

MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ASSAINISSEMENT

DIRECTION NATIONALE DES EAUX ET FORETS

Normes techniques d'inventaire forestier

Table des matières

1	Sigles et définitions.....	6
1.1	Sigles.....	6
1.2	Définitions des terminologies	7
2	Introduction.....	8
2.1	Contexte	8
3	Approche Méthodologique	11
3.1.1	Objectifs.....	11
3.1.2	Moyens	11
4	Formations végétales.....	13
4.1	Définitions.....	13
4.1.1	Type de végétation et formation végétale.....	13
4.1.2	Strates ligneuses.....	13
4.2	Typologie des formations végétales du Mali.....	14
4.2.1	Formations végétales.....	14
4.2.2	Formations particulières	15
4.2.3	Formations végétales ligneuses des régions du nord Mali.....	16
5	Tarif de cubage.....	18
5.1	Paramètres	18
5.2	Construction du tarif.....	18
5.2.1	Mesure des hauteurs de tronc.....	18
5.2.2	Mesure des grosseurs de tronc	18
5.2.3	Volume des troncs.....	19
5.2.4	Volume des branches.....	19
5.2.5	Volume des arbrisseaux et sous-arbrisseaux	19
5.3	Etablissement du tarif de cubage	19
5.3.1	Précision des tarifs de cubage	20
6	Dispositif du sondage terrain	21
6.1	Méthodologie d'échantillonnage.....	21
6.1.1	Types d'échantillonnage.....	21
6.1.2	Echantillonnage utilisé.....	22
6.1.3	Maillage.....	22
6.1.4	Description des unités de sondage.....	22
6.1.5	Taux d'échantillonnage	24
6.1.6	Paramètres mesurés	25
6.2	Résumé des caractéristiques de l'échantillonnage.....	26
7	Cartographie des formations végétales.....	28
7.1	Données de télédétection	28
7.1.1	MODIS	28
7.1.2	Landsat	29

7.1.3	SPOT-5.....	29
7.2	Acquisition des images satellites.....	29
7.3	Production de cartes thématiques.....	30
7.3.1	Processus.....	30
7.3.2	Classes.....	30
7.3.3	Validation.....	30
8	Annexes.....	31
8.1	Bibliographie.....	31

Liste des figures :

Figure 1. Schéma des unités de sondage comprenant la placette et les sous-placettes..... 23

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Liste des sigles et abréviations 6

Tableau 2 : Liste des terminologies et leurs définitions 7

Tableau 3 : Classification des types d'inventaires forestiers..... 9

Tableau 4 : Liste des principaux satellites appropriés suivant le niveau d'échelle 28

Tableau 5 : Classes de formation végétale et d'occupation des terres 30

1 Sigles et définitions

1.1 Sigles

Tableau 1 : Liste des sigles et abréviations

AGEFORE	Aménagement et Gestion des Forêts et de l'Environnement
DCE	Délégation de la Commission européenne
DEP	Division Etudes et Planification
DNCN	Direction Nationale de la Conservation de la Nature
DNEF	Direction Nationale des Eaux et Forêts
ICIF	Interface de Consultation des Inventaires Forestiers
MWH	Montgomery Watson Harza
PEALCD	Programme Environnemental d'Appui à la Lutte Contre la Désertification
PIRL	Projet d'Inventaire des Ressources Ligneuses
SADIF	Système d'Administration des Données sur les Inventaires Forestiers
SDA	Schéma Directeur d'Approvisionnement en bois énergie
SIFOR	Système d'Information Forestier
SNGIE	Système National de Gestion de l'Information Environnementale
SODIPLAN	

1.2 Définitions

Tableau 2 : Liste des terminologies et leurs définitions

Domaine bioclimatique	Région géographique caractérisée par des critères floristiques et pluviométriques (PIRL)
Composite	Image satellite construite à partir de plusieurs images journalières, généralement composées sur la base décadaire (10 jours) ou mensuelle (31 jours)
Cubage	Calcul du volume de bois sur la base de la circonférence à 1,30 m du sol et du tarif de cubage
Hauteur recoupe	Hauteur d'un arbre jusqu'à la recoupe de 10 cm de circonférence ou si la forme le justifie, jusqu'à la ramification principale. Egalement dénommé hauteur découpe.
Image multispectrale	Image satellite comprenant plusieurs bandes spectrales dans le visible et l'infrarouge
Maillage	Grille régulière d'unités de sondage mesurées sur le terrain
Placette	Unité primaire d'inventaire d'une superficie d'environ 5 ha.
Sous-placette	Unité secondaire d'une superficie d'environ 0,2 ha.
Signature spectrale	Une réponse provenant du comportement des éléments de la surface de la terre à la réflexion du soleil, spécifique à une formation végétale ou une occupation des terres
Tarif de cubage « arbre »	Outil d'estimation indirecte de volume d'arbre à partir d'une ou plusieurs caractéristiques dendrométriques (circonférence, hauteur, ...)
Téledétection	La télédétection est la technique qui, par l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information. La disponibilité des satellites depuis 30 ans a stimulé le développement de nouvelles techniques pour prendre des mesures et pour analyser les données

2 Introduction

2.1 Contexte

L'inventaire forestier permet une connaissance précise des ressources ligneuses et leur évolution en vue de leur gestion rationnelle.

Lors de l'inventaire forestier des 5^{ème}, 6^{ème} et 7^{ème} régions du Mali, une méthodologie a été mise en place dans le cadre de la mise en œuvre du Programme Environnemental d'Appui à la Lutte Contre la Désertification (RAP-1 et RAP-2). Cette démarche a été appliquée avec des moyens technologiques avancés, selon un itinéraire technique (maillage, placettes, sous-placettes, ...) qui convenait dans une zone d'étude relativement homogène et à une échelle régionale.

La perspective de l'extension des inventaires forestiers dans d'autres régions nécessite des normes techniques définissant des standards minimaux qui garantissent la comparabilité des données d'inventaires dans des zones à écologie tout à fait différentes (plus forte densité du couvert forestier, plus grande diversité d'essences forestières, ...).

2.2 Inventaire forestier au Mali

Plusieurs inventaires ont été réalisés dans le cadre de la mise en œuvre de Projets dont le Projet Inventaire des Ressources Terrestres (PIRT), le Projet Inventaire des Ressources Ligneuses (PIRL), le Projet Inventaire et Plans d'Aménagement des Forêts de la Région de Sikasso (PFRS/Volet1)..., etc.

