indice de végétation normalisé du Togo.

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.

Parmi les indices les plus élémentaires et les plus anciens, on trouve l'indice de végétation brut, ou indice différentiel de végétation (DVI) qui est égal à la simple différence des bandes du proche infrarouge et du rouge (Bacour et al, 2006).

L'indice de végétation par quotient (RVI), s'exprime également de façon très simple. Il est égal au rapport entre les bandes du PIR et du rouge (Krieger et al, 1969; Jordan, 1969). L'inconvénient de ces indices est qu'ils sont très sensibles aux variations atmosphériques, ainsi qu'à la contribution spectrale des sols. En outre, lorsque la végétation est très dense, la réflectance dans la bande rouge devient très faible, ce qui entraîne une saturation des valeurs de l'indice RVI.

L'indice le plus connu et le plus utilisé est l'indice de végétation par différence normalisé ou indice de Tucker (NDVI) (Rouse and Haas, 1973; Tucker, 1979). Son expression est la suivante :

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

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

ρ_R est la réflectance du rouge

Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie 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 sera calculé à partir des images satellitaires avec le logiciel QGIS. Une équation sera par la suite établie entre la quantité de carbone séquestrée et l'indice de végétation NDVI. Cette équation sera utilisée pour générer une couche qui représente la quantité de Carbone séquestrée sur tout le Togo.

5. COLLABORATION AVEC LES STRUCTURES NATIONALES ET RENFORCEMENT DES CAPACITES

Pour l'atteinte des objectifs de l'étude, des collaborations avec les structures seront 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.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

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.

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.

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.

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., Brienen 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 Dicho 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.

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.

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.

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.

Mugasha, W. A., Eid, T., Bollandsas, 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 Managemen/ Elsevier. 2013a. pp. 310: 87–101.

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.

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.

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.*

ANNEXES

Annexe 1: **Planning d'exécution**

Annexe 2. **Protocole de collecte des données sur le terrain et au laboratoire**

ANNEXE 1 : PLANNING D'EXECUTION

Activités	Sous-activités	Responsable	Participation	Jan-Mars	Avr-Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Livrables
Phase 1 : Planification opérationnelle de la méthodologie et adaptation au contexte national togolais												
Réaliser un Etat des lieux des outils d'estimation du stock de carbone	Revoir en détail les travaux scientifiques existants	C										Etat des lieux sur les outils d'évaluation du stock de carbone
	S'approprier les données d'inventaire national du Togo (Données d'inventaire et cartographie)	C & MERF										
Adopter une méthodologie	Finaliser la méthodologie d'évaluation du stock de carbone des différents écosystèmes forestiers du Togo	C										Rapport de la méthodologie d'évaluation des stocks de carbone
	Présenter, discuter et valider la méthodologie développée (Atelier)	C & UGP	MERF UL									
Phase 2 : Collecte, traitement des données, évaluation et choix méthodologique d'estimation du stock de carbone												
Réaliser la collecte des données	Elaboration du protocole de collecte des données	C										
	Former l'équipe de collecte des données	C	MERFUL									
	Réaliser et suivre –contrôler de la collecte des données	C	UGP MERF									
Traiter les données	Tester les outils disponibles et préciser la méthodologie d'estimation des stocks de carbone	C										Document de définition de la méthodologie et des outils pour l'évaluation de la biomasse végétale dans les différents compartiments au Togo
Rapporter et valider la méthodologie et outils de quantification du stock de carbone	Rédiger le rapport d'évaluation du stock de carbone	C										
	Tenir un atelier d'évaluation des résultats	OGP & C	MERF UL									

C : Consultant
UGP : unité de Gestion du Projet
MERF : Ministère de l'Environnement et des Ressources Forestières
UL : Université de Lomé

ANNEXE 2. PROTOCOLE DE COLLECTE DES DONNEES 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**

