



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
Laboratoire de Thermodynamique,  
Thermique et Combustion



MEMOIRE

Pour l'obtention du

**Diplôme d'Etudes Approfondies de Physique**

**OPTION : ENERGETIQUE**

**CONTRIBUTION A L'EVALUATION DES POTENTIALITES  
ENERGETIQUES DE LA BIOMASSE FORESTIERE**

Présenté par :

**ANDRIAMASIMAMPIANINA Andry Ny Aina**

Devant le JURY composé de :

Président : Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo

Professeur Titulaire

Examineurs :

- Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien

Professeur

- Monsieur RASAMIMANANA François de Salle

Maître de Conférences

15 Novembre 2008







UNIVERSITE D'ANTANANARIVO  
FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE  
Laboratoire de Thermodynamique,  
Thermique et Combustion



MEMOIRE  
pour l'obtention du  
**Diplôme d'Etudes Approfondies de Physique**  
OPTION : ENERGETIQUE

**CONTRIBUTION A L'EVALUATION DES POTENTIALITES  
ENERGETIQUES DE LA BIOMASSE FORESTIERE**

Présenté par :



ANDRIAMASIMAMPIANINA Andry Ny Aina  
Devant le JURY composé de :

Président : Madame RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo

Professeur Titulaire

Examineurs :

- Monsieur RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien
- Monsieur RASAMIMANANA François de Salle

Professeur

Maître de Conférences

15 Novembre 2008



# SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

NOMENCLATURE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION ..... 1

**I. LES BIOMASSES ET LEURS UTILISATIONS .....2**

**I.1 Définition de la biomasse ..... 2**

**I.2 Production de la biomasse ..... 2**

**I.3 Les constituants de la biomasse .....3**

**I.4 Les gisements de la biomasse ..... 3**

I.4.1 Les bois .....4

I.4.2 Les cultures.....4

I.4.3 Les déchets.....4

**I.5 La valorisation de la biomasse ..... 4**

I.5.1 Les bioénergies.....4

I.5.1.1 Les biocarburants ..... 4

I.5.1.1 Les biocombustibles ..... 5

I.5.1.1 Le biogaz ..... 5

I.5.2 Les bioproduits ..... 6

**I.6 Les conversions de la biomasse ..... 6**

I.6.1 La conversion thermochimique ..... 6

I.6.1.1 La combustion ..... 6

I.6.1.1.1 Définition d'un combustible ..... 6

I.6.1.1.2 Production de la chaleur ..... 7

I.6.1.1.3 Types de combustibles ..... 7

I.6.1.1.4 Caractéristiques des combustibles .....7

I.6.1.1.4.1 La composition.....7

I.6.1.1.4.2 Le pouvoir calorifique PC ..... 8

I.6.1.1.4.2.1 Le pouvoir calorifique supérieur P..... 8

I.6.1.1.4.2.2 Le pouvoir calorifique inférieur I..... 8

I.6.1.1.4.3 Pouvoir comburivore ..... 9

I.6.1.1.4.4 Pouvoir fumigène ..... 10

I.6.1.2 La pyrolyse ..... 11

I.6.1.3 La gazéification..... 11

I.6.1.4 La liquéfaction .....11

I.6.2 La conversion biologique ..... 11

I.6.2.1 La biométhanisation .....	11
I.6.2.1.1 La méthanisation .....	11
I.6.2.1.2 Les paramètres influençant la production de biogaz ....	13
I.6.2.1.2 La nature des matières premières .....	13
Les grands groupes organiques .....	13
Le carbone .....	14
I.6.2.1.2 La température .....	15
I.6.2.1.2 Le potentiel d'Hydrogène pH .....	15
I.6.2.1.2 Le rapport C/N .....	15
I.6.2.1.2 Le taux d'humidité .....	16
I.6.2.1.2 Les lixiviats .....	16
I.6.2.2 La fermentation alcoolique .....	16
I.6.3 La conversion chimique .....	17
<b>II. LA METHODE D'ESTIMATION DE LA BIOMASSE FORESTIERE...</b>	<b>18</b>
<b>II.1 Etude du dispositif d'inventaire .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2 Méthode d'inventaire .....</b>	<b>18</b>
<b>II.3 Unité et taux de sondage .....</b>	<b>18</b>
<b>II.4 Surface réelle de la placette.....</b>	<b>19</b>
<b>II.5 Mode de répartition des supports.....</b>	<b>19</b>
<b>II.6 Détermination de la forme, de la taille et du nombre de placette</b>	
<b>de mesure .....</b>	<b>20</b>
II.6.1 La forme des placettes .....	20
II.6.2 La taille des placettes .....	20
II.6.3 Le nombre de placette de mesure.....	20
<b>II.7 Les mesures dendrométriques .....</b>	<b>21</b>
<b>II.8 Le volume de chaque arbre .....</b>	<b>22</b>
II.8.1 Formule de DAWKINS .....	22
II.8.2 Formule de SMALIAN .....	22
II.8.3 Formule de HUBER.....	22
II.8.4 Formule de NEWTON.....	23
<b>II.9 Détermination de la surface totale à inventorier.....</b>	<b>23</b>
<b>III. LES METHODES D'INVENTAIRES .....</b>	<b>25</b>
<b>III.1 Un inventaire forestier .....</b>	<b>25</b>
III.1.1 Définition.....	25
III.1.2 Objectif d'un inventaire.....	25
<b>III.2 La méthode d'inventaire intégrale .....</b>	<b>25</b>
<b>III.3 La méthode d'inventaire par échantillonnage .....</b>	<b>26</b>
<b>III.4 Le tarif de cubage .....</b>	<b>27</b>
III.4.1 Estimation du volume sur pied .....	27
III.4.1.1 Détermination de $\overline{H}$ .....	29
III.4.1.1.1 Arbres droits.....	29

III.4.1.1.2 Arbres inclinés (courbés).....	30
III.4.1.1.3 Arbres inclinés (très courbés).....	31
III.4.1.2 Détermination de $\overline{F}$ .....	32
III.4.1.3 Détermination de $\overline{G}$ .....	33
III.4.1.3.1 Abondance.....	33
III.4.1.3.2 Surface terrière.....	33
III.4.1.4 Détermination de V.....	35
III.4.2 Etablissement du tarif de cubage .....	36
III.4.2.1 Définition.....	36
III.4.2.2 Avantages du tarif mathématique.....	36
III.4.2.3 Etablissement du tarif à une entrée .....	36
III.4.2.4 Calcul des coefficients a et b.....	40
III.4.2.5 Détermination du coefficient de corrélation.....	41
III.4.2.6 Calcul de l'erreur sur le volume moyen $\overline{V}$ du à l'application du tarif.....	42
III.4.2.7 Etablissement du tarif à deux entrées.....	43
III.4.3 Estimation du volume sur pied à l'aide de l'inventaire par Echantillonnage.....	43
III.4.4 Estimation du volume sur pied à l'aide de l'inventaire intégral....	44
<b>III.5 Evaluation énergétique des pins et eucalyptus .....</b>	<b>45</b>
III.5.1 L'eucalyptus et le pin.....	45
III.5.2 Le pouvoir calorifique.....	46
III.5.2.1 Correction de formation d'acide « a ».....	47
III.5.2.2 Correction des chaleurs parasites « b » .....	47
III.5.3 Evaluation énergétique.....	47
<b>III.6 Discussion sur les méthodes d'inventaires utilisées .....</b>	<b>48</b>
III.6.1 La méthode d'inventaire intégral.....	49
III.6.2 La méthode d'inventaire par échantillonnage.....	49
III.6.3 Le tarif de cubage.....	49
<b>III.7 Matlab 6.5 .....</b>	<b>49</b>
<b>III.8 Application des méthodes .....</b>	<b>50</b>
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
<b>ANNEXES</b>	

# REMERCIEMENTS

Ce présent travail a été réalisé au sein du laboratoire de l'Institut pour la Maîtrise de l'Energie en collaboration avec le Laboratoire Thermodynamique Thermique et Combustion (LTTC) du Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo.

Que Monsieur **RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina**, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Directeur de l'Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME), soit assuré de mon respectueux dévouement pour l'assistance et les directives qu'il m'a accordé pour arriver à terme de ce mémoire.

Que Madame **RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo**, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Chef de Département de Physique à la Faculté des Sciences, Responsable du Laboratoire de thermodynamique, Thermique et Combustion (LTTC) veuille bien trouver ici la marque de ma profonde reconnaissance pour son soutien ainsi que son encadrement tout au long de ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier :

- Monsieur **RANAIVO-NOMENJANAHARY Flavien**, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Directeur de l'Observatoire de l'Université d'Antananarivo, pour son encadrement, pour son soutien ainsi que pour des recherches de solution pour mener à bien ce travail.
- Monsieur **RASAMIMANANA François de Salle**, Maître de Conférences à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, d'avoir accepté, malgré leur occupation, d'avoir examiné ce travail en tant que membre du Jury.

C'est aussi avec plaisir que je témoigne à présent toute ma reconnaissance à tous les enseignants et le personnel de l'IME, et tous ce qui ont, de près ou de loin, contribués à la bonne réalisation de ce mémoire.

# NOMENCLATURE

Symboles	Définitions	Unités
P	Pouvoir calorifique supérieur	Kcal/Kg
I	Pouvoir calorifique inférieur	Kcal/Kg
L	Chaleur latente de vaporisation d'eau	Kcal/Kg d'eau
M	Quantité d'eau mis en jeu lors de la combustion	-
V <sub>a</sub>	Pouvoir comburivore	m <sup>3</sup> /Kg
I <sub>p</sub>	Pouvoir calorifique inférieur à pression constante	Kcal/Kg
V <sub>f</sub>	Pouvoir fumigène	m <sup>3</sup> /Kg
e	Excès d'air	-
pH	Potentiel d'Hydrogène	-
T <sub>e</sub>	Taux d'échantillonnage	%
S <sub>p</sub>	Surface d'une placette	m <sup>2</sup>
S <sub>tot</sub>	Surface totale à inventorier	m <sup>2</sup>
L	Longueur d'une placette	m
L	Largeur d'une placette	m
R	Rayon d'une placette	m
N	Nombre total de placettes	placettes
h <sub>T</sub>	Hauteur totale	m
h <sub>f</sub>	Hauteur du fût	m
d, DHP	Diamètre à hauteur de poitrine	m
V <sub>d</sub>	Volume de Dawkins	m <sup>3</sup>
C <sub>t</sub>	Taux de matière organique	-

<b>Symboles</b>	<b>Définitions</b>	<b>Unités</b>
$V_s$	Volume de Smalian	$m^3$
$V_h$	Volume de Huber	$m^3$
$V_n$	Volume de Newton	$m^3$
$g_b$	Surface de la section au gros bout	$m^2$
$g_u$	Surface de la section au fin bout	$m^2$
$g_m$	Surface de la section au milieu	$m^2$
$d_{moy}$	Diamètre moyen	m
$C_{moy}$	Circonférence moyenne	m
G	Surface terrière	$m^2$
A	Abondance	N/ha
X	Variable expliquée	-
Y	Variable explicative	-
r	Coefficient de corrélation	-
$t_b$	test	-
Q	Quantité de chaleur	Kcal
L	Longueur de la bille	m
T	Température	°C
$C_0$	Taux initial de matière organique	-
k	Constante de premier ordre inverse du temps de demi-vie	-
$C_{oe}$	Quantité de carbone disponible pour la formation de biogaz	-
$C_o$	Quantité totale de carbone	-
$\Delta H$	Variation de l'enthalpie	KJ/Kg

NOMENCLATURE GRECQUE

Symboles	Définitions	Unités
$\alpha$	Angle d'inclinaison du terrain	degré
$\beta$	Coefficient de forme	-

# LISTE DES TABLEAUX

Tableaux	Pages
<b>Tableau I.1</b> : Types de combustibles	7
<b>Tableau I.2</b> : Volume de biogaz obtenu	14
<b>Tableau I.3</b> : Pourcentage en Carbone	14
<b>Tableau III.1</b> : Fiche d'inventaire intégrale	26
<b>Tableau III.2</b> : Fiche d'inventaire pour la méthode BITTERLICH	35
<b>Tableau III.3</b> : Fiche d'inventaire pour tarif de cubage (1ère méthode)	39
<b>Tableau III.4</b> : Fiche d'inventaire pour tarif de cubage (2 <sup>ème</sup> méthode)	40
<b>Tableau III.5</b> : Fiche d'inventaire pour le volume	44
<b>Tableau III.6</b> : Fiche d'inventaire intégral pour le volume	45
<b>Tableau III.7</b> : Pin et eucalyptus	46
<b>Tableau III.8</b> : Pouvoirs calorifiques	48
<b>Tableau III.9</b> : Taux d'humidité	48
<b>Tableau III.10</b> : Densités des espèces	48
<b>Tableau III.11</b> : Application pour code de calcul	50
<b>Tableau III.12</b> : Valeurs des diamètres et nombre d'arbres	50
<b>Tableau III.13</b> : Résultats	51

# LISTE DES FIGURES

<b>Figures</b>	<b>Pages</b>
<b>Figure I.1</b> : La production de méthane	12
<b>Figure II.1</b> : Dendrométrie	21
<b>Figure II.2</b> : Méthodologie de détermination de la surface totale	24
<b>Figure III.1</b> : Mesure des DHP	26
<b>Figure III.2</b> : Relascope de BITTERLICH	28
<b>Figure III.3</b> : Méthode de mesure des hauteurs pour un arbre droit	29
<b>Figure III.4</b> : Méthode de mesure des hauteurs pour un arbre courbé	30
<b>Figure III.5</b> : Méthode de mesure des hauteurs pour un arbre très courbé	31
<b>Figure III.6</b> : Schéma représentant la méthodologie adoptée dans cette mémoire	52

# INTRODUCTION

Dans un souci de clarté, les différents rôles de la forêt sont regroupés en trois grandes parties : la production de bois, son implication dans la biosphère, les aspects sociaux et culturels. En effet, la demande en bois n'a cessé de croître au cours des dernières décennies en raison de l'expansion démographique et de l'accélération du développement économique. L'utilisation à des fins combustibles est la forme la plus dominante des bois d'usage dans les pays en voie de développement mais n'est que mineure dans les pays industrialisés.