Il existe plusieurs types d'inventaires forestiers, suivant l'étendue de la zone concernée (nationale, régionale ou locale) et les objectifs spécifiques à atteindre (PIRL). Ceux – ci peuvent être classés (Tableau 3) suivant quatre critères:

- le **niveau** et l'**horizon** de la planification. Par exemple : inventaire national, ou de pré-investissement ; horizon : à long terme ou à court terme ;
- l'**étape** à laquelle se situe l'inventaire dans la procédure de décision d'une étude plus complète de faisabilité ;
- les **dimensions** des zones de référence, c'est – à – dire des ensembles (ou régions, ou zones, ou périmètres) forestiers pour lesquels les résultats sont recherchés avec une certaine précision, ainsi que leurs sous – divisions éventuelles (« plus petites unités d'intérêt ») ;
- les **formes de mise en valeur** recherchées. Par exemple, production de bois d'œuvre, de bois de pâte, ou encore de bois de feu ;

Tableau 3 : Classification des types d'inventaires forestiers
(Classe d'importance : (1) très important, (2) estimation générale et (3) peu important)
(PIRL)

	Niveau de planification	de Zone de référence	Horizon	Etape de la planification	la Plus petite unité d'intérêt	Importance relative des informations à estimer							
						Utilisation des sols	Surface forestière	Description du terrain	Accessibilité et coûts	Volumes – qualités	Accroissement – classe de fertilité	Décroissement – Prélèvement	Autres informations sur la possibilité d'utilisations des terres
INVENTAIRE « STRATEGIQUE »	Inventaire forestier mondial et régionaux	Grande région du monde			Pays	1	1	3	2	1	3	1	2
	Inventaire forestier régional (ou subnational) • Reconnaissance au niveau national • Inventaire national proprement dit	Pays (ou grande division administrative province état d'une fédération)	10 – 50 ans	Identification des zones prioritaires de développement forestier	Divisions administratives (préfecture, district...)	2	2	3	2/3	2/3	3	3	2
					Régions naturelles	1	1	2	2	1	1	1	2
	Inventaire lié à un investissement • Reconnaissance (ou préinventaire) (étude préliminaire ou complète de faisabilité)	Zone d'approvisionnement d'un complexe industriel	10 – 20 ans	Identification d'un projet d'investissement Evaluation d'un projet d'investissement	Blocs d'exploitation	3	1	2	1	1	1	1	2
	Inventaire de l'utilisation des terres	Pays ou division administrative	10 – 50 ans		Petites divisions administratives par ex. zone d'influence d'une commune, d'un village	1	1	1	2	2	2	2	1
INVENTAIRE « TACTIQUES »	Inventaire d'aménagement (pour un plan d'aménagement)	Forêt (classée) concession unité d'aménagement	0 – 10 ans		Parcelle d'aménagement	1	1	1	2	2	2	2	1
	Inventaire d'exploitation (pour un plan d'exploitation)	Concession bloc d'exploitation	0 – 10 ans		Lot (division d'exploitation)/coupe annuelle	3	1	1	1	1	3	3	3
	Estimation des coupes	(Assiette de la) coupe	0 – 2 ans		Assiette de la coupe/arbre	3	1	2	1	1	3	3	3

Il est important d'admettre qu'un inventaire forestier ne peut satisfaire tous les objectifs à la fois : les objectifs non envisagés au départ sont mal (et souvent pas du tout) remplis par un

inventaire forestier défini en fonction d'autres objectifs. Il ne faut pas s'attendre, par exemple, à pouvoir élaborer un plan détaillé d'aménagement local d'après les données recueillies dans le cadre d'un inventaire forestier national.

Il est donc capital de définir clairement les divers objectifs de l'inventaire proposé ainsi que leur importance relative afin d'adapter au mieux le plan et le mode d'exécution. Ces objectifs doivent être définis conjointement par les utilisateurs de l'inventaire et les spécialistes en inventaires.

Ces objectifs, quel que soit le type d'inventaire considéré, sont ensuite toujours traduits suivant le même schéma :

- on cherche à connaître un certain nombre d'informations: par exemple, les superficies de différents types de formations forestières, le nombre moyen à l'hectare de tiges d'un certain groupe d'espèces et au-dessus d'un certain diamètre, ou encore le volume total sur pied correspondant à une découpe donnée et pour toutes les espèces confondues, etc.;
- avec une marge d'erreur acceptable, à un seuil de probabilité donné, On cherche par exemple à estimer un volume à l'hectare V à plus ou moins 5 m^3 près, à un seuil de probabilité 0,95. En d'autres termes, si le résultat fourni par l'inventaire est V , on veut être "sûr" (avec 95 chances sur 100 de ne pas se tromper) que le volume réel V est compris dans la fourchette $[V - 5 \text{ m}^3 ; V + 5 \text{ m}^3]$
- et au niveau de zones de référence données. Par exemple : l'ensemble des massifs forestiers d'une localité, un massif forestier donné, un faciès particulier à l'intérieur d'une forêt, etc....

3 Approche Méthodologique

L'approche méthodologique a été développée dans le cadre d'un inventaire forestier des ressources ligneuses sur les trois régions du Nord Mali. Cette méthodologie correspond à un inventaire forestier de type « stratégique » à l'échelle régionale en combinant sondage terrain et télédétection.

3.1.1 Objectifs

L'**objectif général** de l'inventaire forestier est de pourvoir aux collectivités territoriales et départements techniques une évaluation du potentiel ligneux et un outil d'aide à la décision pour gérer durablement ces ressources du Mali au niveau régional.

Les **objectifs spécifiques** sont multiples :

- Evaluer quantitativement la ressource ligneuse à l'échelle régionale;
 - Estimer le nombre de bois, le volume de bois et la productivité par type de formation végétale ligneuse;
- Réaliser une carte de formation végétale et d'occupation des terres;
 - Identifier les différents types de formations ligneuses afin de les relier avec les estimations de bois ;
- Définir des proportions de produits utilisés tels que les types de bois ainsi que des prévisions de productivité, définis par entités administratives (communes, cercles et régions).

3.1.2 Moyens

L'évaluation des ressources ligneuses sur de grandes superficies comme les régions du Mali nécessite la mise en place de moyens adaptés. Le sondage terrain n'est pas applicable seul étant donné le nombre important de placettes à inventorier pour obtenir des précisions acceptables. L'intérêt de la télédétection, et plus spécifiquement des images satellites, est multiple. Ces images satellites donnent une vue synoptique de la végétation sur de larges superficies au même moment d'une part, et d'autre part cette végétation est caractérisée et cartographiée en chaque endroit, ce qui permet d'avoir une représentation spatiale des différentes formations végétales à la différence de l'inventaire statistique classique.