2.1. Localisation des arbres-échantillons 1

3. Données collectées avant l'abattage **2**

3.1. Mesures sur pieds 2

3.1.1. Mesures dendrométriques 3

4. Données collectées après l'abattage **5**

4.1. Remesure des mesures sur pied 5

4.1.1. Bille ou grume ..... **Erreur ! Signet non défini.**

4.1.2. Houppier 9

5. Mesures au Laboratoire **10**

5.1. Volume saturé 10

5.2. Masse fraîche et masse anhydre 11

Liste tableaux

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

Liste figures

Figure 1 : Extrait de la fiche de terrain concernant les données à récolter sur l'identification des arbres. 3
Figure 2 : Convention de mesure du diamètre de référence (d'après Cailliez, 1980). 4
Figure 3 : Schéma représentant les mesures dendrométriques réalisées sur les arbres sur pied. 4
Figure 4 : Calcul de l'infra-densité : échantillons de bois prélevés au niveau de la souche (S1 et S2), à différents niveaux dans la bille (CB1-CB4) ainsi qu'à l'extrémité de celle-ci (B1 et B2) (Fayolle et al., 2014). 5
Figure 5 : Echantillon de bois en forme de quartier de tarte, illustration d'un échantillon idéal (a) et d'un échantillon de mauvaise qualité (b) (Fayolle et al., 2014). ..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 6 : Cubage de la bille ou de la grume par la méthode des billons successifs (Fayolle et al., 2014). 6
Figure 7 : Extrait de la fiche de terrain concernant les données à récolter sur la bille ou la grume. 8
Figure 8 :Dispositif de mesure du volume d'un échantillon de bois par la méthode de pesée hydrostatique (extrait de Rondeux, 1999) 11

Protocole de collecte des données 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 14 : Plan d'échantillonnage pour la collecte des données de biomasse.

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

2.1. Localisation des arbres-échantillons

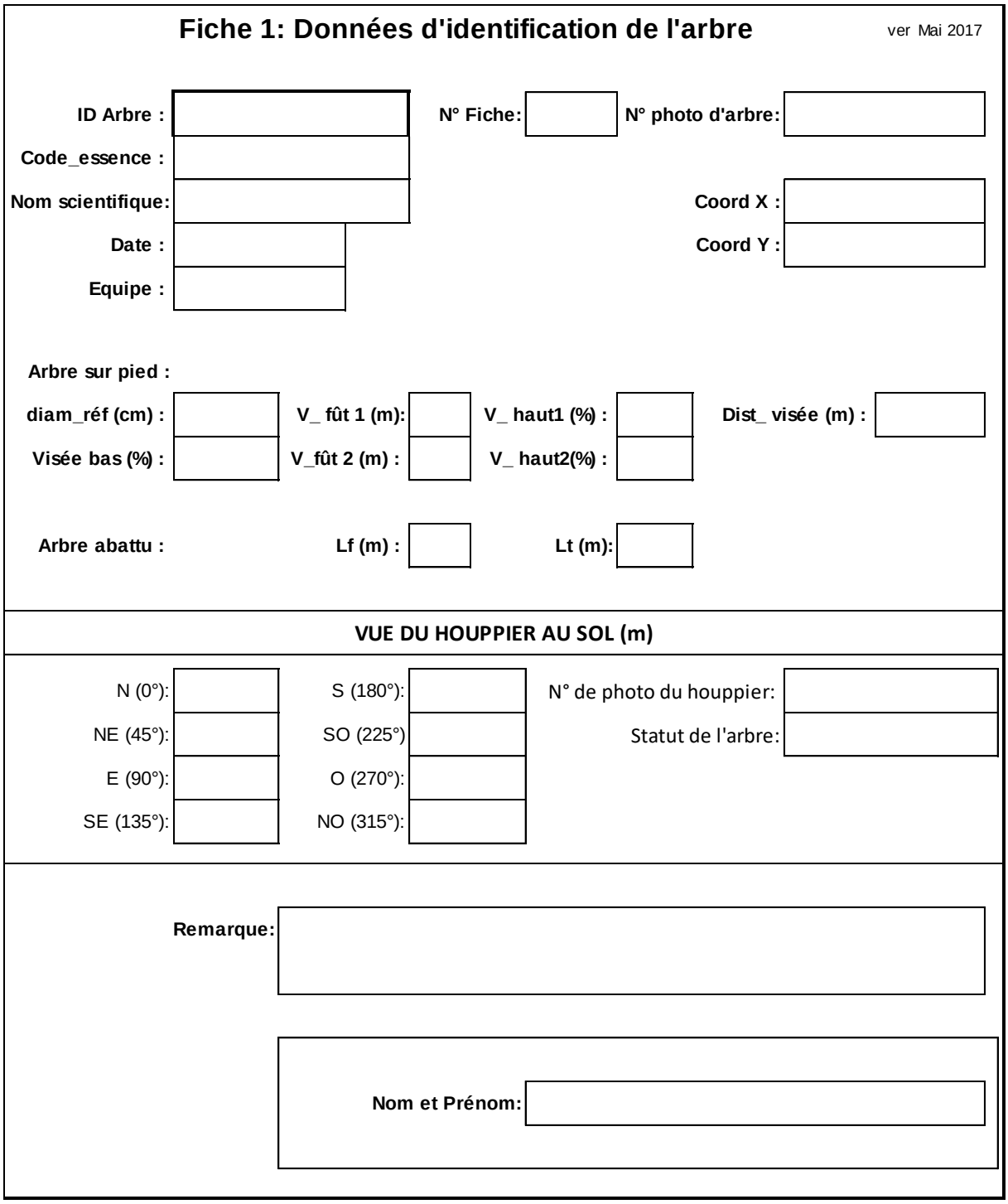
Les arbres-échantillons seront localisés en se servant de la base de données de l'IFN. Un arbre sera choisi au hasard pour chacune des 4 espèces et dans chacune des 5 classes de diamètres choisies (tableau 6). A l'aide des GPS, ces arbres sélectionnés seront identifiés sur le terrain grâce à leurs coordonnées 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 2). Il s'agît :