Actuellement à Madagascar, le bois constitue la principale source d'énergie domestique à Madagascar. Elle est exploitée sous forme de charbon de bois ou de bois de chauffe. Ce contexte encourage la déforestation entraînant la dégradation de l'environnement. Ce qui nécessite une prise de conscience claire des risques encourus afin d'éviter les dangers à l'horizon.

Pour surveiller les milieux forestiers et éventuellement intervenir face aux problèmes qui se dressent, il y a un besoin grandissant de supports d'informations. Ces informations sont constituées des surfaces forestières, l'inventaire des différents types forestiers et l'inventaire de la ressource en bois à travers des paramètres liées à la biomasse comme le volume de bois sur pied ( $m^3/ha$  ou tonnes/ha), la surface terrière ( $m^2/ha$ ) et la hauteur des arbres.

A Madagascar, comme dans d'autres pays en voie de développement, les quelques centrales hydro-électriques existantes n'arrivent plus à satisfaire la demande de la population à cause de la croissance incessante de la démographie. Pour y faire face, ces pays utilisent les carburants fossiles importés, pour subvenir à leurs besoins. D'autre part, le cours mondial de pétrole n'a cessé d'augmenter. Cette situation est aggravée par la crise financière mondiale. Le pétrole étant trop cher, les paysans n'ont pas de choix qu'à recourir aux sources d'énergie autour d'eux. Devant cette situation, des solutions alternatives doivent être proposées. Plusieurs travaux et études ont montré que la biomasse forestière constitue une des solutions proposées.

Dans la plupart des cas, l'homme opte pour les procédés les plus simples dont la combustion directe et la pyrolyse. Dans ces formes d'exploitation de la biomasse forestière, il faut éviter le gaspillage de la forêt qu'elle soit naturelle ou artificielle. C'est pourquoi, nous nous sommes proposé d'effectuer ce travail de mémoire portant sur "Contribution à l'évaluation des potentialités énergétiques de la biomasse forestière". Notre étude comporte trois (03) chapitres :

- Nous définissons dans le premier chapitre, les biomasses ainsi que leurs utilisations.
- Les méthodes d'estimation de la biomasse forestière sont décrites dans le second chapitre.
- Le dernier chapitre donne des précisions sur les méthodes d'inventaire et les résultats de simulation ainsi obtenus.
- Une conclusion donne la synthèse des méthodes utilisées.

# Chapitre I

## Les biomasses et leurs utilisations

## **I. LES BIOMASSES ET LEURS UTILISATIONS**

### **I.1. Définition de la biomasse**

Etymologiquement, la biomasse signifie l'ensemble de la matière vivante. Depuis le choc pétrolier, en 1973, ce concept s'applique aux produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques. [1]

La biomasse se définit comme étant « la quantité de matière vivante qui existe dans un habitat donné et que l'on mesure habituellement en tant que poids d'organismes vivants par unité de surface ou en tant que volume de ces organismes par unité de volume de l'habitat considéré. ». [3]

En somme, la biomasse désigne l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale ainsi que ses produits de transformation (les déchets organiques).

### **I.2. Production de la biomasse**

D'après l'échelle établie par HOOGWJK, la production de la biomasse peut être divisée en huit catégories [1] :

- La biomasse produite par le surplus des terres agricoles, non utilisés pour l'alimentation humaine ou animale comme les cultures énergétiques par exemple.
- La biomasse produite par le déboisement (entretien des forêts) ou le nettoyage des terres agricoles.
- La biomasse produite à partir des résidus agricoles issus des cultures de céréales, vignes, vergers, oliviers, fruits et légumes, résidus de l'agroalimentaires, ...
- La biomasse produite à partir des résidus forestiers issus de la sylviculture, et de la transformation du bois.
- La biomasse produite à partir des résidus agricoles issus de l'élevage (fumiers, lisiers, litières, fientes, ....)
- La biomasse produite des déchets organiques des ménages (fractions fermentescibles des ordures ménagères (FFOM), papiers, cartons, déchets verts, ...)
- Biomasse directement utilisés à des fins non alimentaires (bois pour le papier)
- La biomasse produite à partir des déchets organiques des déchets industriels banals (papier, carton, bois, déchets putrescibles, ...)

En résumé, on peut classer les ressources en biomasse en trois grandes parties qui sont forestières, agroalimentaires et urbaines.

Toutes ces ressources sont classées en deux grandes catégories :

- Biomasse sèche comprenant les déchets ligneux appelés aussi « bois-énergie ».
- Biomasse humide, comprenant les déchets organiques d'origine agricoles, agroalimentaires et urbaine, qui peuvent être transformés en engrais ou en

amendements organiques (matières fertilisantes qui enrichissent le sol en matières organiques).

Ainsi, la biomasse peut être considérée comme un combustible et peut être utilisée dans plusieurs secteurs pour satisfaire les besoins énergétiques (production de chaleur et d'électricité). La biomasse peut aussi servir à la production de carburant pour les automobiles.

Un secteur en pleine expansion est celui des biomatériaux, notamment les matériaux plastiques (comme l'emballage, le bâtiment, le transport, .....).

### **I.3. Les constituants de la biomasse**

On distingue trois principaux constituants de la biomasse [4][5]:

- La biomasse **lignocellulosique**, ou **lignine**, privilégiera les procédés « par voie sèche » dits conversions thermochimiques. Elle est constituée par :
  - Le bois et les résidus verts,
  - La paille,
  - La bagasse de canne à sucre,
  - Le fourrage,
- La biomasse alcooligène, ou biomasse à glucide, est riche en substances glucidiques, facilement hydrolysable, privilégiera les procédés de valorisation par voie fermentaire ou par distillation dits conversions biologiques. Elle est constituée par :
  - Les céréales,
  - Les betteraves sucrières,
  - Les cannes à sucre,
- La biomasse oléagineuse est riche en lipide. Elle pourrait être utilisée comme carburant. Elle est constituée par :
  - Le colza,
  - Le palmier à huile,
  - Le jatropha, ....

Les familles de biocarburants sont actuellement développées :

- Les esters d'huiles végétales (esters de colza incorporé dans le gazole ou le fioul domestique, ester de tournesol) ;
- L'éthanol produit à partir des betteraves, incorporable dans le supercarburant sans plomb sous forme d'Ethyl Tertio Butyl Ether (ETBE).

### **I.4. Les gisements de la biomasse**

Les gisements de la biomasse sont nombreux et variés, permettant à tous les pays de s'investir vers ces ressources.

Pour une classification simplifiée, on peut distinguer trois sources de biomasse : les bois, les cultures, les déchets [1].

#### I.4.1 Les bois :

Les déchets de l'agroforesterie et les sous-produits de l'industrie du bois à l'exemple des sciures, des écorces, des branches, en d'autres termes les déchets de la sylviculture sont aussi des ressources accessibles et peu coûteuses.

#### I.4.2 Les cultures :

Le potentiel de l'agriculture est lui aussi considérable : les déchets d'élevage et les sous-produits agricoles (pailles de céréales, tiges de maïs, sarments de vignes, ...).

#### I.4.3 Les déchets :

Cette catégorie regroupe la fraction fermentescible des déchets ménagers, urbains et industriels, les déjections animales ainsi que les déjections humaines. Voici, quelques exemples de produits biomasse de types « déchets » (hors cultures dédiés) : la bagasse, le « bois-écorce », les coques de café, les coques de coton, les coques et fibres de palme, les déchets de maïs, les balles de riz, les coques d'arachides, les coques de tournesol, les rafles de raisin, la margine, le fumier, le lisier, les litières, les fientes, les fractions fermentescibles des ordures ménagères, les papiers, les cartons, les déchets verts, les pailles de céréales, les tiges de maïs, les sarments de vigne, le sang, le marc, les pâtes, les graisses, les cuirs, les légumes et les fruits, les boues d'épuration, etc.

### **I.5. La valorisation de la biomasse**

Dans la valorisation de la biomasse [6], on distingue :

- Les bioénergies (biocarburants, biocombustibles) visent à remplacer les carburants d'origine fossile ou à produire de la chaleur et de l'électricité.
- Les bioproduits, sous lesquels sont regroupés les agro-matériaux (biopolymères, fibres, matériaux de construction,...) et les produits issus de la « chimie du végétal » (tensioactifs, lubrifiants, solvants, ...).

#### I.5.1 Les bioénergies :

##### I.5.1.1 Les biocarburants :

Les biocarburants sont des carburants d'origine agricole, c'est-à-dire des carburants obtenus à partir des matériaux végétaux. Il s'agit d'un combustible liquide issu de la transformation de matières végétales ou animales non fossiles.

Les biocarburants sont connus depuis le début de l'ère automobile. Ainsi, la Ford T. (1903-1926) roulait à l'éthanol et certains moteurs des machines-outils utilisaient de l'huile d'arachide. [6] [7][10]

Il existe plusieurs types de biocarburants :

- Il y a ceux qui sont obtenus à partir d'oléagineux (colza, tournesol, jatropha, palme) tels que les **huiles végétales** (produit direct du pressurage de la graine) immédiatement utilisable dans les moteurs diesel classique et les **esters** (méthylique et éthylique) d'huile végétales (EMHV) obtenu après réaction d'estérification de l'huile avec de l'alcool méthylique qui est utilisé comme additif ou carburant au diesel (de 5 à 30 %) pour former du diester ou du biodiesel.
- Il y a ceux qui sont obtenus à partir de la fermentation de sucre (plantes saccharifères : betteraves, cannes à sucres ; plantes amylacées : pomme de terre, maïs, blé) en **alcool** (méthanol, éthanol). Certains alcools sont utilisés purs pour alimenter les moteurs des véhicules brésiliens. L'alcool peut aussi réagir en raffinerie avec de l'isobutène pour former des éthers (ETBE : Ethyl-TertioButyl-Ether et MTBE : Methyl-TertioButyl-Ether) qui sont mélangés aux essences.

#### I.5.1.2 Les biocombustibles :

Les biocombustibles désignent les combustibles liquides et solides issus de la biomasse. Le bois représente 14 % de la consommation énergétique mondiale, on l'appelle souvent « bois-énergie » quand il est utilisé comme combustible.

L'huile végétale, les huiles essentielles, les déchets organiques solides et les ordures ménagères appartiennent aussi dans la catégorie de biocombustibles [6].

#### I.5.1.3 Le biogaz :

Un des produits finaux de la fermentation méthanogène est un gaz, vecteur énergétique qui se prête à une large gamme d'utilisation.

Le biogaz est un combustible de bonne qualité dont la valeur calorifique atteint 4500 à 5500 kcal/m<sup>3</sup> (le biogaz, après épuration, a une valeur calorifique d'environ 9000 kcal/m<sup>3</sup>).

La fermentation anaérobie permet aux bactéries de décomposer les matières organiques en méthane, en dioxyde de carbone et en d'autres gaz comme l'eau, l'azote et le sulfure d'hydrogène. La réaction a lieu dans un digesteur. [8]

### I.5.2 Les bioproduits :

On observe aujourd'hui l'émergence des biomatériaux, notamment des matériaux plastiques (emballage, bâtiment, transport).

Les biomatériaux sont fabriqués à partir des produits et sous-produits des céréales (amidon, gluten, ...), des oléagineux et protéagineux ainsi que des plantes fibreuses (cellulose). Les huiles végétales sont transformées en lubrifiants, peintures, encres ou détergents biodégradables et non toxiques. [6]

## I.6. Les conversions de la biomasse

Pour obtenir les bioproduits et les bioénergies, on a besoin de convertir et/ou de transformer les biomasses. Pour cela, il existe trois principales filières de transformations :

- La conversion thermochimique
- La conversion biologique
- La conversion chimique

### I.6.1 La conversion thermochimique :

La thermochimie regroupe plusieurs procédés basés sur le craquage des biomolécules sous l'effet de la chaleur. Selon les conditions opératoires de température, pressions, concentrations en agents oxydants, humidité, la matière organique qui est dégradé par la chaleur, produit différents composés solides, liquides ou gazeux. Dans la conversion thermochimique, on distingue :

#### I.6.1.1 La combustion :

La combustion se situe dans le domaine de la thermodynamique appliquée pour la production de la chaleur.

La production de la chaleur est la principale forme actuelle de valorisation énergétique de la biomasse au niveau mondial. [5]

##### I.6.1.1.1 Définition d'un combustible :

Le combustible est une substance qui produit de la chaleur par combustion. Le combustible le plus familier est peut-être la nourriture que le corps humain utilise dans une combustion relativement lente. Un bon combustible ne contient que peu de matière qui ne puissent pas brûler. Il doit se transporter facilement et être peu encombrant à stocker.

Un combustible est un composé que l'on brûle dans une chaudière ou dans un four dans le but de produire de la chaleur. [3][9]

#### I.6.1.1.2 Production de la chaleur :

Les combustibles sont donc des substances chimiques qui, à leur température spécifique d'inflammation ou à une température supérieure, vont se combiner avec d'autres produits chimiques pour former de nouvelles substances.