L'inventaire forestier par télédétection constitue une réponse adéquate aux objectifs du SIFOR en combinant efficacement le sondage terrain et la télédétection. Les étapes d'échantillonnage statistique et de cartographie sont alors scindées pour leur attribuer des rôles différents et complémentaires.

Le **sondage terrain** est réalisé sur base d'une grille régulière de placettes, ce qui permet un balayage de l'ensemble du territoire de façon régulière et non dirigée. Ce sondage terrain renseigne sur le type de végétation, leur développement, leur composition en types de bois et leurs mesures dendrométriques. Ces informations issues du terrain permettent (1) d'élaborer des tarifs de cubage « arbre » afin d'évaluer le potentiel ligneux et (2) de définir précisément les types de végétation qui serviront de base à la cartographie.

Les images satellites issues de la **télé-détection** apportent des informations utiles à plusieurs stades. Ces images intégrées dans la cartographie de base facilitent la localisation des placettes d'inventaire sur le terrain d'une part, et d'autre part elles constituent les données de base pour l'élaboration des cartes de formations végétales. En prenant comme référence les placettes de sondage terrain, la végétation est cartographiée sur base de ces images avec une couverture de toute la zone d'étude.

4 Formations végétales

4.1 Définitions

4.1.1 Type de végétation et formation végétale

Le type de végétation est l'unité moyenne d'étude de la végétation : c'est un grand ensemble qui imprime au paysage une physionomie particulière parce qu'il résulte de l'accumulation d'espèces variées mais qui appartiennent en grande majorité à une même forme biologique (arbre, arbuste, herbacée, ...).

La flore est la liste des végétaux qui vivent dans un territoire donné, sans qu'il soit tenu compte de leur abondance.

La formation végétale est la résultante d'une flore et d'un type de végétation (PIRL).

4.1.2 Strates ligneuses

Les strates ligneuses sont classées comme suit :

- Arbre : végétal ligneux à tige simple non ramifiée dès la base, ayant une hauteur totale supérieure à 7 m ;
- Arbuste : végétal ligneux à tige simple non ramifiée dès la base, ayant une hauteur totale inférieure à 7 m ;
- Arbrisseau : végétal ligneux à tige ramifiée dès la base ou à tiges multiples dont la hauteur totale varie entre 1,5 et 7 m ;
- Sous – arbrisseau : végétal ligneux ramifié ou non dont la hauteur totale maximale est de 1,5 m.

4.2 Typologie des formations végétales du Mali

4.2.1 Formations végétales

Les définitions des formations végétales ont été reprises de la Norme d'inventaire DNCN (DNCN, 2009). Celles-ci comprennent l'ensemble des formations végétales présentes au Mali.

Forêt galerie : Végétation à couvert fermé, de stature moyenne, constituée de plusieurs strates qui forment un couloir de verdure accompagnant les cours d'eau permanents et temporaires ou les dépressions de terrain en zone de savane. Elle forme une frange étroite, large de 30 à 180 m à couvert transversalement non interrompu et à voûte nettement plus supérieure à celle des peuplements avoisinants. Le volume moyen dans ces types de formation est compris entre 90 et 250 m³/ha. La hauteur dominante est souvent supérieure à 17 m.

- Galerie de type soudanien : se rencontre en zone soudanienne et soudano guinéenne
- Galerie de type sahélien : se rencontre en zone sahélienne

Forêt claire : Végétation ligneuse de stature moyenne, à couvert ouvert et clair, et laissant largement filtrer la lumière. La plupart des espèces a le feuillage caduc. La strate graminéenne est en général peu dense ou en mélange avec une autre végétation herbacée. Le sous-bois est ordinairement discontinu et très largement ouvert ou nul. Le volume est compris entre 60 et 100 m³/ha. Dans les formations non dégradées, la hauteur dominante est supérieure à 12 m.

Savane boisée : Arbre et arbuste y forment un couvert généralement clair qui laisse largement pénétrer la lumière. La hauteur de la strate arborescente est de 8 à 13 m, exceptionnellement plus. Les arbres y sont plus nombreux qu'en savane arborée. Le volume moyen est supérieur à 20m³/ha et la hauteur dominante supérieure à 7m.

Savane arborée (savane verger ou savane parc) : Les arbres et arbustes sont disséminés parmi le tapis graminéen. Ils sont moyennement nombreux et atteignent 6 à 8 m de haut, exceptionnellement plus. Le volume moyen est inférieur à 20m³/ha et la hauteur dominante supérieure à 7m.

Savane arbustive : Les végétaux ligneux sont représentés presque uniquement par les arbustes et arbrisseaux, disséminés dans le tapis graminéen continu. Le volume est inférieur à 20m³ et la hauteur dominante inférieure à 7m.

Savane herbeuse : Végétation constituée par la strate de graminéens et herbacées ; les

arbres et arbustes y sont ordinairement absents.

Fourré : Végétation arbustive, à couvert fermé, ordinairement peu pénétrable, souvent morcelée, constituée d'espèces à feuillage sempervirent ou décadu. Le tapis graminéen et herbacé est généralement absent.

Prairie hygrophile : Formation herbeuse humide des plaines, dépression bordant les cours d'eau.

Steppe arborée ou arbustive : Formation herbeuse, à couvert très irrégulier, où les petits arbres, arbustes et arbrisseaux sont présents. Le volume moyen est inférieur à 10m³/ha et la hauteur dominante est inférieure ou égale à 7 m.

Steppe buissonnante : Formation dans laquelle les sous – arbrisseaux dominants de la strate ligneuse sont composés d'espèces à épines, et porte le nom d'« épineuse ».

Steppe herbacée/graminéenne : Végétation herbacée et/ou graminéenne où les végétaux ligneux sont pratiquement absents.

Steppe épineuse : Végétation herbacée et/ou graminéenne où les végétaux ligneux prédominants de la strate arbustive sont constitués d'épineux.

Steppe succulente : Les plantes succulentes, quelquefois à moyenne taille, y sont fréquentes.

Bowal : Formation de climax caractérisée par une strate herbeuse de *Loudetia togoensis*. Il peut être arboré, arbustif ou nu.

4.2.2 Formations particulières

Certaines formations végétales sont plus particulières car elles concernent un nombre restreint d'espèces ligneuses ou certains usages spécifiques de ces ligneux.