- 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'agît 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 : | N° Fiche: | N° photo d'arbre:
Code_essence :
Nom scientifique: | Coord X :
Date : | Coord Y :
Equipe :

Arbre sur pied :

diam_réf (cm) : | V_ fût 1 (m): | V_ haut1 (%) : | Dist_ visée (m) :
Visée bas (%) : | V_fût 2 (m) : | V_ haut2(%) :

Arbre abattu : | Lf (m) : | Lt (m):

VUE DU HOUPPIER AU SOL (m)

N (0°): | S (180°): | N° de photo du houppier:
NE (45°): | SO (225°) | Statut de l'arbre:
E (90°): | O (270°):
SE (135°): | NO (315°):

Remarque:

Nom et Prénom:

Figure 2 : 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 (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 comme décrit dans Rondeux (1999).

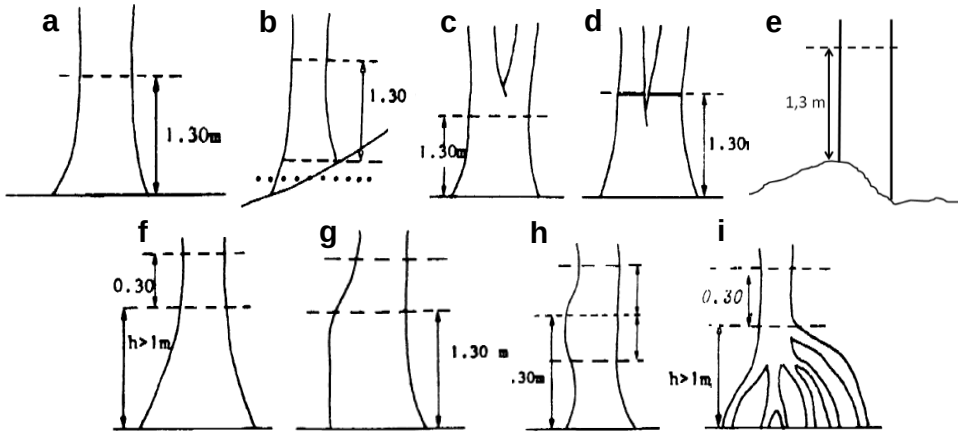


Figure 3 : Convention de mesure du diamètre de référence (d'après Cailliez, 1980).