Ceci se fera avec un « transfert d'électron » et une libération concomitante d'énergie sous la forme chaleur, avec ou sans émission simultanée de lumière. [3]

#### I.6.1.1.3 Types de combustibles :

Les combustibles se présentent sous trois formes : solides, liquides et gazeux. [3][9]

**Tableau I.1 : Exemples de types de combustibles**

Combustibles solides	Combustibles liquides	Combustibles Gazeux
Bois Tourbe Charbon Houille Lignite Anthracite Coke Résidus agricoles Résidus forestiers Résidus animaux	Gazole Pétrole Essence Kérosène Ethanol méthanol	Gaz naturel Gaz des gazogènes Gaz de fumier Gaz de haut-fourneaux Gaz de four à coke

#### I.6.1.1.4 Caractéristiques des combustibles :

Il existe deux grandeurs caractéristiques d'un combustible : la composition et le pouvoir calorifique (PC). [9]

##### I.6.1.1.4.1 La composition :

La composition représente les proportions respectives des différents constituants contenus dans une quantité déterminée d'un combustible. Cette quantité est égale à 1 Kg (solide, liquide) et 1 m<sup>3</sup> (gaz ou 1 Nm<sup>3</sup> dans la CNTP).

En désignant par :

- C, la teneur en carbone d'un combustible.
- H, la teneur en hydrogène d'un combustible.
- O, la teneur en oxygène d'un combustible.
- S, la teneur en soufre d'un combustible.
- N, la teneur en azote d'un combustible.
- E, la teneur en humidité (H<sub>2</sub>O) d'un combustible.

R, les résidus solides d'un combustible.

C', la teneur en C d'un combustible sec

C'', la teneur en C d'un combustible sec et pur

H', la teneur en H d'un combustible sec

H'', la teneur en H d'un combustible sec et pur

S'il en est de même pour les N, S, O, il s'ensuit la relation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} C' = \frac{C}{1 - E} \\ C'' = \frac{C}{1 - E - R} \\ S' = \frac{S}{1 - E} \\ S'' = \frac{S}{1 - E - R} \end{array} \right. \quad (1.1)$$

#### 1.6.1.1.4.2 Le pouvoir calorifique PC :

Le pouvoir calorifique est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète d'une quantité déterminée de combustibles. Il est exprimé en [Kcal/Kg] si le combustible est solide ou liquide, en [Kcal/m<sup>3</sup>] si le combustible est un gaz. Il existe deux types de pouvoir calorifique : le pouvoir calorifique supérieur P et le pouvoir calorifique inférieur I.

##### 1.6.1.1.4.2.1 Le pouvoir calorifique supérieur P :

C'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de combustible tel que :

- Les éléments du combustible sont pris à 0°C.
- Les produits de la combustion (fumés) sont ramenés à 0°C.
- L'eau se trouve à l'état condensé ou liquide.

##### 1.6.1.1.4.2.2 Le pouvoir calorifique inférieur I :

C'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'une unité de combustible tel que :

- Les éléments du combustible sont pris à 0°C.
- Les produits de la combustion (fumés) sont ramenés à 0°C.
- L'eau se trouve à l'état vapeur.

$$P = I + L \text{ (M)} \quad (1.2)$$

Avec  $P$  indiquant le pouvoir calorifique supérieur

$I$ , le pouvoir calorifique inférieur

$L$ , la chaleur latente de vaporisation d'eau ( $L = 600 \text{ [Kcal/Kg d'eau]}$ )

$M$ , la quantité d'eau mis en jeu lors de la combustion

Dans le secteur industriel, les fumées sortent à une température supérieure à la température de condensation de l'eau ( $\theta_{\text{fumées}} > \theta_{\text{condensation de l'eau}}$ ). L'eau est donc éliminée sous forme de vapeur et elle n'a pas le temps de céder sa chaleur de condensation, ainsi, on utilise toujours le pouvoir calorifique inférieur  $I$ .

Pour les combustibles solides ou liquides à faible teneur en H et O ( $< 6 \%$ ), nous avons :

$$I_p = 8100 C + 2900 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 E \quad (1.3)$$

Pour les combustibles solides à H et O élevés, il vient :

$$I_p = [7860 + 280 \sqrt[4]{1 - C'}]C + 21500 \left( H - \frac{O}{8} \right) + 2500 S - 600 E \quad (1.4)$$

Pour les combustibles gazeux, il s'ensuit :

$$I_p = 2580 H_2 + 3050 CO + 8530 CH_4 + 17000 C_m H_p \quad (1.5)$$

$I_p$  désigne le pouvoir calorifique inférieur à pression constante c'est-à-dire que la combustion se fait à l'air libre.

#### I.6.1.1.4.3 Pouvoir comburivore :

Le pouvoir comburivore  $V_a$  est la quantité d'air ou le volume d'air nécessaire et suffisant à la combustion neutre d'une quantité de combustible. Pour les combustibles solides ou liquides, on a :

$$V_a = 106,624 \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) \text{ en } [m^3/Kg] \quad (1.6)$$

Où le paramètre  $V_a$  est donné par :

$$V_a = \frac{V_{O_2}}{0,21}.$$

Pour les combustibles gazeux, nous avons :

$$V_a = 4,76 \left( \frac{CO}{2} + \frac{H_2}{2} + 2.CH_4 + 3,67.HC \right) \quad (1.7)$$

$$V_a = 4,76 V_{O_2}$$

#### I.6.1.1.4.4 Pouvoir fumigène :

Le pouvoir fumigène  $V_f$  est le volume des fumées produites par la combustion neutre d'une unité de combustible (1 Kg ou 1 m<sup>3</sup>).

Pour les combustibles liquides ou solides, on a :

$$V_f = 22,4 \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + \frac{E}{18} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} \right) + 0,79.V_a \quad (1.8)$$

Le volume des fumées sèches  $V'_f$  est donné par :

$$V'_f = 22,4 \left( \frac{C}{12} + \frac{S}{32} + \frac{N}{28} \right) + 0,79.V_a \quad (1.9)$$

Pour les combustibles gazeux, il vient :

$$V_f = CO + H_2 + 3.CH_4 + 4,9.HC + CO_2 + N_2 + E + 0,79.V_a \quad (1.10)$$

$$V_f = CO + CH_4 + 2,45.HC + CO_2 + N_2 + 0,79.V_a \quad (1.11)$$

Pour obtenir une combustion presque complète, il faut les conditions suivantes :

- Il faut une teneur en CO très faible, c'est-à-dire :

$$\beta = \frac{V_{co}}{V_f} \approx 0 \quad (1.12)$$

- En utilisant un excès d'air, alors :

$$e = \frac{V_A - V_a}{V_a} \quad (1.13)$$

$V_a$  étant le volume d'air utilisé pour la combustion de 1 Kg de combustible.

#### I.6.1.2 La pyrolyse :

En l'absence de produits oxydants et sous l'action de la chaleur, la pyrolyse consiste à décomposer la biomasse en une fraction gazeuse non condensable, une fraction liquide (composée de pyroligneux et de goudrons) et un résidu solide (le charbon).

L'intérêt de la carbonisation réside dans le fait que des déchets solides, dont la manutention et le transport sont difficile et coûteux, peuvent être convertis en produits solides ou liquides énergétiquement concentrés. [5]

#### I.6.1.3 La gazéification :

La gazéification du bois est une transformation thermochimique qui consiste à décomposer thermiquement en présence d'un gaz réactif (air,  $O_2$ ,  $H_2O$ , ...), le matériau solide initial pour obtenir des produits gazeux.

Ces produits gazeux pourront ensuite, soit alimenter des engins roulants, soit participer à la préparation du méthanol. [5]

#### I.6.1.4 La liquéfaction :

La liquéfaction produit une bio-huile lourde riche en oxygène et en eau, ce qui réduit leur pouvoir calorifique à moins de la moitié de celui du pétrole.

Les bio-huiles possèdent une faible viscosité et brûlent sans difficultés dans les chaudières, les fours, les turbines, les moteurs diesels. La liquéfaction est souvent un désoxygénant afin de produire une bio-huile lourde et épaisse qui aura alors une faible teneur en eau et en oxygène, appelée aussi pyrolyse rapide. [6]

### I.6.2 La conversion biologique :

#### I.6.2.1. La biométhanisation :

##### I.6.2.1.1. La méthanisation :

La fermentation recouvre l'ensemble des processus de transformation conduisant d'un substrat organique à un métabolite particulier avec libération d'énergie.

La fermentation méthanique est une fermentation anaérobie au cours de laquelle les matières organiques sont dégradées sous l'action des micro-organismes.

La fermentation produit :

- Le biogaz qui est composé de 50 à 65 % de  $\text{CH}_4$ , 35 à 50 % de  $\text{CO}_2$ , vapeur d'eau, composés soufrés (hydrogène sulfuré  $\text{H}_2\text{S}$ , mercaptans  $\text{R-SH}$ ), composés azotés (ammoniac, amines), composés carbonylés (aldéhydes, cétones), combinaisons chlorées et/ou fluorées.
- Un résidu stabilisé et désodorisé qui peut être valorisé sous forme solide ou liquide

Le débit et la richesse en  $\text{CH}_4$  du biogaz dépendent directement du climat local, de l'âge, de la quantité et de la composition des déchets.

En général, la production de biogaz est de l'ordre de 150 à 250  $\text{m}^3$  par tonnes pour les ordures ménagères.

Deux phases sont nécessaires pour la production de  $\text{CH}_4$  telles que : la liquéfaction et la gazéification.

Pour la première phase, c'est-à-dire la liquéfaction des matières organiques, les bactéries acidifiantes réalisent une hydrolyse des produits suivants :

- Carbohydrates en alcool et molécules glucidiques simples ;
- Lipides en glycérol et acides gras ;
- Protéines en aminoacides.

Pour la deuxième phase, c'est-à-dire la gazéification, les bactéries méthanisantes dégradent les acides gras en  $\text{CH}_4$  et en  $\text{CO}_2$ .



*Figure I.1 : La production de méthane*

Ces bactéries de méthane sont connues pour être très répandues dans la nature, ayant été isolées dans le sol, dans le rumen des herbivores, les étangs et dans les eaux des égouts.

Après la fermentation, il reste un substrat riche en N, composés d'éléments solides et liquides qui pourront être utilisés à différents fins comme la fertilisation des sols pour l'agriculture, de cultures d'algues, de cultures hydroponiques ou d'étangs de piscicultures. [8] [15]

## I.6.2.1.2. Les paramètres influençant la production de biogaz :

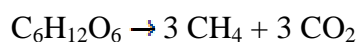
## I.6.2.1.2.1. La nature des matières premières :

## I.6.2.1.2.1.1. Les grands groupes organiques :

La quantité et la composition du gaz produit par la méthanisation dépend des teneurs en C, H, O, N de la matière organique que l'on va traiter. [2] [13]

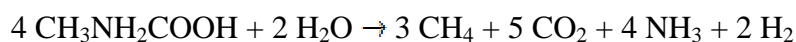
Les glucides permettent d'obtenir un mélange gazeux composés de CH<sub>4</sub> et de CO<sub>2</sub> en proportion égale comme dans la réaction suivante :

Ex : le glucose



Les protides, grosses molécules riches en N se décomposent dans un premier temps en acides aminés puis en CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, ammoniac et hydrogène sulfuré en quantité variable. Le rapport volumique CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> est de 3 pour 1 pour ainsi que montre la réaction de la glycine :

Ex : la glycine

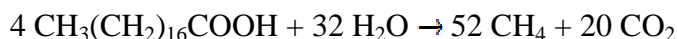


Les **lipides** se dégradent en glycérol et acides gras libres qui subiront la méthanisation, via une  $\beta$  oxydation productrice d'acétate.

Ex : glycérol



Ex: Acides gras libres



Le mélange contiendra 59 CH<sub>4</sub> pour 25 CO<sub>2</sub>.

Les composés ligno-cellulosiques:

Ex : la cellulose



En général, la quantité maximale de biogaz en [m<sup>3</sup>/kg], que l'on peut produire à partir de différents types de substrats est d'environ :

**Tableau I.2 : Volume de biogaz obtenu**

Lipides	Glucides	Protéines
1,2	0,8	0,7

Nous constatons ici que les glucides qui donnent le biogaz à plus faible pouvoir calorifique. A l'opposé, si les déchets sont riches en lipides, la production de CH<sub>4</sub> est abondante. Pour la modélisation de la dégradation de la matière organique, on va utiliser la cinétique d'ordre 1:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-kt} \quad (1.14)$$

Avec

C<sub>t</sub> désignant le taux de matière organique au temps t

C<sub>0</sub>, le taux initial de matière organique

K, la constante de premier ordre inverse du temps de demi-vie.

La matière première est hétérogène et est subdivisée en des groupes caractérisés par leur constante de demi-vie :

- 1 an pour la fraction contenant les glucides, les lipides et les protéides ;
- 5 ans pour les déchets de jardin ;
- 15 ans pour la partie contenant la cellulose et la lignine.

#### I.6.2.1.2.1.2. Le carbone :

Le facteur principal pour la quantité de biogaz est la quantité de carbone contenue dans les matières organiques. Quand les matières organiques se dégradent, une partie du carbone sera assimilée par les micro-organismes pour leur métabolisme et le reste forme de CH<sub>4</sub> et CO<sub>2</sub>.