4.2.2.1 *Palmeraies*

Les palmiers revêtent une grande importance économique partout où on les trouve (fruits, fibres, bois, etc.). Généralement, ils se présentent en petits bouquets plus ou moins épars dans la végétation, mais il existe quelques peuplements spontanés ou subspontanés de

grande extension (essentiellement des rôneraies) (PIRL).

4.2.2.2 Formations agro-forestières

Les formations végétales dues à l'action humaine sont les savanes verger ou savanes parc. Ce type de végétation apparaît dans la limite de l'aire de *Vitellaria paradoxa*, *Parkia biglobosa* et *Faidherbia albida*, dans des zones d'agriculture permanente ou à jachère courte. Ces trois espèces ont en commun d'être considérées comme des arbres utiles et donc d'être protégées lors des défrichements. Lors des mises en cultures et jachères successives, ils sont préservés du défrichement, ce qui explique qu'à la longue ils soient les seuls arbres présents. La formation se présente sous l'aspect d'un peuplement modérément dense, parsemé d'arbres de taille moyenne (quelque fois très gros) appartenant aux espèces citées plus haut dans leur grande majorité. Ce peuplement domine une culture (mil, sorgho, arachide) ou bien un recrû arbustif composé essentiellement d'héliophiles pionnières (PIRL).

4.2.3 Formations végétales ligneuses des régions du nord Mali

L'inventaire des ressources ligneuses des 3 régions du nord du Mali se concentre principalement sur les classes de formations végétales comprenant des ligneux. Cela concerne donc toutes les catégories comprenant une strate ligneuse comme défini au point 4.1.2.

Suivant le niveau d'échelle de l'inventaire, la distinction entre les formations végétales peut s'avérer complexe, surtout si elle ne se base pas sur des critères strictement quantitatifs. A l'échelle régionale, des regroupements de classes doivent être réalisés afin de réduire le nombre de formations. Par exemple, la distinction entre steppe épineuse et steppe succulente est très difficile à cette échelle.

Dans la démarche méthodologique adoptée, les formations végétales servent de lien entre les informations de terrain et les données de télédétection. Il s'agit donc de définir avec rigueur des classes de formation végétale ligneuse qui répondent à deux critères. Premièrement, ces classes doivent correspondre aux formations végétales significativement présentes pour obtenir suffisamment d'informations de terrain. En second lieu, ces formations végétales doivent pouvoir être distinguées sur base des images satellites. Une interprétation visuelle des images satellites permet de se rendre compte de la discrimination possible ou non de certaines classes.

Sur base d'un regroupement de plusieurs formations végétales, la classification des formations végétales de l'inventaire des régions du nord du Mali reprend les catégories suivantes :

1. **Galerie forestière** de type sahélien (ou Franche ripicole) : formation constituée de bandes étroites de largeur variable comprenant des arbres et/ou arbustes. Cette formation suit les cours d'eau.
2. **Steppe arbustive** : communément, c'est le type de végétation le plus largement répandu sur les sols sablonneux. Il se caractérise par l'existence d'une strate arbustive très ouverte, souvent épineuse, dominant un tapis herbacé discontinu à base de graminées annuelles dont la taille est inférieure à 80 cm (*Cenchrus biflorus*, *Aristida spp.*, *Schoenefeldia gracilis*, *Eragrostis tremula*, etc.). Elle est constituée par une strate lâche de ligneux de petite taille, inférieure à 7 m. Elle peut se présenter sur des sommets rocheux. La végétation hygrophile est également incluse dans cette formation lorsque les ligneux sont de petite taille.
3. **Steppe arborée** : formation constituée par une strate lâche de ligneux de petites tailles, avec quelques arbres de plus de 7 m de hauteur ; formation herbeuse ouverte, discontinue, de taille inférieure à 80 cm. On englobe dans cette formation la végétation hygrophile lorsqu'il y a présence d'arbres.
4. **Savane arbustive/arborée** : c'est une formation issue de la dégradation des forêts claires et, bien souvent, maintenue par les feux de brousse. Elle est la formation végétale la plus fréquente de l'ensemble de la zone soudanienne. Elle est caractérisée par une strate continue de graminées héliophiles de la famille des Andropogonées (*Andropogon chinensis*, *A. gayanus*, etc.), dominée par une strate ligneuse ouverte. Son couvert, dépassant rarement les 15%, est constitué des espèces les plus tolérantes de la forêt claire de hauteur inférieur et supérieure à 7 m comme *Burkea africana*, *Combretum spp.*, *Terminalia spp.*, *Pterocarpus erinaceus*, *Bombax costatum*, *Daniellia oliveri*, etc.
5. **Zone agricole ligneuse** : formation fortement anthropisée par une mise en culture longue ou par une succession de cultures et de jachères ; densité faible de végétation ligneuse.

5 Tarif de cubage

Un tarif de cubage est un outil d'estimation indirecte de volumes d'arbres ou arbustes. La méthodologie adoptée se base sur l'élaboration d'un tarif de cubage « arbre » individuel. Celui-ci est distinct d'un tarif de cubage « peuplement » vu la morphologie complexe des associations végétales et de leur distribution sur la zone d'étude.

5.1 Paramètres

Les paramètres du tarif de cubage « arbre » sont caractérisés par :

- Tarif à une entrée = circonférence à 1,30 m, avec possibilité de réaliser des tarifs par essence pour certaines essences principales ;
- Volume des troncs = volume brut sur écorce jusqu'à la découpe 10 cm ;
- Calcul du volume des troncs suivant la formule de **SMALIAN** ;
- Calcul du volume des branches sur base d'une proportion du volume tronc ;
- Zone de validité = domaines bioclimatiques ;
- Modèle du tarif :
 - o Equation du type « $V = a_0 C^2 + a_1 C + a_2$ » ;
 - o Courbe de régression ne passant pas par l'origine (0, 0)

5.2 Construction du tarif

La construction d'un tarif de cubage dans un domaine bioclimatique demande la mensuration de plusieurs centaines de sujets. Le nombre de sujets mesurés est réparti dans les différentes catégories de circonférences et même surreprésenté dans les catégories extrêmes. En ce qui concerne le nombre d'individus à mesurer, il est couramment admis que quelques centaines d'individus permettent d'obtenir une bonne base pour la construction d'un tarif de cubage pour une région donnée. Lorsqu'il s'agit de surfaces réduites et de peuplements homogènes, le nombre d'individus pourrait même être réduit à une trentaine.