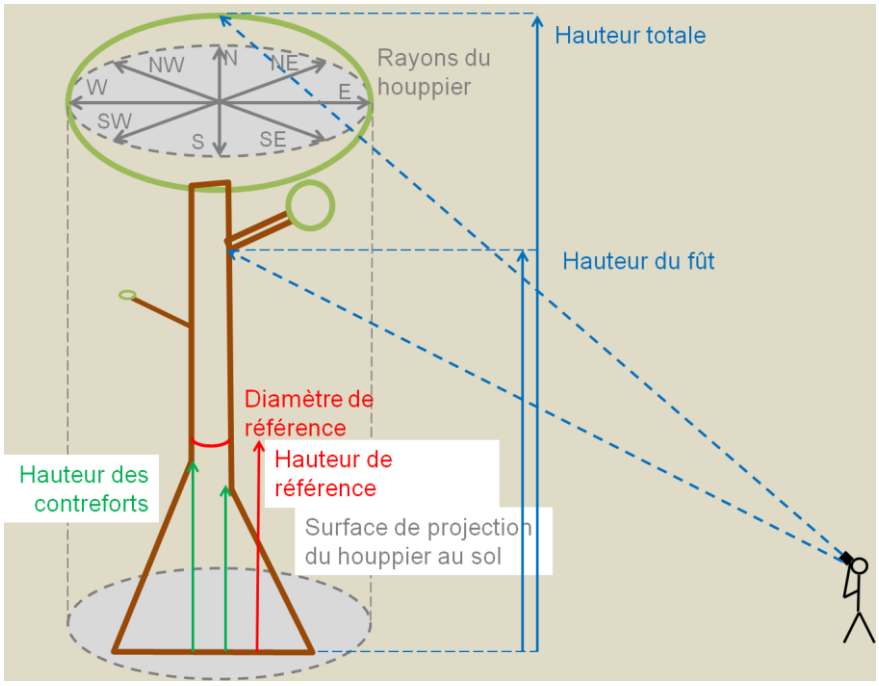


Figure 4 : Schéma représentant les mesures dendrométriques réalisées sur les arbres sur pied.

- 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 3).

- La **hauteur de référence** (en cm) correspond à la hauteur de mesure du diamètre de référence. Elle doit être matérialisée sur le tronc de l'arbre à l'aide d'une griffe forestière ou d'un trait de peinture. La hauteur de référence sera notée sur la fiche terrain si celle-ci est différente de la hauteur standard de 1,3 m. Cette mesure doit absolument être réalisée avant l'abattage de l'arbre, même si cela nécessite l'utilisation d'une à deux échelles.
- La **hauteur totale** (en m) correspond à la distance verticale séparant le niveau du sol du sommet de l'arbre (bourgeon terminal). Dans le cas d'arbres fourchus, une seule hauteur ne sera considérée. La **hauteur du fût** (en m) correspond à la distance séparant le niveau du sol de la déformation due à la première grosse branche. Les mesures de hauteur seront réalisées avec la perche télescopique et le clinomètre SUUNTO.

4. DONNEES COLLECTEES APRES L'ABATTAGE

4.1. Remesure des mesures sur pied

Après l'abattage, **la longueur totale de la tige** (depuis la hauteur de la charnière jusqu'à l'extrémité du houppier) doit être mesurée. L'arbre est ensuite subdivisé en compartiments, la souche, la bille, les grosses branches, les moyennes branches, les petites branches et, les feuilles/fleurs/fruits.

Chaque compartiment sera pesé suivant le scénario suivant. Il correspond à un arbre où il sera possible de billonner la bille, de peser les billons à l'état vert séparément et de prélever des échantillons de bois à plusieurs niveaux dans la bille (Figure 5).