En termes de pourcentage massique, Bingemer et Crutzen (1987) a élaboré :

**Tableau I.3 : Pourcentage en carbone**

TYPES DE DECHETS	POURCENTAGE
Papier	40
Textiles	40
Bois, pailles	30
Déchets de jardin	17
Déchets de cuisine	15

Pour la formation de biogaz en fonction de la température, la quantité de carbone disponible est donnée par l'équation :

$$\boxed{\frac{C_{oe}}{C_o} = 0.014T + 0.28} \quad (1.15)$$

Avec :

$C_{oe}$ , la quantité de carbone disponible pour la formation de biogaz ;

$C_o$ , la quantité totale de carbone ;

$T$ , la température.

#### I.6.2.1.2.2. La température

Les micro-organismes, contrairement aux animaux supérieurs, ne peuvent réguler leur température. Celle-ci est donc identique à la température du milieu dans lequel ils se développent et leur métabolisme peut en être affecté. L'activité enzymatique des micro-organismes dépend étroitement de la température. En fonction de leur température optimale de croissance, les bactéries sont classées en : **thermophiles** (de 50 à 60 °C), **mésophiles** (30 à 45 °C) et les **psychrophiles** (inférieur à 30 °C). : [13] [14] [16]

A Madagascar, la température optimale est de 35 °C. Une élévation de température peut entraîner une enrichissement en vapeur d'eau.

#### I.6.2.1.2.3. Le potentiel d'Hydrogène pH :

La valeur de pH est un paramètre essentiel pour la conduite d'une fermentation. Les micro-organismes étant incapable de gérer leur propre température, ils peuvent par contre réguler, dans une certaine mesure, leur pH interne. La concentration en ion  $H^+$  dans le milieu extérieur influe grandement sur la croissance des micro-organismes. La fermentation méthanique exige une zone optimale de pH située aux alentours de la neutralité. Cette valeur est égale à 7,1 mais la fermentation peut s'effectuer entre 6,6 et 7,6. [13] [16]

Une chute de pH est un signe de dysfonctionnement ce qui nécessite un ajout de bicarbonate de soude ou un ajout de chaux dans le substrat pour minimiser le risque.

Une augmentation du pH d'une manière persistante nécessite l'apport de matières végétales pour combler l'excès d'azote dans le substrat.

#### I.6.2.1.2.4. Le rapport C/N :

Pour l'approvisionnement des micro-organismes, les éléments essentiels pour leur développement normal sont le carbone C et l'azote N. les micro-organismes consomment 30 fois plus de carbone que d'azote, le rapport C/N optimum est alors de 30.

De ce fait, un mélange adéquat de matières riches en azote comme la déjection animale et celles riches en carbone comme les matières cellulosiques constituent un facteur de réussite d'une bonne fermentation. [16] [17]

#### I.6.2.1.2.5. Le taux d'humidité :

L'humidité empêche la circulation de l'oxygène entre les particules de biomasse, elle favorise l'anaérobiose. Le taux d'humidité dépend du type d'installation et du mode de fermentation, il est aussi un facteur physique important influençant la production de biogaz.

Un excès d'eau induit à la chute de production par unité de volume de la fosse. Un défaut d'eau peut provoquer l'accumulation d'acide organique qui inhibe l'activité enzymatique et freine le processus de fermentation. Le taux d'humidité dépend aussi du taux d'humidité initial des déchets, de l'eau des pluies infiltrées et du volume de lixiviats produits. [13] [16]

#### I.6.2.1.2.6. Les lixiviats :

Pour les traitements de déchets, l'activité microbienne est décrite par les lixiviats qui sont une importante source de données. L'application de modèles basés sur l'évolution des lixiviats est utile après quelques années après le début du processus. Les divers paramètres des lixiviats sont caractérisés par [13]:

- Le **pH** : (Rees, 1980)

$$pH = 0.71t + 4.5 \quad (1.16)$$

- Le rapport **DBO<sub>5</sub>/DCO** : (Ehrig, 1983)

$$DBO_5 / DCO = 1.0024 - 0.1015t \quad (1.17)$$

- Teneur en sulfates :

$$[SO_4^-] = 2553.3 - 454.7t \quad (1.18)$$

#### I.6.2.2. La fermentation alcoolique :

La fermentation alcoolique est un phénomène de dégradation de certaines substances organiques, provoqué par un ferment vivant ou par un principe extrait d'un ferment.

Elle est aussi la transformation chimique de certains sucres qui conduit à la production d'alcool et à un dégagement de gaz carbonique.

La fermentation utilise les levures pour dégrader la matière organique par voie aérobie. La fermentation alcoolique s'effectue en milieu acide.

Après la fermentation, l'alcool éthylique doit subir une distillation pour obtenir l'éthanol ou l'acétone-butanol-éthanol. Tous les sucres en C6 fermentescibles notamment peuvent être convertis en éthanol et en dioxyde de carbone. [7][18]

Ex : Glucose



### I.6.3 La conversion chimique :

La conversion chimique repose sur une estérification d'huiles végétales (tournesol, colza) avec le méthanol pour former un ester méthylique d'huiles végétales (EMHV) qui entre dans la composition du diester ou biodiesel.

Les huiles végétales ou huiles brutes sont extraites des graines oléagineuses telles que le colza, le palme, le jatropha, le soja. Elles peuvent être directement comme carburant ou en mélange, dans des moteurs adaptés. Mais leur viscosité importante, dû à la longueur très importante de leurs chaînes carbonées, les empêche d'être utilisés en leur état. Mais dans un mélange à faible pourcentage, l'huile pure peut être utilisée directement. En subissant un processus chimique nommée transestérification, l'huile pur se transforme en un carburant similaire au diesel pour sa viscosité et son indice de cétane qui est l'ester méthylique ou biodiesel.

La réaction de transestérification consiste à couper les longues chaînes carbonées des huiles végétales afin d'obtenir des esters méthyliques ou éthyliques selon le cas.

Les biodiesels peuvent être utilisés dans les moteurs diesel, pur ou mélangé au gazole en toute proportion (35 % pour les anciens moteurs). [6][7]

# Chapitre II

## La methode d'estimation de la biomasse forestière

## **II. LA METHODE D'ESTIMATION DE LA BIOMASSE FORESTIERE**

### **II.1. Le dispositif d'inventaire**

La méthode d'inventaire est adaptée à la réalité du terrain (Ministère de l'Agriculture, Service des forêts, 1985). [19]

Pour un type de forêt, la méthode d'inventaire dépend à la fois de la précision des données à obtenir, du coût de l'inventaire, de son importance de l'inventaire et de sa durée. L'inventaire permet essentiellement de connaître le potentiel en volume de bois d'une forêt en vue d'une exploitation.

Les activités à entreprendre dans la forêt dépendent essentiellement des connaissances, de la localisation, et de l'importance des richesses qu'elle renferme en :

- Volume de bois exploitable
- Produits accessoires trop souvent négligés alors qu'ils peuvent valoriser économiquement une forêt.
- Potentiel de rajeunissement pour assurer l'avenir de la forêt

### **II.2. Méthode d'inventaire**

Selon les contraintes, il existe deux méthodes d'inventaire [21] :

- L'inventaire intégral (ou pied par pied)
- L'inventaire par échantillonnage (ou par sondage)

### **II.3. Unité et taux de sondage**

Pour mieux représenter la surface à inventorier, deux questions se posent : le choix de l'unité ainsi que celui du taux d'échantillonnage. [21]

La partie des arbres ou de la surface effectivement à inventorier représente l'échantillon qui est lui-même composé d'un ensemble d'unités. La grandeur de l'échantillon est exprimée en nombre d'arbres comptés ou en surfaces inventoriées. Le rapport de cette grandeur à celle de la population totale est évalué, selon le cas, en terme de nombre d'arbres ou de surface. Il est appelée taux de sondage ou encore taux d'échantillonnage.

Le taux de sondage, pour une surface naturelle, se situe entre 2% et 5% (ZOHRER, MULLER, 1992). Pour les inventaires soumis à de nombreuses contraintes (coût, temps, précision, ...) il est préférable de choisir un faible taux de sondage. En effet, si une unité de sondage est un élément de surface matérialisé par une placette couvrant une surface de  $S_p \text{ m}^2$ , alors le taux de sondage s'exprime simplement de la façon suivante :

$$T_e = \frac{S_p}{S_{Tot}} \times 100 \quad (2.1)$$

Où :

$T_e$  représente le taux de sondage ou le taux d'échantillonnage

$S_p$ , la surface d'une placette

$S_{Tot}$ , la surface totale à inventorier

#### II.4. Surface projetée de la placette

En prenant une placette rectangulaire et en tenant compte de la pente ( $\alpha$ ) du relief s'il existe, la surface projetée de la placette est donnée par [22]:

$$S_p = L.l.\cos \alpha \quad (2.2)$$

Avec :

$S_p$  désigne la surface d'une placette

$L$ , la longueur d'une placette

$l$ , la largeur d'une placette

Pour une placette circulaire, la surface projetée est déterminée par : [22]

$$S_p = \pi.r^2.\cos \alpha \quad (2.3)$$

Avec :

$S_p$  représente la surface d'une placette

$r$ , le rayon d'une placette

$\alpha$ , l'inclinaison du terrain

#### II.5. Mode de répartition des supports

La stratification est basée sur des cartes de peuplement, des photos aériennes ou des images satellites. Les limites de chaque strate sont rigoureusement déterminées pour éviter toutes ambiguïtés d'appartenance d'une placette à l'une ou à l'autre des strates. Les strates se déduisent aussi de l'homogénéité de la population d'arbres et/ou des variétés d'espèces.

Le mode de répartition des supports est principalement axé sur l'étude de faisabilité et la validité de l'inventaire par échantillonnage, et cela, en diminuant la variance ou l'erreur-standard à l'intérieur de chaque strate donc à l'ensemble de la forêt. Les supports de mesure peuvent se disperser de diverses manières à l'intérieur de chaque strate. [19]

## II.6. Détermination de la forme, de la taille et du nombre de placette de mesure

### II.6.1 La forme des placettes

Une placette de mesure peut prendre toutes les formes géométriques possibles, mais pour des raisons de commodité, nous adoptons la forme circulaire. Non seulement, elle est la plus courante et utilisée.

En réalité, le manque de visibilité, la densité du couvert et aussi la prolifération du sous-bois dans une forêt naturelle rendent la forme circulaire très difficile. Le problème est résolu en utilisant de placettes relativement grandes c'est-à-dire des surfaces supérieures à 10 ares dans une forêt difficilement pénétrable. [19]

D'autres formes existent également. Citons à titre d'exemple, la forme carrée droite qui possède une simple réalisation sur le terrain.

### II.6.2 La taille des placettes

Dans un inventaire forestier par échantillonnage, il est préférable de prendre un grand nombre d'échantillon pour l'obtention de précision. [19]

Pour un même taux de sondage, DELEPORTE (1992) propose d'utiliser de nombreuses petites placettes au lieu de grandes placettes. D'autres auteurs affirment que le choix de la taille des placettes en fonction des arbres qu'elles contiennent : 10 à 12 arbres en moyennes (DUPLAT et PERROTTE, 1981).

### II.6.3 Le nombre de placette de mesure

Le nombre de placettes de mesure dépend essentiellement de la précision à obtenir, de la variabilité des paramètres à estimer ainsi que de la surface des placettes. En effet, les surfaces des placettes varient en sens inverse de leur variabilité. [19][28]

Le nombre de placettes de mesure est donné par :

$$N = \frac{S_{Tot}}{S_p} \quad (2.4)$$

Avec :

$N$  représente le nombre total de placettes

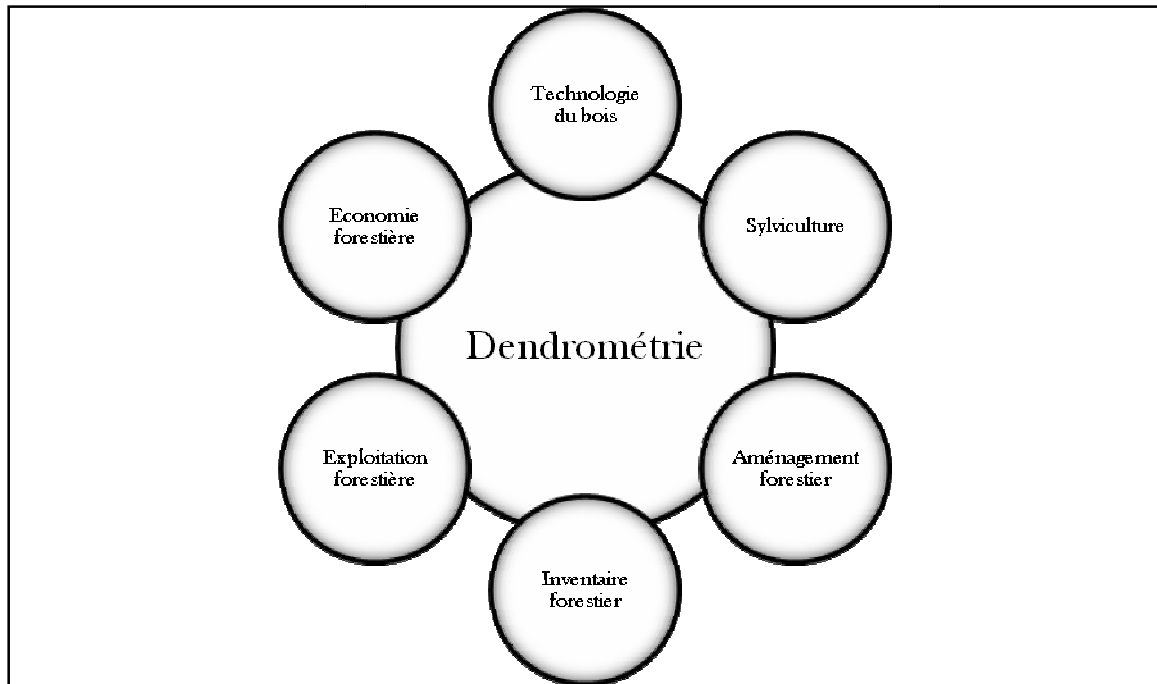
$S_{Tot}$ , la surface totale de la strate

$S_p$ , la surface d'une placette

## II.7. Les mesures dendrométriques

### △ Etude dendrométrique

La dendrométrie est une discipline qui s'occupe de la mensuration quantitative des produits de la forêt. Elle se présente comme l'une des bases fondamentales de la science forestière.