5.2.1 Mesure des hauteurs de tronc

La dimension de la recoupe du tronc est fixée à la limite de la forme de tronc jusqu'à la recoupe de 10 cm de circonférence ou, si la forme le justifie, avant la ramification. Les mesures de hauteur se font avec une précision de 10 cm, arrondies à la dizaine.

5.2.2 Mesure des grosseurs de tronc

La mesure de grosseur est la circonférence à 1,30 m du sol sur les arbres de plus de 1,30 m de hauteur recoupe. Le principe des arrondis des mesures de circonférence est appliqué comme précédemment.

5.2.3 Volume des troncs

Les valeurs des 2 paramètres, hauteur et grosseur, permettent d'appliquer la formule de **SMALIAN** pour le calcul du volume de l'arbre individuel (Rondeux, 1999):

$$V = H/8\pi (C_o^2 + C_h^2)$$

Où :

H : hauteur du tronc jusqu'à la recoupe de 10 cm ou jusqu'à la ramification (en m).

C_o : circonférence au niveau du sol (en m).

C_h : circonférence à la hauteur de la recoupe (en m).

V : volume du tronc de l'arbre (en m³).

Ce volume est calculé pour chaque arbre en considérant sa circonférence à 1,3 m qui est l'entrée du tarif. L'équation mathématique (« $V = a_0 C^2 + a_1 C + a_2$ ») donne le volume de l'arbre en fonction d'une seule variable, la circonférence à 1,30 m.

5.2.4 Volume des branches

Le volume de branches est estimé sur base d'un pourcentage du volume des troncs. Ces calculs ont fait l'objet d'un mesurage complet et d'une étude dendrométrique lors des inventaires précédents. Toutefois, la présence importante d'arbres mutilés rend ce pourcentage assez élevé (autour de 75%). Ces chiffres ont été estimés par domaines bioclimatiques et reste applicable dans ces mêmes régions. La variabilité du volume des branches par arbre est évidemment nettement plus élevée que celle des troncs. Les utilisateurs des différents tarifs de cubage, selon leurs besoins spécifiques, ont le choix de prendre en compte soit uniquement le volume « tronc », soit l'ensemble « tronc + branche ».

5.2.5 Volume des arbrisseaux et sous-arbrisseaux

Les tiges des arbrisseaux et sous-arbrisseaux dont la circonférence à 1,3 m de hauteur est inférieure à 10 cm sont soit comptées ou soit estimées en termes d'occupation. Ces deux catégories, arbrisseaux et sous-arbrisseaux, sont distinctes. Pour les arbrisseaux, un volume unitaire moyen est calculé sur la base des mesures à partir de la circonférence moyenne à mi-hauteur et la longueur jusqu'à une recoupe de 5 cm. Les sous-arbrisseaux seront simplement comptés et leur taux d'occupation estimé.

5.3 Etablissement du tarif de cubage

La succession des opérations de calcul se présente comme suit :

1. Calcul du volume du tronc de chaque ligneux,
2. Régression linéaire sur base de la circonférence et du volume calculé
 - 2.1. Basée sur la théorie des moindres carrés

2.2. Equation du type $V = a_0 C^2 + a_1 C + a_2$

1. Variables : V , volume (m³) ; C , circonférence à 1,3m du sol (m).
2. Constantes : a_0 , a_1 et a_2
3. L'équation est appliquée pour chaque classe de circonférence considérée par sa valeur médiane pour obtenir le tarif (par domaine bioclimatique).

5.3.1 Précision des tarifs de cubage

Les différents calculs statistiques nous permettent d'estimer l'intervalle de confiance des valeurs (volumes) afin d'apprécier la précision des tarifs de cubage. Ce calcul a été effectué séparément pour chaque tarif. Le coefficient de régression (R^2) est également calculé. Le résultat est acceptable si ce coefficient de régression est supérieur à 0,75.

6 Dispositif du sondage terrain

6.1 Méthodologie d'échantillonnage

6.1.1 Types d'échantillonnage

L'échantillonnage de l'inventaire terrain peut prendre différentes formes : aléatoire ou systématique, avec ou sans stratification, monophasé ou biphasé. Ces différents types sont décrits par Lecomte (1992).

L'**échantillonnage aléatoire** et simple se caractérise par une probabilité égale de sélection de toutes les unités d'échantillonnage, choisies au hasard et indépendamment les unes des autres. Statistiquement, il présente des avantages importants (estimation non biaisée de la moyenne de la population, calcul aisé de l'erreur d'échantillonnage) mais en pratique, il est peu utilisé (du moins dans des inventaires à une seule phase), principalement pour des raisons de mise en œuvre (les pertes de temps consécutives à la dispersion des échantillons).

L'**échantillonnage systématique**, par contre, est largement utilisé dans les inventaires nationaux ; les unités de récolte des données sont, dans ce cas, choisies selon un schéma rigide du type grilles (carrées ou rectangulaires). Si les avantages pratiques sont bien connus (répartition régulière des points de sondage et facilités qui en découlent du point de vue des repérages et des déplacements), il faut être attentif au calcul de l'erreur d'échantillonnage et il convient d'éviter les biais qui pourraient affecter la moyenne, notamment dans les cas où il existe une périodicité marquée dans la population à inventorier ou une auto-corrélation entre points de sondage très proches.

Sur ces deux types fondamentaux d'échantillonnage peut venir se greffer une **stratification** dont l'objectif est de décomposer un ensemble complexe hétérogène (la forêt) en unités plus petites (strates) homogènes par rapport à un critère déterminé (le type de peuplement, par exemple) afin de limiter le plus possible la variabilité des caractéristiques à estimer. La stratification peut se faire a priori : à partir de photos aériennes, de renseignements antérieurs à l'inventaire (statistiques) ou a posteriori, à partir des résultats de l'inventaire lui-même. La distinction de différentes strates permet d'adapter à chacune d'elles le taux de sondage adéquat (échantillonnage à fraction sondée variable) et de déterminer la méthode de récolte des échantillons la plus appropriée.