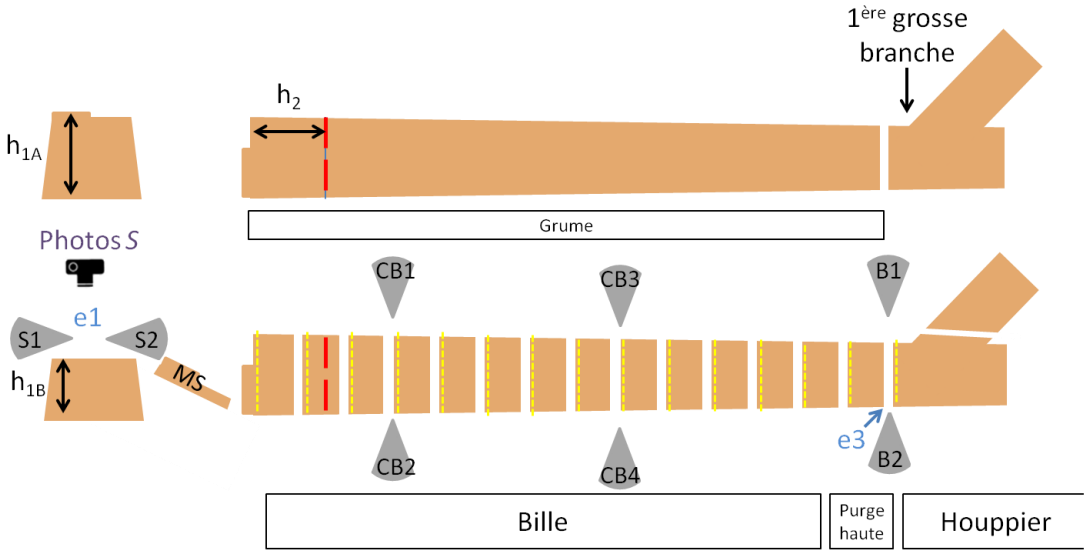


Figure 5 : Calcul de l'infra-densité : échantillons de bois prélevés au niveau de la souche (S1 et S2), à différents niveaux dans la bille (CB1-CB4) ainsi qu'à l'extrémité de celle-ci (B1 et B2) (Fayolle et *al.,* 2014).

Les échantillons de bois sont d'une épaisseur de 5 à 10 cm et en forme de 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.

L'**ordre des découpes**, ou traits de scie, est important lors de la découpe du quartier de tarte. Il faut tout d'abord découper une rondelle de bois épaisse. Il faut ensuite découper les rayons dans l'ordre indiqué sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**a pour obtenir un quartier de tarte passant par la moelle de l'arbre et d'une épaisseur de 5 cm.