*Figure II.1 : Dendrométrie*

Les classes de hauteur sont choisies afin de considérer tous les individus composant la forêt. Les mesures dendrométriques sont constituées par :[21]

- Diamètre à Hauteur de Poitrine (DHP) (diamètre de l'arbre à 1,30 m du sol)
- Hauteur totale  $h_{tot}$
- Hauteur du fût  $h_f$

Le DHP est mesuré à l'aide d'un compas forestier. Les  $h_{tot}$  et  $h_{fut}$  sont mesurées avec le dispositif HAGA. Ces données nous permettent de calculer le volume.

Lors de la détermination du volume, les valeurs moyennes de chaque paramètre dendrométrique sont calculées et exprimées avec leur erreurs-standards respectives.[19][26]

## II.8. Le volume de chaque arbre

Pour le calcul du volume de chaque arbre, il existe des formules géométriques courantes telles que les formules de DAWKINS, de SMALIAN, de HUBER et de NEWTON.

### II.8.1 Formule de DAWKINS

La formule de DAWKINS est utilisée pour évaluer le volume de la productivité et elle s'écrit comme suit [21] :

$$V = \frac{\pi}{4} \times \beta \times d^2 \times h_T \quad (2.5)$$

Où :

$V$  est le volume de la productivité exprimé en  $\text{m}^3/\text{ha}$

$\beta$ , le coefficient de forme ( $\beta = 0,53$ )

$d$ , le diamètre à 1,30 m du sol ( $DHP$ )

$h_T$ , la hauteur totale

### II.8.2 Formule de SMALIAN

La formule de SMALIAN est utilisée pour obtenir une indication sur le volume du fût c'est-à-dire pour l'exploitabilité et elle s'exprime comme suit [19] :

$$V = \frac{g_b + g_u}{2} \cdot h_F \quad (2.6)$$

Où :

$V$ , le volume de l'exploitabilité

$g_b$ , la surface de la section au gros bout

$g_u$ , la surface de la section au fin bout

$h_F$ , la hauteur du fût

### II.8.3 Formule de HUBER

La formule de HUBER est indiquée par la formule suivante [26]:

$$V = g_m \cdot L \quad (2.7)$$

Où :

$V$ , le volume total d'une tige  
 $g_m$ , la surface de la section au milieu  
 $L$ , la longueur de la bille

#### II.8.4 Formule de NEWTON

Le volume total, à l'aide de la formule de NEWTON, s'exprime de la manière suivante [26]:

$$V = \frac{g_b + 4g_m + g_u}{6} \cdot L \quad (2.8)$$

Où :

$V$  désigne volume total de la tige  
 $g_b$ , la surface de la section au gros bout  
 $g_u$ , la surface de la section au fin bout  
 $g_m$ , la surface de la section au milieu  
 $L$ , la longueur de la bille

Avec :

$$g_b = \frac{\pi}{4} \cdot d_b^2 ; g_u = \frac{\pi}{4} \cdot d_u^2 ; g_m = \frac{\pi}{4} \cdot d_m^2$$

### II.9. Détermination de la surface totale à inventorier

La surface totale à inventorier est déterminer soit à l' aide

- Des données cartographiques c'est-à-dire les cartes d'occupations du sol
- Des images satellitales (LANDSAT, SPOT, ...) suivi des corrections pour la bonne lecture des images

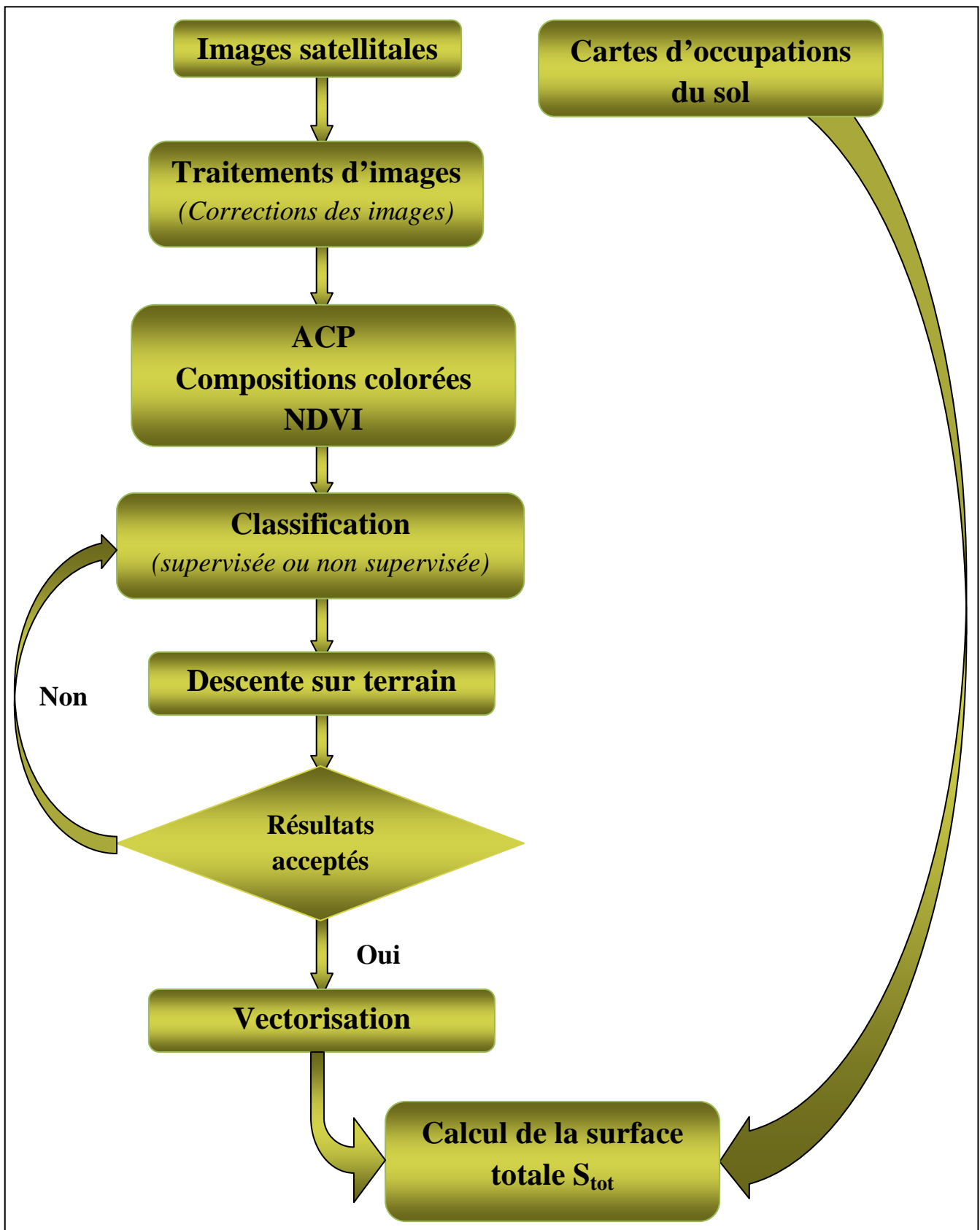


Figure II.2 : Méthodologie de détermination de la surface totale

# Chapitre III

## Les méthodes d'inventaires

---

### **III .LES METHODES D'INVENTAIRES**

#### **III.1. Un inventaire forestier**

##### **III.1.1 Définition**

Un inventaire évoque des idées qui tournent autour du recensement ou du dénombrement ou d'évaluation des quantités et qualités des ressources. [23]

L'inventaire forestier peut être défini comme l'ensemble d'activités permettant d'obtenir, avec une certaine précision, une ou plusieurs informations qualitatives et quantitatives concernant une plantation ou une forêt naturelle, définie par ses limites géographiques.

##### **III.1.2 Objectif d'un inventaire**

Les travaux d'inventaire ont pour objectif de collecter des informations qui caractérisent les forêts de parcelles détachées. [19]

A la suite, ils permettent l'analyse des données comme la composition floristique, les caractéristiques du peuplement (tel que les DHP, la surface terrière, le nombre de tiges moyen à l'hectare), le pouvoir de régénération de la forêt et ainsi que l'état de santé de la forêt.

#### **III.2. La méthode d'inventaire intégrale**

Principalement, la mission de la méthode d'inventaire intégrale consiste à déterminer, avec la meilleure précision possible, le potentiel en volume de bois ainsi que la composition en nombre de tiges d'une population d'arbres qui constitue une forêt. [21]

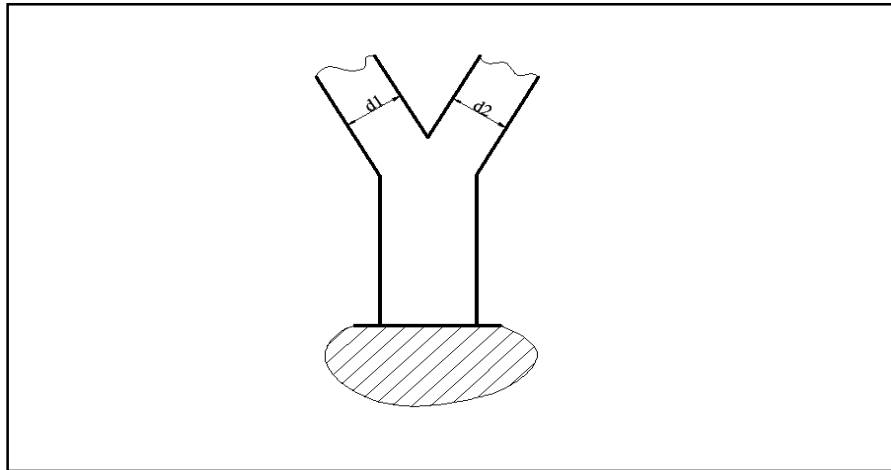
En effet, la méthode d'inventaire pied par pied consiste à déterminer toutes les tiges qui composent la forêt.

Pratiquement, cette forme d'inventaire est possible à réaliser pour les surfaces moyennement petites.

##### **Y Mode opératoire**

Le mode de travail est la suivante :

Pour tous les arbres, on mesure le DHP (i.e. le diamètre à 1,30 m du sol). Mais pour ceux qui présentent des anomalies (voir figure III.1), on prend la moyenne des diamètres  $d_1$  et  $d_2$  observés au niveau de l'embranchement. [21]



**Figure III.1 : Mesure des DHP**

Soit :

$$d_{\text{moy}} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (3.1)$$

Lors de l'inventaire, une fiche de type indiqué par le tableau III.1 est à remplir.

**Tableau III.1 : Fiche d'inventaire intégrale**

Ø [cm]	Nombre d'arbres
10	1707
11	1128
12	859
13	638
14	534
15	473

A partir de ces données, la circonférence moyenne est déduite à travers des relations suivantes :

$$C_{\text{moy}} = \pi \cdot d \quad \text{ou} \quad C_{\text{moy}} = \pi \cdot d_{\text{moy}} \quad (3.2)$$

Où d est le DHP et  $d_{\text{moy}}$ , le diamètre moyen des fûts

### III.3. La méthode d'inventaire par échantillonnage [22][25]

Au regard du temps et des moyens disponibles, dans de nombreux cas où la surface à inventorier est trop grande, il est nécessaire de choisir et de procéder à un inventaire par sondage ou par échantillonnage.