6.1.2 Echantillonnage utilisé

L'échantillonnage systématique a été adopté sur la base d'un maillage régulier, avec ou sans stratification. Ce choix est justifié pour les raisons suivantes :

- Technique employée lors de l'inventaire du PIRL ;
- Facilité de mise en œuvre sur le terrain ;
- Indépendance partielle ou totale du sondage terrain par rapport aux données de télédétection ;
- Possibilité de densifier le réseau localement tout en conservant les possibilités d'études statistiques des données ;

La stratification de l'échantillonnage est employée afin de préparer le travail de terrain et de réduire le temps de sondage terrain. Cette étape préalable est réalisée en croisant différentes informations cartographiques comme les cartes existantes et les images satellites. Ainsi, les placettes sans végétation ligneuse ne doivent pas être sondées. Il s'agit : des villages, routes, plans d'eau, zones rocheuses et terres agricoles sans ligneux. Les points de sondage non accessibles sont considérés comme manquants. Ces placettes ne peuvent pas être déplacées arbitrairement, sinon les informations globales sur la région peuvent être biaisée et statistiquement non correctes.

6.1.3 Maillage

Le maillage est la grille régulière des points de sondage à relever pour l'échantillonnage systématique. Elle est constituée d'unités de sondage qui sont implantées selon deux grilles différentes suivant les zones agro-écologiques. Les grilles sont à mailles carrées de 28 km pour le groupe le moins riche en végétation ligneuse et de 14 km pour le reste de la zone. Le choix du maillage a été établi après analyse documentaire et visite sur le terrain. Sur les zones agro-écologiques encore plus riches en végétation ligneuse, ce maillage pourra être resserré à une interdistance de 7 km.

6.1.4 Description des unités de sondage

Dans cette approche, un sondage à deux degrés est réalisé. Les unités de sondage sont constituées d'une unité primaire, la placette, et les unités secondaires, les sous-placettes. La première décrit le contexte du point de sondage de manière général, tandis que les secondes sont caractérisées de manière exhaustive avec la description de la végétation et les mesures dendrométriques.

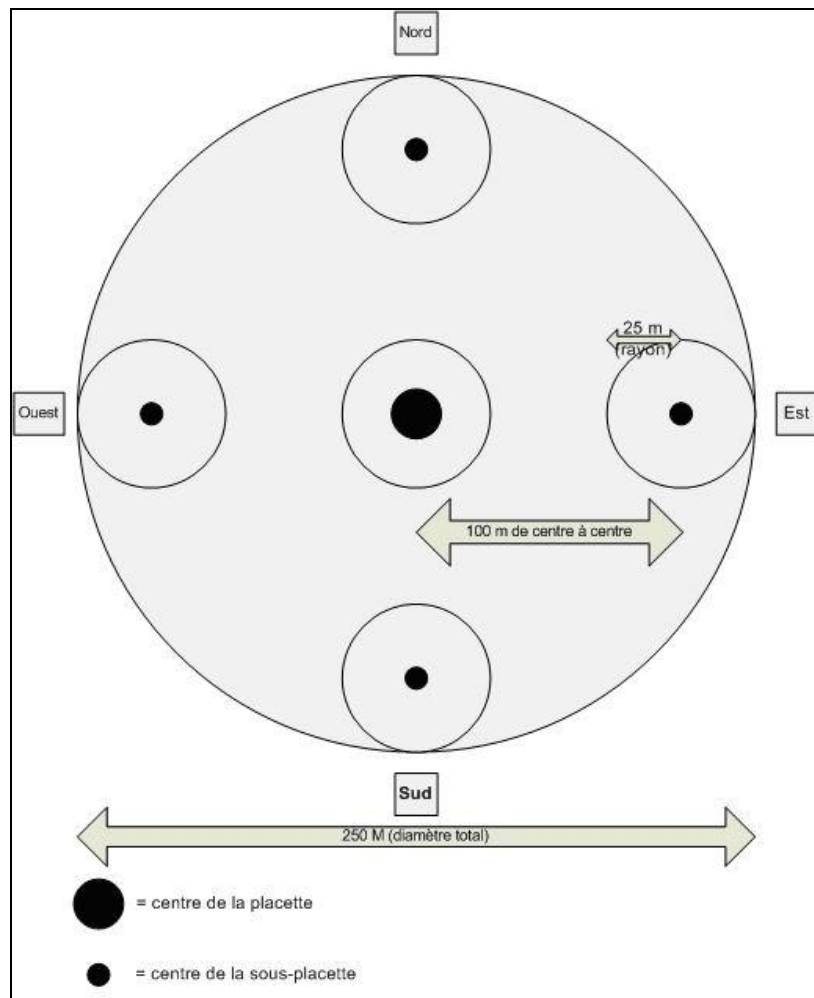


Figure 1. Schéma des unités de sondage comprenant la placette et les sous-placettes

6.1.4.1 Placette

L'unité primaire du point de sondage est la placette de forme circulaire. Elle est caractérisée par son centre localisé au GPS et son diamètre de 250 m. Elle couvre donc une superficie de 4,9087 ha. Cette placette fait l'objet d'une description de la végétation et de certains indicateurs de son état.

6.1.4.2 Sous-placette

Partant du centre d'implantation de la placette, 5 sous-placettes sont identifiées : une au point central, une dont le centre est à 100m au nord, une à 100 m à l'est, une à 100m au sud et une à 100 m à l'ouest.

Chaque sous-placette circulaire a un rayon de 25m et une superficie de 0,1963 ha. Par

implantation d'une unité d'échantillonnage de 5 sous-placettes, la superficie complètement inventoriée est de 0,9817 ha, pour chaque unité de sondage implantée.

Les sous-placettes sont inventoriées en détail pour caractériser précisément la végétation et mesurer les paramètres dendrométriques de la végétation ligneuse comprise dans ces zones circulaires.

6.1.5 Taux d'échantillonnage

Le taux d'échantillonnage est défini par la densité du maillage et la superficie des placettes. Avec un maillage 14 km et une placette de 5 ha dont 1 ha complètement inventorié, le taux d'échantillonnage est de 0.005 %, ce qui correspond à la moyenne des taux de sondage européens (Lecomte, 1992).

Lors de l'inventaire sur les trois régions du nord du Mali, 811 placettes ont été visitées, soit 811 ha inventoriés. En rapportant la surface de ces zones complètement inventoriées à la superficie totale de la zone d'étude, soit 384 000 km², nous obtenons un taux de 0,0021%. A titre d'information, l'inventaire terrain de la deuxième phase du PIRL sur les 480 000 km² atteignait un taux de 0,0016%.