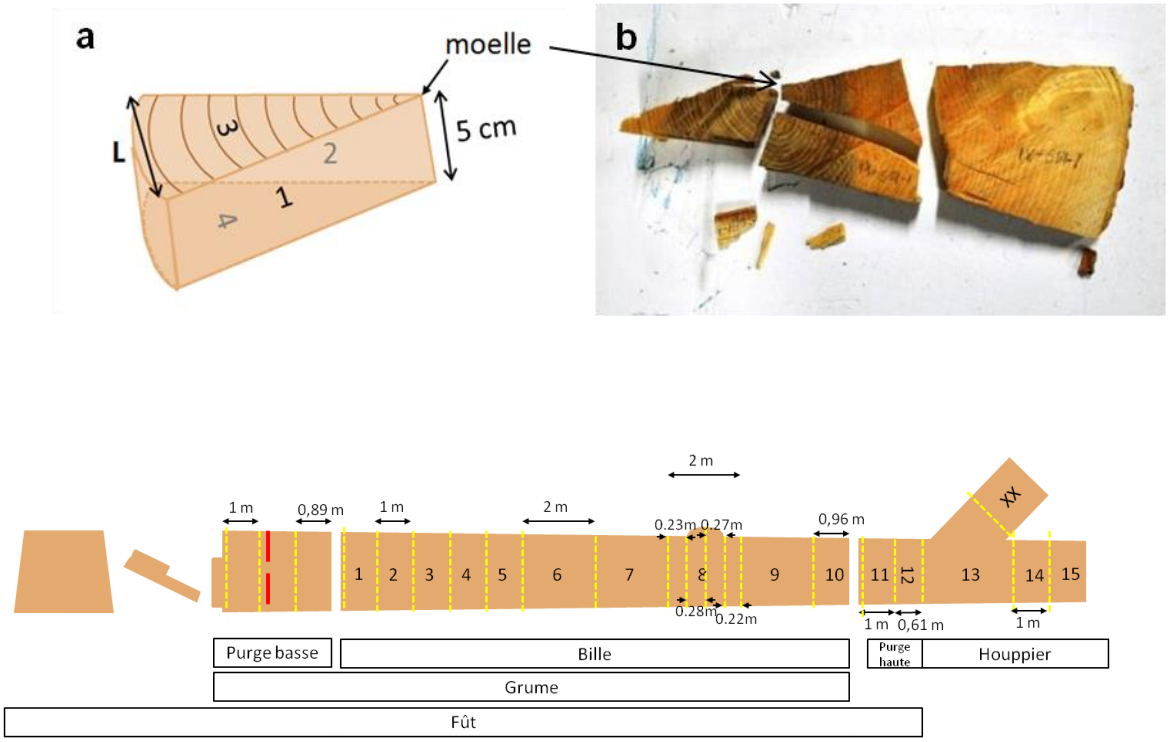


Figure 6 : Cubage de la bille ou de la grume par la méthode des billons successifs (Fayolle et al., 2014).

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. Le diamètre gros bout de chaque billon est alors mesuré à l'aide d'un ruban diamétrique. 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. 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 scenarii (Figure 4) sur lequel le numéro de chacun des billons sera reporté.

Fiche 2: Données à récolter sur la tige principale et les branches

ID Arbre :	
Code_essence :	
Nom scientifique:	
Date :	
Equipe :	

Partie mesurée: ☐ **La bille** ☐ **La grume**

Hauteur de la section d'abattage jusqu'au diamètre de référence (h2) (cm):		
Longueur de la bille/grtume (m):		
Epaisseur de l'écorse du Φ petit bout avec le pied à coulisse (cm)		
Faire un schéma de l'arbre et les n° de billons à la page suivante:	☐ Réalisé	
Bille/grume pesée (non commerciale):	☐ Non	☐ Oui
Présence de pourriture ou creux sur bille/grume:	☐ Non	☐ 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:		
☐ Filet	☐ Sac	☐ 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)

Figure 7 : Extrait de la fiche de terrain concernant les données à récolter sur la bille ou la grume.

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 billonnées 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 tartes 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.

4.1.2. 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.

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). 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.

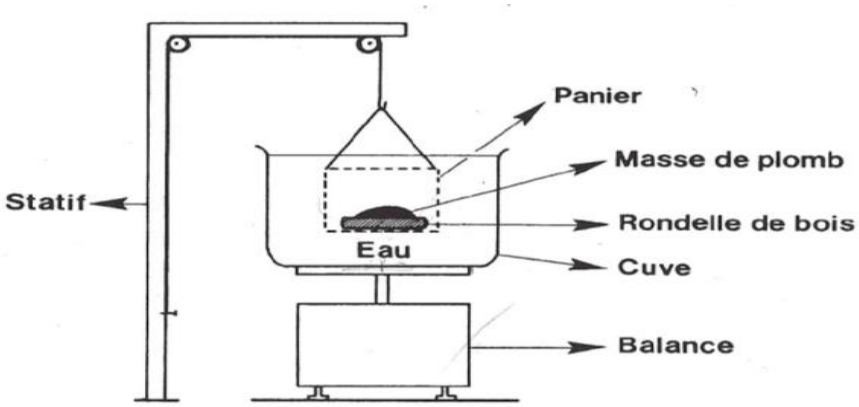


Figure 8 :Dispositif de mesure du volume d'un échantillon de bois par la méthode de pesée hydrostatique (extrait de Rondeux, 1999)

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.