Pour l'inventaire par échantillonnage systématique, les unités sont choisies selon un schéma rigide, prédéterminé et présentant un objectif principal qui consiste à couvrir, de manière uniforme autant que possible, l'ensemble de la population du site.[22]

Pour les placettes circulaires, afin d'avoir la bonne répartition des unités d'échantillonnage, on choisit la disposition en lignes ou en transect, c'est-à-dire les lignes sont réparties à distances égales au sein de la surface à inventorier.[25]

### III.4. Le tarif de cubage

#### III.4.1. Estimation du volume sur pied

Pour le calcul du volume sur pied, on a recours à la méthode de BITTERLICH consistant à déterminer le volume à partir des paramètres qui sont : [26]

- La surface terrière moyenne :  $\overline{G}$  en  $m^2$
- Le coefficient de forme moyen :  $\overline{F}$
- La hauteur moyenne (fût utile) :  $\overline{H}$  en  $m$

#### ∴ Le relascope de BITTERLICH à bandes larges [27]

Il s'agit d'un appareil optique permettant de connaître à distance le diamètre d'un arbre à n'importe quelle hauteur de celui-ci. Il est constitué d'un boîtier à l'intérieur duquel se déplace un pendule sur lequel sont portées des graduations visibles à l'œil. Ces graduations comprennent :

- Onze (11) bandes larges blanches et noires alternées
- Quatre (4) bandes étroites blanches et noires alternées

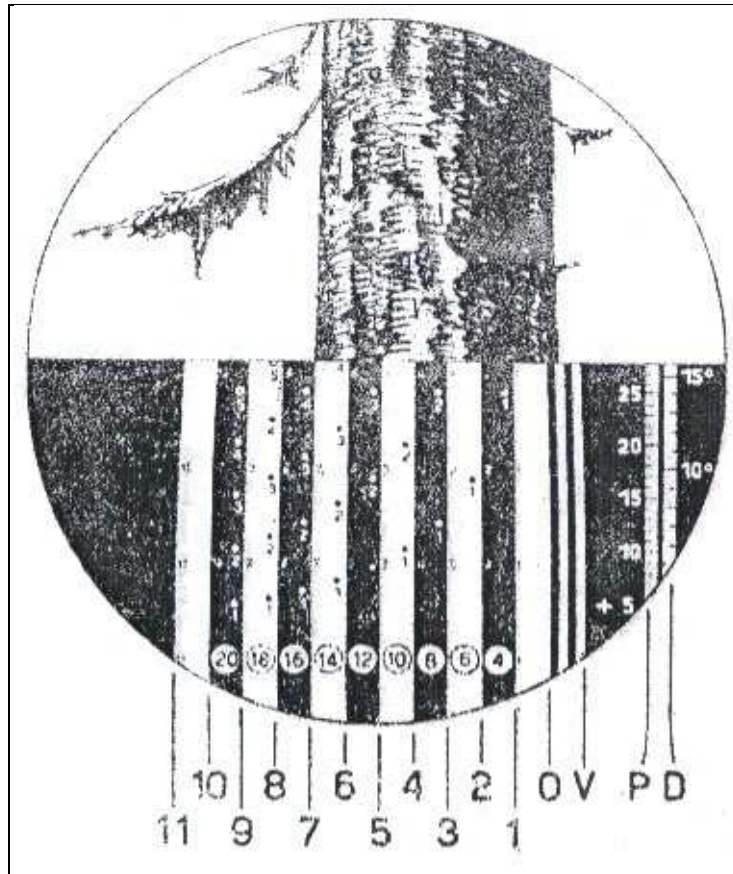
Sur chacune des 9 bandes larges centrales et au centre de celles-ci est indiqué, dans un cercle, un chiffre pair compris entre 4 et 20. Sur ces 9 bandes sont indiquées à partir du milieu et vers le haut, des points ronds correspondant à des mètres en hauteur (chaque point correspondant à une hauteur multiple de 5 étant indiqué par des petits cercles).

Toutes les lectures sont faites au niveau de la ligne médiane horizontale séparant le champ de vision des graduations du pendule.

L'observateur se place à une distance égale à un chiffre de mètre compris entre 4 et 20 de l'arbre déterminée par un mètre à ruban entre l'arbre et lui. Il mesure ensuite le nombre de bandes larges et de bandes étroites couvertes par le contour apparent de l'arbre. Pour cela, il dispose le contour apparent gauche à la limite entre deux bandes larges de manière à ce que le contour apparent droit se trouve dans la plage des bandes étroites (voir la figure III.2).

Le diamètre de l'arbre est ainsi mesuré par un nombre entier de bandes larges auquel s'ajoute un nombre entier de demi-bandes étroites. Puis il décline l'appareil de manière à ce que la ligne médiane du champ de vision se trouve successivement aux hauteurs (H+1) m, (H+2) m et ainsi de suite qu'on lira dans cette même bande et à chacune de ces hauteurs, il fait la mesure du diamètre.

A la suite de quoi, on sera en possession d'une part, du diamètre de référence, et d'autre part, des diamètres au milieu des billions successifs de 2m de haut, dont les volumes cumulés donneront le volume total de l'arbre.



**Figure III.2:** Relascope de BITTERLICH

Par la méthode de BITTERLICH, le volume exprimé en  $m^3/ha$  se définit comme suit : [21]

$$\boxed{V = \bar{G} \times \bar{F} \times \bar{H}} \quad (3.3)$$

Pour le calcul, on prend au hasard  $n$  placettes parmi les  $N$  unités d'échantillonnage décrit précédemment.

### III.4.1.1 Détermination de $\overline{H}$

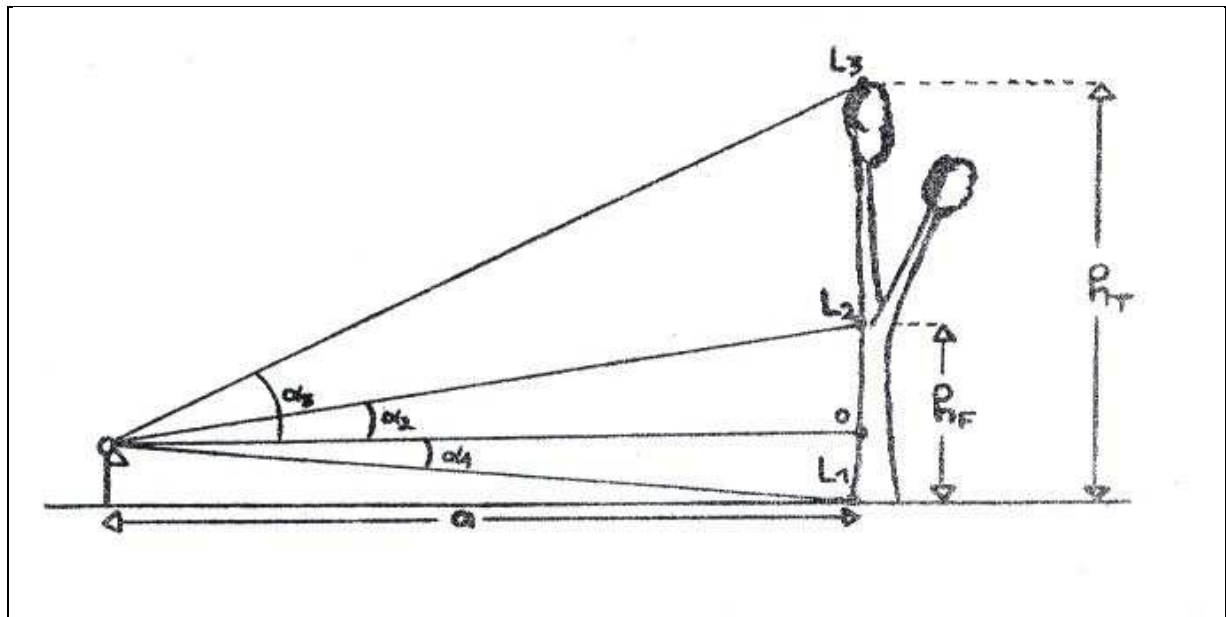
#### Y Mode opératoire :

On mesure, avec le relascope de BITTERLICH, les hauteurs des  $m$  arbres présents dans une placette considérée. Puis, on calcule la moyenne de ces hauteurs, ce qui donne la hauteur  $\overline{h}$  de la placette. [26]

La connaissance des hauteurs peut nous renseigner sur les caractéristiques verticales des arbres. Ces caractéristiques associées à la surface terrière et au coefficient de forme sont nécessaires au calcul du volume des arbres. Pour chaque arbre, on a deux hauteurs caractéristiques qui sont :

- La hauteur totale ou la hauteur jusqu'à l'extrémité physique de la tige
- La hauteur de fût ou la hauteur à partir de laquelle l'arbre se courbe ou se fourche.

#### II.4.1.1.1 Arbres droits[26]



**Fig III.3:** Méthode de mesure des hauteurs pour un arbre droit

Un arbre droit est caractérisé par les paramètres indiqués sur la figure III.3. Entre ces paramètres, existent les relations suivantes : [26]

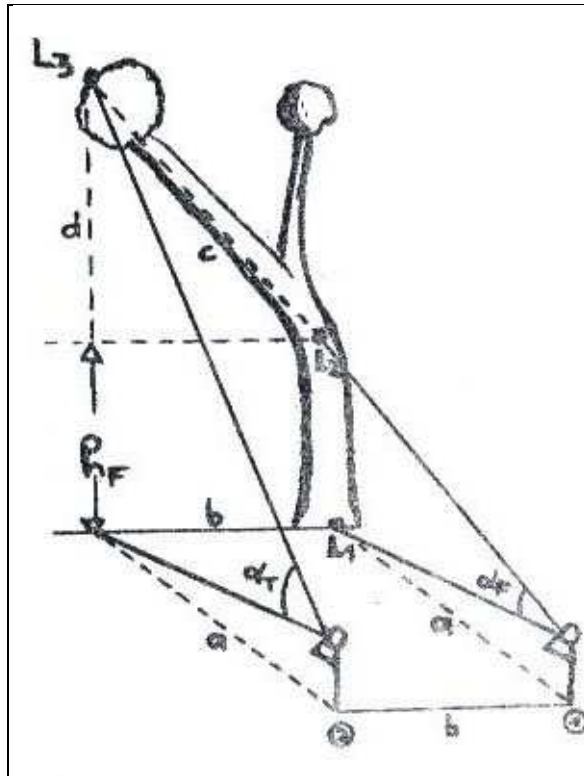
$$\operatorname{tg}(\alpha_1) = \frac{L_1}{a} ; \operatorname{tg}(\alpha_2) = \frac{L_2}{a} ; \operatorname{tg}(\alpha_3) = \frac{L_3}{a} \text{ avec } \begin{aligned} h_F &= L_1 + L_2 \\ h_T &= L_1 + L_3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_F &= a.(|\operatorname{tg}\alpha_1| + |\operatorname{tg}\alpha_2|) \\ h_T &= a.(|\operatorname{tg}\alpha_1| + |\operatorname{tg}\alpha_3|) \end{aligned} \quad (3.4)$$

#### II.4.1.1.2 Arbres inclinés (courbés)[26]

Pour un arbre incliné, on introduit les grandeurs géométriques selon la figure III.4. Le principe est le même pour la hauteur fût-droit car à ce niveau commun, il n'y a pas encore de courbure. [26]

Mais pour la hauteur totale, pour un arbre qui ne courbe pas trop, on assimile la partie inclinée à l'hypoténuse d'un triangle rectangle et on fait les mesures sur une droite parallèle à la projection verticale de la partie inclinée sur le sol.



**Fig III.4 :** Méthode de mesure des hauteurs pour un arbre courbé

Ces paramètres géométriques se calculent grâce aux relations suivantes :

$$d = (|L_1| + |L_3|) - (|L_1| + |L_2|) = a.(\operatorname{tg}(\alpha_T) - \operatorname{tg}(\alpha_F))$$

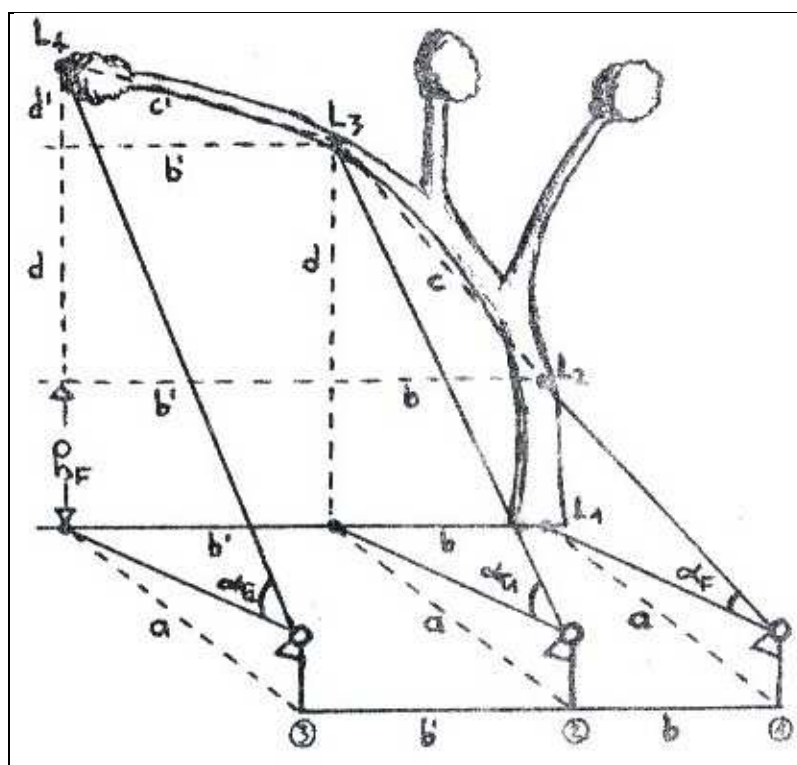
$$c^2 = b^2 + d^2 \Rightarrow c = a.\operatorname{tg}(\alpha_F) + \sqrt{b^2 + a^2.(\operatorname{tg}(\alpha_T) - \operatorname{tg}(\alpha_F))^2}$$

D'où :

$$\begin{aligned} h_F &= a \cdot \text{tg}(\alpha_F) \\ h_T &= a \cdot \text{tg}(\alpha_F) + \sqrt{b^2 + a^2 \cdot (\text{tg}(\alpha_T) - \text{tg}(\alpha_F))^2} \end{aligned} \quad (3.5)$$

#### II.4.1.1.3 Arbres inclinés (très courbés) [26]

Pour ce type d'arbre, la méthode utilisée propose l'introduction des paramètres géométriques comme l'indique la figure III.5. Moyennant ces variables, les hauteurs totales et de fût se déterminent à travers les relations suivantes :



**Fig III.5 :** Méthode de mesure des hauteurs pour un arbre très courbé

$$h_T = |L_1| + |L_4| \Rightarrow h_T = h_F + c + c'$$

$$\text{On a } c'^2 = b'^2 + d'^2 \text{ et } c^2 = b^2 + d^2$$

$$\text{Avec } d = |L_3| - |L_2| = a \cdot (\text{tg}(\alpha_{T_1}) - \text{tg}(\alpha_F)) ; d' = |L_4| - |L_3| = a \cdot (\text{tg}(\alpha_{T_2}) - \text{tg}(\alpha_{T_1}))$$

$$c = \sqrt{b^2 + a^2 \cdot (\text{tg}(\alpha_{T_1}) - \text{tg}(\alpha_F))^2}$$

$$c' = \sqrt{b'^2 + a^2 \cdot (\operatorname{tg}(\alpha_{T_2}) - \operatorname{tg}(\alpha_{T_1}))^2}$$