Il est important de mettre le taux d'échantillonnage en relation avec les objectifs de l'inventaire et l'étendue de la zone d'étude. En effet, un taux d'échantillonnage de 0,005 % n'est pas assez important pour réaliser un plan d'aménagement d'un massif forestier. Inversement, un maillage de 0.5 ou 1%, tel que pratiqué dans les inventaires locaux, ne sont pas applicables sur de grandes superficies régionales. Sur les 3 régions inventoriées du nord Mali, un taux de sondage de 0.5% aurait demandé un inventaire de 140.000 placettes au lieu de 851 placettes réellement inventoriées. Ce nombre de placette est pratiquement et budgétairement irréalisables d'où l'intérêt de la combinaison entre le sondage terrain et l'image satellite. Ces deux systèmes complémentaires mais non superposables répondent donc aux objectifs recherchés.

La stratification de l'échantillonnage permet d'adapter ce taux à l'état de la végétation. Il peut être augmenté dans les zones à forte concentration de ligneux et diminué lorsque la végétation est très éparse.

6.2 Paramètres recensés

6.2.1 Description du milieu

6.2.1.1 *Type de formation végétale*

Le type de formation végétale est défini sur la base des formations végétales de la norme DNCN (2009).

6.2.1.2 *Etat de la végétation*

L'état général de la végétation est caractérisé soit de normal, de moyen ou de dégradé. L'état normal est admis si au moins 60 % de la végétation correspond à un état sans signe apparent de perturbation (naturelle et anthropique) et dégradé si moins de 30 % de la végétation correspond à cet état normal. Cette dégradation peut être naturelle, due à l'érosion, l'ensablement, la sécheresse ou anthropique due à l'activité pastorale, agricole, aux incendies ou aux coupes abusives.

6.2.2 Caractéristiques du sol

La caractérisation du sol porte sur la texture et l'humidité, elles-mêmes fonction en bonne partie de la topographie générale du milieu. Sur le plan textural, les sols peuvent être qualifiés de : argileux, limoneux, sableux, sablo-argileux, sablo-limoneux, gravillonnaires, rocheux. L'humidité permet de distinguer les sols en sols exondés, hydromorphes ou inondés. Tout comme précédemment, il est nécessaire de confronter au moins deux observations pour caractériser un sol.

6.2.3 Relevé dendrométrique

6.2.3.1 *Mesures des arbres*

Le relevé porte sur l'essence forestière et la circonférence à hauteur d'homme (1,30 m du sol) répartie par classe. Les classes de circonférence vont de 10 - 19 cm ; 20 - 29 cm ; 30 - 39 cm ... jusqu'à 150 - 159 cm. Les circonférences sont prises au mètre ruban, au centimètre près, arrondi à l'unité entière la plus proche (par exemple : 15,4 devient 15,0 ; 15,8 devient 16,0 ; 15,5 devient 15,0). Si le tronc d'un arbre ou arbuste est fourchu avant la hauteur à 1,3 m, deux sujets sont comptés et les mesure de circonférence se font à 1,30 m du sol (arbres jumeaux). Si l'arbre a une circonférence inférieure à 10 cm, il y a plusieurs possibilités : soit comptage du nombre d'individus, soit appréciation du taux d'occupation.

6.2.3.2 *Types de bois*

a) Bois d'œuvre

Arbre servant à produire du bois de sciage et l'artisanat. Ces sujets sont identifiables au sein du peuplement par leur forme, leur dimension, la qualité du bois et l'essence sur base des

critères suivants :

- Longueur de grume d'au moins 2 m;
- Circonférence à mi-longueur de plus de 25 cm ;
- Qualité : rectitude, dureté (essence).

b) Bois de service

Arbre servant à produire du bois de service pour la construction. Ces sujets sont identifiables au sein du peuplement par leur forme, leur dimension, la qualité du bois et l'essence sur base des critères suivants :

- Longueur de grume d'au moins 1 m;
- Circonférence à mi-longueur entre 10 et 25 cm ;
- Qualité : rectitude, dureté (essence).

c) Bois de feu

Cette catégorie de produit comprend le bois utile pour l'énergie domestique et non valorisable en bois de service ou d'œuvre. Ce type de bois a été groupé avec les essences non combustibles étant donné que ces dernières représentent une faible proportion de volume par rapport aux essences combustibles. En outre, il y a une gradation dans les essences combustibles et la destination du bois peut différer d'une région à l'autre selon l'offre et la demande. En résumé, il est difficile d'établir une limite précise entre ces deux catégories à l'échelle régionale.

d) Bois mort

L'inventaire est complété par le relevé des bois morts en les classant par classe de circonférence à 1,30 mètre du sol avec, si possible, spécification de l'essence. En effet, cette information a son importance dans le suivi (Exemple : espèce à mortalité plus élevée) (norme DNCN 2009).

6.2.4 Photos

Au moins une photo est prise par sous-placette et liée directement aux coordonnées GPS. Elle sera prise avec orientation vers le Nord et avec un objet ou une personne dans le cadre pour servir d'échelle. Pour la sous-placette centrale (lettre A), quatre photos supplémentaires seront prises dans la direction des quatre autres sous-placettes.

6.3 Résumé des caractéristiques de l'échantillonnage

- Echantillonnage systématique avec stratification
- Inventaire à 2 phases :
 - 1) Description synthétique par photo-interprétation

- 2) Sondage terrain
- Unité de sondage circulaire et de surface définie
- Sondage à 2 degrés :
 - 1) Unité primaire : placette ;
 - 2) Unité secondaire : sous-placette ;
- Taux d'échantillonnage : 0.001 - 0.005 %.
- Types de mesure :
 - Placette :
 - Localisation géographique et administrative
 - Description du milieu (sol, pâturage, état de la végétation)
 - Sous-placette :
 - Description végétation (recouvrement)
 - Dendrométrie (circonférence, essence, catégorie de hauteur)
 - Photos

7 Cartographie des formations végétales

La cartographie des formations végétales est essentielle dans la démarche méthodologique. Les cartes produites constituent un support très utile au sondage terrain et donnent une information sur toute la zone d'étude. La télédétection, et plus particulièrement les images satellites, sont les informations de base pour réaliser cette cartographie thématique.

7.1 Données de télédétection

Afin d'établir la cartographie des formations végétales et de l'occupation des terres, une couverture d'images satellites est nécessaire. Suivant le niveau d'échelle, certains satellites d'observation de la terre sont plus appropriés.