D'où :

$$\begin{aligned} h_F &= a \cdot \operatorname{tg}(\alpha_F) \\ h_T &= a \cdot \operatorname{tg}(\alpha_F) + \sqrt{b^2 + a^2 \cdot (\operatorname{tg}(\alpha_{T_1}) - \operatorname{tg}(\alpha_F))^2} + \sqrt{b'^2 + a^2 \cdot (\operatorname{tg}(\alpha_{T_2}) - \operatorname{tg}(\alpha_{T_1}))^2} \end{aligned} \quad (3.6)$$

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^m h_i^b}{m} \quad (3.7)$$

Où :

$\bar{h}$  , la hauteur moyenne des arbres dans une placette

$h_i^b$  , la hauteur de chaque arbre par le relascope de BITTERLICH

$m$  , le nombre d'arbres dans une placette

#### III.4.1.2 Détermination de $\bar{F}$

##### Y Mode opératoire :

On mesure le **DHP** (diamètre à hauteur de poitrine). De même, le diamètre  $d_{moy}$  à la moitié du fût utile sur les arbres de la placette est évalué. A partir de ces deux données, on calcule le coefficient de forme pour chaque arbre, noté par  $f$ , pour chaque arbre par l'intermédiaire de la formule : [21]

$$f = \frac{d_{moy}^2}{d_{1,30}^2} \quad (3.8)$$

Avec :

$d_{moy}$  représente le diamètre à la moitié du fût utile

$d_{1,30}$ , le diamètre à 1m30 du sol

On détermine ensuite la moyenne du coefficient de forme  $\bar{f}$  par la formule :

$$\bar{f} = \frac{\sum_{j=1}^m f_j}{m} \quad (3.9)$$

Où :

$\bar{f}$  désigne le coefficient de forme pour la placette considérée

$f_j$ , coefficient de forme pour un arbre

$m$ , nombre d'arbres dans la placette

### III.4.1.3 Détermination de $\bar{G}$

Au centre de la placette, on vise successivement, à hauteur de poitrine, on fait le tour d'horizon complet en comptant tous les arbres visibles qui l'entourent.

Ainsi, les arbres dont le diamètre apparent du tronc est supérieur ou égal à la largeur de la bande blanche dans le relascope sont comptés. La surface terrière moyenne, s'exprimant en hectares, équivaut au nombre d'arbres comptés.

#### III.4.1.3.1 Abondance

L'abondance est définie par le nombre d'individus par unité de surface (ha) obtenu à partir du nombre d'individus par placette. [22]

$$A = \frac{m}{S_p} \quad (3.10)$$

Où :

$A$  désigne abondance exprimée en [N/ha]

$m$ , nombre d'arbre dans une placette

$S_p$ , surface d'une placette

#### III.4.1.3.2 Surface terrière

Pour la quantification de la grosseur des arbres, la circonférence et le diamètre à hauteur de poitrine sont des paramètres conventionnels indispensables.

##### 1<sup>ère</sup> méthode (Circonférence)

La surface terrière s'exprime à l'aide de l'abondance des espèces dans une placette et de la surface terrière par catégorie de grosseur, suivant l'équation : [22]

$$\bar{g} = \frac{A}{G_{\text{moy}}} \quad (3.11)$$

Où :

$\bar{g}$  représente la surface terrière

$A$ , abondance exprimée en [N/ha]

$G_{\text{moy}}$ , surface terrière par catégorie de grosseur

$$G_{\text{moy}} = \frac{C_{\text{moy}}^2}{4\pi} \quad \text{avec} \quad C_{\text{moy}} = \frac{\sum_{j=1}^m C_j}{m}$$

Où :

$C_{\text{moy}}$ , valeur centrale de la classe de circonférence

$m$ , nombre d'arbre dans une placette

$C$ , circonférence d'un arbre dans une placette

$G_{\text{moy}}$ , surface terrière par catégorie de grosseur

#### 2<sup>ème</sup> méthode (diamètre à 1m30)

Cependant le diamètre peut être utilisé comme paramètre et la surface terrière s'exprime, dans ce cas par la formule :

$$g = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Où :

$g$ , la surface terrière ou la surface de la section d'un arbre à 1m30 du sol

$d$ , diamètre à 1m30 du sol

Ainsi, pour les  $m$  arbres, il vient :

$$\bar{g} = \frac{\sum_{j=1}^m g_j}{m}$$

Les résultats ainsi obtenus sont intégrés au sein du tableau III.2 de type indiqué.

**Tableau III.2 : Fiche d'inventaire pour la méthode BITTERLICH**

N°Placette	$\bar{f}$	$\bar{g}$	$\bar{h}$
1	16	18.8	0.53
2	25	16.8	0.42
3	19	20.5	0.50
4	15	18	0.42

Pour une surface  $S_{Tot}$  à inventorier, on obtient le nombre de placettes  $N$  d'échantillonnage considéré pour l'inventaire.

#### III.4.1.4 Détermination de V

Pour les  $N$  placettes d'inventaire, nous avons, comme valeurs moyennes les valeurs suivantes :

- La surface terrière :

$$\bar{G} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{g}_i}{N} \quad (3.12)$$

- Le coefficient de forme

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{f}_i}{N} \quad (3.13)$$

- La hauteur moyenne

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{h}_i}{N} \quad (3.14)$$

D'où le volume par hectare est tel que :

$$V = \bar{F} \times \bar{G} \times \bar{H}$$

Donnant le volume total pour toute la surface :

$$\boxed{V_{\text{Tot}} = V \times S_{\text{Tot}}} \quad (3.15)$$

### III.4.2. Etablissement du tarif de cubage [26]

#### III.4.2.1 Définition

Un tarif de cubage donne sous forme de tableau ou de graphique le volume d'un arbre ou encore le volume moyen par tige d'un ensemble d'arbres et ceci suivant différentes possibilités :

- Soit en fonction d'une seule donnée : le diamètre (ou circonférence) à hauteur d'homme : **tarifs à une entrée.**
- Soit en fonction de deux données : diamètre (ou circonférence à hauteur d'homme) et hauteur : **tarifs à deux entrées.**
- Soit en fonction de plus de deux entrées mais cas est encore rare.

#### III.4.2.2 Avantages du tarif mathématique

Le tarif ainsi calculé, selon la procédure ci-dessous, possède des avantages comme :

- L'affranchissement de l'opérateur à tout élément subjectif
- Un tarif mis sous forme d'équation entraîne la facilité des calculs d'accroissement ultérieurs.
- La facilité du calcul de l'erreur (à craindre au sens statistique du terme).

#### III.4.2.3 Etablissement du tarif à une entrée

- 1<sup>ère</sup> méthode : Méthode de Fisher

Pour l'établissement des tarifs qu'ils soient à un ou deux entrées, on a recours à la régression linéaire simple suivant la méthode des moindres carrées. [26]

Les paramètres suivants sont définis :

- $p$  : l'effectif de l'échantillon.
- $\bar{X}$  : la moyenne des variables explicatives.
- $\bar{Y}$  : la moyenne des variables expliquées.

- $\sum x^2$  : la somme des carrés des écarts à la moyenne des variables explicatives.
- $\sum y^2$  : la somme des carrés des écarts à la moyenne des variables expliquées.
- $\sum x.y$  : la somme des produits des écarts aux moyennes.

Avec :

$$x = X - \bar{X} \text{ et } y = Y - \bar{Y}$$

Dans la méthode des moindres carrés, les paramètres caractéristiques sont tels que :

- Le coefficient de régression de Y en X

$$b = \frac{\sum_{j=1}^p x_j \cdot y_j}{\sum_{j=1}^p x_j^2} \quad (3.16)$$

- L'estimation de a se fait à l'aide de l'équation :

$$a = \bar{Y} - b \cdot \bar{X} \quad (3.17)$$

- L'ajustement de Y, pour X donné, se fait par :

$$d_{xy} = y - b \cdot x \quad (3.18)$$

- La somme des carrés des écarts à la droite de régression :

$$\frac{\sum_{j=1}^p d_{yx}^2}{n - 2} = s_{yx}^2 \quad (3.19)$$

- L'écart type observé du coefficient de régression :

$$s_b = \frac{s_{yx}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p x_i^2}} \quad (3.20)$$

- Le coefficient de corrélation est utilisé pour tester l'existence d'une relation linéaire entre les deux variables Y et X.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^p x_i \cdot y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^p x_i^2 \cdot \sum_{i=1}^p y_i^2}} \quad (3.21)$$

- Le calcul de  $t_b$  sert de test pour le coefficient de régression b et de vérification de la valeur de r :

$$t_b = \frac{b}{s_b} = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3.22)$$

• 2<sup>ème</sup> méthode : Méthode de corrélation

La deuxième méthode, pour l'établissement des tarifs, fait intervenir les paramètres qui sont : [21]

- X : les variables explicatives.
- Y : les variables expliquées.
- $\sum X$  : la somme des variables explicatives.
- $\sum Y$  : la somme des variables expliquées.
- $\sum X^2$  : la somme du carré des variables explicatives.
- $\sum Y^2$  : la somme du carré des variables expliquées.
- $\sum XY$  : la somme des produits des variables expliquées et explicatives.

La détermination de **a** et de **b** se fait par :

$$\begin{cases} p \cdot a + (\sum X) \cdot b = \sum Y \\ (\sum X) \cdot a + (\sum X^2) \cdot b = \sum XY \end{cases} \quad (3.23)$$

- Le coefficient de corrélation  $r$  est obtenu à l'aide de :

$$r = \frac{p \cdot (\sum XY) - (\sum X \cdot \sum Y)}{\sqrt{[p \cdot (\sum X^2) - (\sum X)^2][p \cdot (\sum Y^2) - (\sum Y)^2]}} \quad (3.24)$$

- Le test se fait à partir de la relation :

$$t = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{1-r^2} \quad (3.25)$$

Où  $t$  est comparé avec  $t_0$  de la table de STUDENT-FISHER

Le tarif à une entrée d'HUMMEL-ABADIE est choisi pour établir le tarif tant pour la première méthode que pour la deuxième. Il se traduit par la formule : [21]

$$V = a + b \cdot d^2 \quad (3.26)$$

Où

$V = Y$  : volume en  $m^3$

$d^2 = X$  : le diamètre à 1m30 du sol

Pour la première méthode, les relevés des données se font sur le tableau III.3.

**Tableau III.3 : Fiche d'inventaire pour tarif de cubage (1<sup>ère</sup> méthode)**

N°	X	$x^2$	Y	$y^2$	$d_{xy}$
1	0.1600	0.000506	0.6600	0.000610	-0.0926
2	0.0576	0.006384	0.2419	0.154764	0.0225
3	0.0169	0.014544	0.0430	0.350819	0.0355
4	0.1936	0.003147	0.7072	0.005170	-0.2204
5	0.1444	0.000048	0.6867	0.002642	0.0153

Pour cette première méthode, l'application du code de calcul « andrana\_1 » nous a permis d'obtenir les valeurs de  $a$  et de  $b$ . Nous avons

$$a = 0.0066$$

$$b = 4.0274$$

Le tarif de cubage deviendra alors :

$$V = 0.0066 + 4.0274 \cdot d^2$$

Pour la deuxième méthode, les équations normales suivantes nous permettent de déterminer les coefficients **a** et **b** du tarif :

$$\begin{cases} a.p + b.\sum_{i=1}^p d^2 = \sum_{i=1}^p V \\ a.\sum_{i=1}^p d^2 + b.\sum_{i=1}^p d^4 = \sum_{i=1}^p V.d^2 \end{cases}$$

Avec :

$p$  , nombre d'arbres mesurés

$d$  , diamètre à 1m30 du sol

$V$  , volume

#### III.4.2.4 Calcul des coefficients a et b

La collecte des données se fait sur un tableau comme suit :

**Tableau III.4 : Fiche d'inventaire pour tarif de cubage (2ème méthode)**

N° de l'arbre	$d_{1,30}$	V	$d^2$	$d^4$	$V^2$	$V.d^2$
1	3	0.002	0.0009	$8.10^{-7}$	$40.10^{-7}$	$18.10^{-7}$
12	4	0.005	0.0016	$26.10^{-7}$	$250.10^{-7}$	$80.10^{-7}$
36	5	0.006	0.0025	$63.10^{-7}$	$360.10^{-7}$	$150.10^{-7}$
45	6	0.010	0.0036	$130.10^{-7}$	$10^{-4}$	$360.10^{-7}$
54	7	0.015	0.0049	$240.10^{-7}$	$2250.10^{-7}$	$735.10^{-7}$

Les données étant obtenues, on obtient aussi  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  tels que:

$$x_1 = \sum_{i=1}^p d^2; x_2 = \sum_{i=1}^p V; x_3 = \sum_{i=1}^p d^4; x_4 = \sum_{i=1}^p V.d^2; x_5 = \sum_{i=1}^p V^2$$

Notre système d'équations devient ainsi :

$$\begin{cases} a.p + b.x_1 = x_2 \\ a.x_1 + b.x_3 = x_4 \end{cases}$$

La résolution du système d'équation s'effectue comme suit :

$$\Delta = \begin{vmatrix} p & x_1 \\ x_1 & x_3 \end{vmatrix} \Rightarrow \Delta = p.x_3 - x_1^2$$

L'expression de a :

$$\Delta_a = \begin{vmatrix} x_2 & x_1 \\ x_4 & x_3 \end{vmatrix} \Rightarrow \Delta_a = x_2 \cdot x_3 - x_4 \cdot x_1 \text{ d'où } a = \frac{x_2 \cdot x_3 - x_4 \cdot x_1}{p \cdot x_3 - x_1^2}$$

$$\Delta_b = \begin{vmatrix} p & x_2 \\ x_1 & x_4 \end{vmatrix} \Rightarrow \Delta_b = p \cdot x_4 - x_1 \cdot x_2 \text{ d'où } b = \frac{p \cdot x_4 - x_1 \cdot x_2}{p \cdot x_3 - x_1^2}$$

En appliquant la deuxième méthode au sein du code de calcul « andrana\_2 », les valeurs de a et b obtenu sont :

$$a = -8.4082$$

$$b = 3.1262$$

Le tarif de cubage deviendra alors :

$$V = -8.4082 + 3.1262d^2$$

#### III.4.2.5 Détermination du coefficient de corrélation

Nous pouvons supposer à priori une relation linéaire entre  $d^2$  et  $V$ . Nous déterminons le coefficient de corrélation  $r$  pour vérifier si la relation linéaire est étroite ou non.