Tableau 4 : Liste des principaux satellites appropriés suivant le niveau d'échelle

Niveau	Echelle cartographique	Satellites
National	1/200 000 à 1/1 000 000	SPOT-Vegetation, MODIS
Régional	1/50 000 à 1/200 000	Landsat, ASTER
Local	1/5 000 à 1/50 000	SPOT-5, IKONOS, Quickbird

7.1.1 MODIS

Le capteur MODIS (*MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer*) est à bord de la plateforme satellitaire Terra et a la particularité de pouvoir survoler quotidiennement la planète entière dans 36 bandes spectrales différentes.

Les produits spécifiques sont des images composées de plusieurs pixels sans nuages. En effet, ces images composites sont construites à partir d'images individuelles (30 ou 31 images) acquises chaque jour et recomposée en une seule image mensuelle présentant les meilleurs pixels du mois. Ces composites mensuels comprennent 7 bandes spectrales. Ce facteur temporel s'avère extrêmement important dans ce contexte de végétation peu dense où les concepts cartographiques font appels à des mélanges entre ligneux et herbacées selon un certain niveau de recouvrement (ex. savane/steppe).

7.1.2 Landsat

Les images Landsat TM proviennent du capteur TM (*Thematic Mapper*) à bord de la plateforme satellitaire Landsat et correspondent à la source d'information idéale compte tenu de cette approche d'inventaire. Elles sont appropriées pour l'échelle de la cartographie finale (1 :200 000) et est adaptée à la distinction des types de végétations.

Chacune des scènes représente une superficie d'environ 32 500 km² puisque chacune d'elle possède environ 180 km de côté. Chacun des pixels d'une image représente environ 30 m de côté. Les 7 bandes spectrales de TM présentent l'avantage de pouvoir mesurer le taux de chlorophylle par l'utilisation de différents indices de végétation. Cette mesure de chlorophylle peut être indicatrice du type de végétation et de sa densité.

7.1.3 SPOT-5

Les images SPOT-HRV sont acquises à partir du satellite SPOT et couvrent des zones de 60 x 60 km. Ces données ont une résolution spatiale de 5 ou 10 m, ce qui les rend particulièrement adaptées à des cartographies locales. Elles comprennent plusieurs bandes spectrales dans le visible et l'infrarouge très utiles pour distinguer les différents types de végétation. Les données déjà acquises sont disponibles en archive. De nouvelles acquisitions spécifiques font l'objet d'une commande, ce qui rend leur coût élevé.

7.2 Acquisition des images satellites

La période d'acquisition des images est importante car elle conditionne la distinction entre les formations végétales. La saison pluvieuse est problématique car les nuages empêchent d'observer la végétation. De plus, la distinction entre la végétation ligneuse et la végétation herbacée nécessite une date d'acquisition en période de « saison sèche », entre octobre et mars (PIRL). Mais il y a également d'autres contraintes qui réduisent le nombre d'images directement utilisables. Par exemple, les feux de brousses empêchent de caractériser la végétation des zones touchées du à la fumée. Les conditions d'acquisition ne doivent donc pas être trop restreintes sinon elles aboutissent à un nombre insuffisant d'images ou de nouvelles acquisitions assez coûteuses.

7.3 Production de cartes thématiques

7.3.1 Processus

Afin d'obtenir la carte thématique des formations végétales et d'occupation du sol, les différentes étapes du processus comprennent :

1. Acquisition des images
2. Prétraitements
3. Mosaiquage
4. Classification
5. Validation
6. Composition cartographique et mise en page

7.3.2 Classes

La cartographie des formations végétales sur base d'images satellites doit être réalisée en relation directe avec l'inventaire terrain. La définition des classes de formations végétales ligneuses à cartographier doivent donc correspondre avec celles définies au point 4.2.

Tableau 5 : Classes de formation végétale et d'occupation des terres

Formation végétale ligneuse	Occupation des terres
<ul style="list-style-type: none">• Steppe arbustive	<ul style="list-style-type: none">• Eau
<ul style="list-style-type: none">• Steppe arborée	<ul style="list-style-type: none">• Glacis
<ul style="list-style-type: none">• Savanes	<ul style="list-style-type: none">• Bowal
<ul style="list-style-type: none">• Galerie forestière	<ul style="list-style-type: none">• Affleurement rocheux
<ul style="list-style-type: none">• Zone agricole ligneuse	<ul style="list-style-type: none">• Végétation hygrophile
	<ul style="list-style-type: none">• Zone agricole

7.3.3 Validation

Afin de s'assurer de la qualité des produits cartographiques, la validation de la classification consiste à vérifier la précision thématique de la classification. Cette validation statistique des résultats de classification se base sur des échantillons de terrain ou provient d'autres sources d'information. Une matrice de confusion est alors calculée fournissant des informations sur la précision globale, le coefficient kappa et les erreurs d'omission et de contamination. En général, une précision globale supérieure à 75% est considérée comme valide.

8 Annexes

8.1 Bibliographie

DNCN 1999	DNCN, 1999, Recueil des textes législatifs et réglementaires en matière de gestion des Ressources Forestières, Fauniques et Halieutiques. Direction Nationale de la Conservation de la Nature, Bamako, Mali.
DNCN, 2009	DNCN, 2009 - Normes des inventaires forestiers au Mali, Note technique, 8 p.
Lecomte, 1992	LECOMTE H., RONDEUX J., 1992 - Les inventaires forestiers nationaux en Europe : tentative de synthèse. Ca For Gbx N°5, 29 p.
Manuel, 2009	MWH-Sodiplan, 2009 - Méthodologie d'inventaire forestier régional selon l'approche utilisée dans les régions de Mopti, Tombouctou et Gao – Manuel à l'attention des non-spécialistes. Rapport technique, 40 p.
PIRL	BDPA – SCET AGRI/SYSAME DNEF, 1988 – Projet inventaire des ressources ligneuses au Mali : Les formations végétales
PIRL	BDPA – SCET AGRI/SYSAME DNEF, 1988 – Projet inventaire des ressources ligneuses au Mali : Synthèse technique
PIRL	BDPA – SCET AGRI/SYSAME DNEF, 1988 – Projet inventaire des ressources ligneuses au Mali : Synthèse régionale
Rondeux, 1999	RONDEUX, J., 1999 – La mesure des arbres et des peuplements forestiers, 2 ^{ème} édition, 544 p.
RAP-1	SODIPLAN-AGEFORE, 2006, Etude d'inventaire forestier en 5ème, 6ème et 7ème régions du Mali - Rapport final – Tome 1 : Méthodologie
RAP-2	SODIPLAN-AGEFORE, 2006, Etude d'inventaire forestier en 5ème, 6ème et 7ème régions du Mali - Rapport final – Tome 2 : Résultats