Le coefficient de corrélation est de la forme :

$$r = \frac{T}{\sqrt{R \cdot S}} \quad (3.27)$$

Avec :

$$T = \sum_{i=1}^p V \cdot d^2 - \frac{\sum_{i=1}^p d^2 \cdot \sum_{i=1}^p V}{p}$$

Ou :

$$T = x_4 - \frac{x_1 \cdot x_2}{p}$$

$$R = \sum_{i=1}^p d^4 - \frac{\left(\sum_{i=1}^p d^2\right)^2}{p} \quad \text{ou} \quad R = x_3 - \frac{x_1^2}{p}$$

$$S = \sum_{i=1}^p v^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^p v\right)^2}{p} \quad \text{ou} \quad S = x_5 - \frac{x_2^2}{p}$$

#### III.4.2.6 Calcul de l'erreur sur le volume moyen $\bar{V}$ du à l'application du tarif

Pour estimer la valeur de l'erreur survenue durant la détermination du volume, nous appliquons la formule suivante :

$$e(\bar{V}) = \pm \frac{2}{\sqrt{p}} \cdot \sqrt{\frac{(1-r^2) \left( \sum_{i=1}^p v^2 - \left( \bar{V} \cdot \sum_{i=1}^p v \right) \right)}{p-1}}$$

Où :

$p$  : nombres de tiges cubées

$r$  : coefficient de corrélation

$V$  : volume des tiges cubées

Avec :

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^p v}{p}$$

D'où :

$$\bar{V} = \frac{x_2}{p}$$

$$e(\bar{V}) = \pm \frac{2}{\sqrt{p}} \cdot \sqrt{\frac{(1-r^2) \left( x_5 - \frac{x_2^2}{p} \right)}{p-1}}$$

D'où :

$$e(\bar{V}) = \pm \frac{2}{\sqrt{p}} \sqrt{\frac{(1-r^2) (p \cdot x_5 - x_2^2)}{p \cdot (p-1)}}$$

L'erreur en pourcentage est exprimée par :

$$\boxed{e(V) = e(\bar{V})\% = \pm \frac{e(\bar{V})}{\bar{V}} \cdot 100} \quad 3.28)$$

Durant l'estimation du volume  $\bar{V}$ , en appliquant le tarif, nous avons :

$$(100 - |e(V)|)\%$$

De chances que l'erreur que nous commettons ne dépasse pas  $\pm e(V)\%$ .

#### III.4.2.7 Etablissement du tarif à deux entrées

Le tarif à deux entrées est constitué d'une variable expliquée et aussi d'une variable explicative comme celle du tarif à une entrée. Ce qui nous amène encore à choisir le modèle de HUMMEL-ABADIE caractérisée par :

$$V = a + b \cdot d^2 \cdot h \quad (3.29)$$

Où :

$V = Y$  : volume en  $m^3$

$d^2 h = X$  : produit du carré du DHP [ $m^2$ ] et de la hauteur totale [m]

#### III.4.3. Estimation du volume sur pied à l'aide de l'inventaire par échantillonnage

L'inventaire terminé, les résultats obtenus sont consignés dans le tableau III.5 et on détermine le volume  $V$  à partir du tarif de cubage.

**Tableau III.5 : Fiche d'inventaire pour le volume**

$\varnothing$ [cm]	$V_{ae}$ [m <sup>3</sup> ]	$N_{ae}$	$V_{de}$ [m <sup>3</sup> ]
0.4	0.66	10	6.6
0.24	0.2419	25	6.0475
0.13	0.043	40	1.72

Connaissant les paramètres **a** et **b**, on peut déterminer le volume  $V_{ae}$  de chaque arbre à partir du tarif pour chaque diamètre :

$$V_{ae} = a + b.d^2$$

Le volume de tous les arbres de même espèce est donné par :

$$V_{de} = N_{ae} \cdot V_{ae}$$

Où :

$V_{de}$  : le volume de tous les arbres de même diamètre

$N_{ae}$  : le nombre des arbres de même diamètre

$V_{ae}$  : le volume d'une unité de diamètre considéré

Le volume de tous les différents diamètres se traduit comme suit :

$$V = \sum_{i=1}^p V_{dei}$$

Où p est le nombre d'arbres mesurés

Le volume total  $V_{Tot}$  de la surface totale à inventorier (surface totale de la forêt à inventorier) avec le taux de sondage  $T_e$  est tel que :

$$V_{Tote} = \frac{V}{T_e} \cdot 100 \quad (3.30)$$

Pour le fiche d'inventaire ci-dessus, avec un taux d'échantillonnage fixé à 5%, nous obtenons un volume total de 287.35 m<sup>3</sup> sur toute la surface à inventorier.

#### III.4.4. Estimation du volume sur pied à l'aide de l'inventaire intégral

Les dimensions utiles sont obtenues à l'aide de mesures in situ et doivent être mises sous forme de tableau (voir tableau III.6) :

**Tableau III.6 : Fiche d'inventaire intégral pour le volume**

Ø [cm]	V <sub>ap</sub> [m <sup>3</sup> ]	N <sub>ap</sub>	V <sub>dp</sub> [m <sup>3</sup> ]
0.4	0.66	10	6.6
0.24	0.2419	25	6.0475
0.13	0.043	40	1.72

Le volume unitaire de chaque arbre de diamètre d est donné par le tarif :

$$V_{ap} = a + b \cdot d^2$$

Le volume de tous les arbres de même diamètre s'exprime par :

$$V_{dp} = V_{ap} \cdot N_{ap}$$

Quant au volume total de toute la surface à inventorier, il est déduit de la formule :

$$V_{Totp} = \sum_{i=1}^p V_{dpi} \quad (3.31)$$

Avec :

$V_{Totp}$  : le volume total de la surface à inventorier

$V_{dp}$  : le volume total de tous les arbres de même diamètre

$p$  : le nombre d'arbres mesurés (nombre total de pieds)

Pour le même exemple, mais par la méthode d'inventaire pied par pied, le volume total sur toute la surface est de 14.3675 m<sup>3</sup>.

### III.5. Evaluation énergétique des pins et eucalyptus [29]

#### III.5.1. L'eucalyptus et le pin

L'eucalyptus et le pin font partie des essences malgaches qui sont susceptibles d'être carbonisées. Le tableau III.7 montre les données les concernant.

Tableau III.7 : Pin et eucalyptus

		L'eucalyptus	Le pin
Classification botanique	Embranchement	Spermaphytes	Spermaphytes
	Sous-embranchement	Angiospermes	Gymnospermes
	Classe	Dicotylédones	Conifèropsida
	Sous-classe	Rosidae	-
	Ordre	Myrtales	Coniférales
	Famille	Myrtacée	Pinacéa
	Genre	Eucalyptus	Pinus
	espèce	Au moins 254 espèces	40 espèces
Superficie cultivée		120.000 Ha	Au moins 150.000 Ha
Quantité de biomasse		250 à 300 m <sup>3</sup> /Ha (12 ans)	200 m <sup>3</sup> /Ha (15 ans)
Utilisations actuelles		Bois d'œuvre, charbon de bois, combustible, plantes médicinales	Industrie papetière, bois d'œuvre, bois de chauffe, charbon de bois

### III.5.2. Le pouvoir calorifique

Le pouvoir calorifique supérieur P et le pouvoir calorifique inférieur I sont définis dans le paragraphe **I.6.1.1.4**.

Le principe de détermination du pouvoir calorifique supérieur se déroule comme suit :

- Une prise d'essai de masse déterminée est brûlée dans des conditions normalisées en présence d'oxygène dans une bombe calorimétrique.
- Le pouvoir calorifique P déterminé dans ces conditions, c'est-à-dire à volume constant, se calcule à partir de l'élévation de la température constatée, compte tenu des réactions chimiques secondaires et, éventuellement, des pertes thermiques. Pour des combustibles solides, ce pouvoir calorifique à volume constant ne diffère pas du pouvoir calorifique à pression constante.

P est donné par la formule suivante :

$$P = P_{cs} = \frac{E.(T_f - T_i) - (a + b)}{m} \quad (3.32)$$

Avec :

$E$  : l'équivalent en eau, en microthermies par degré C, de l'ensemble formé par la bombe, le sceau calorimétrique muni de son agitateur, et de son chauffage.

$T_f - T_i$  : la différence des températures finale et initiales en degrés C.

$a$  : la correction due à la formation d'acides exprimées en microthermies.

$b$  : la correction due aux chaleurs parasites de la combustion (fil d'allumage, enveloppe en papier, combustible auxiliaire) exprimées en microthermies.

$m$  : la masse de l'échantillon en grammes

La valeur de l'équivalent en eau  $E$  varie selon la bombe calorimétrique utilisée.

#### III.5.2.1. Correction de formation d'acide « a » :

S'il y a formation d'acide nitrique, la valeur de  $a$  est de 0,23 microthermie par milligramme. En cas d'acide sulfurique, elle est de 0,73.

Dans notre cas, on est en présence des combustibles solides industriels, l'acide sulfurique domine et la valeur de  $a$  est de 3 microthermies par  $\text{cm}^3$ .

#### III.5.2.2. Correction des chaleurs parasites « b » :

Pour des celluloses comme fil de coton ou papier à cigarettes ou cartouches, le paramètre  $b$  est compté à raison de 3,8 microthermies par milligramme. Pour les fils de fer brûlés, la valeur de  $b$  est de 1,6. Pour la naphthaline comme combustible auxiliaire,  $b$  est égal à 9,69.

#### III.5.3. Evaluation énergétique

Le pouvoir calorifique  $P$  [Kcal/Kg] connu, la valeur du pouvoir calorifique  $I$  [Kcal/Kg] est obtenue à l'aide de la formule :

$$I = P - 5400.H_0 \quad (3.33)$$

Où :

$H_0$  : le pourcentage en hydrogène

Approximativement, les hydrogènes sont supposés tous combinés à l'oxygène dans l'eau et il vient :

$$H_0 = \frac{2}{18} \cdot \text{taux d'humidité}$$

Les pouvoirs calorifiques P et I sont données par le tableau III.8.

**Tableau III.8 : Pouvoirs calorifiques**

	<b>Eucalyptus</b>	<b>Pin</b>
P [Kcal/Kg]	8116	8292
I[Kcal/Kg]	8078	8250

Quant au taux d'humidité, il est donné dans le III.9.

**Tableau III.9 : Taux d'humidité**

	<b>Eucalyptus</b>	<b>Pin</b>
<b>Taux d'humidité [%]</b>	6,23	6,99

Pour la densité des espèces, elle est présentée dans le tableau III.10.

**Tableau III.10 : Densités des espèces**

	<b>Eucalyptus</b>	<b>Pin</b>
<b>Densité [Kg/m<sup>3</sup>]</b>	350	270

La quantité potentielle de chaleur de chaque espèce est donnée par :

$$Q = I.V.d \quad (3.34)$$

Où :

$Q$  : la quantité de chaleur en Kcal

$I$  : le pouvoir calorifique inférieur en Kcal/Kg

$d$  : la densité de chaque espèce en Kg/m<sup>3</sup>

$V$  : le volume en m<sup>3</sup>

### III.6. Discussion sur les méthodes d'inventaires utilisées

Chaque méthode utilisée possède ses avantages et inconvénients pour l'estimation de la biomasse forestière.

### III.6.1. La méthode d'inventaire intégral

La méthode d'inventaire intégral ou pied par pied donne des résultats précis pour toutes les espèces présentes dans la surface à inventorier. Elle convient très bien pour les surfaces de petite taille.

Par contre, elle ne convient pas pour les grandes surfaces, fautes de moyens et surtout de temps pour la réalisation des différentes mesures dendrométriques à l'exemple du DHP ou de la hauteur totale nécessaire pour le calcul.

### III.6.2. La méthode d'inventaire par échantillonnage

D'une part, la méthode d'inventaire par échantillonnage permet d'obtenir des résultats moins précis que ceux de la méthode pied par pied donc plus ou moins fiables pour l'estimation des potentialités de la biomasse forestière.

D'autre part, elle permet de gagner beaucoup de temps à cause de l'existence des placettes d'inventaire et limite ainsi le coût du projet.

### III.6.3. Le tarif de cubage

La mise en place du tarif de cubage à une entrée ou à deux entrées améliore l'estimation à l'aide de ces deux méthodes.

Il permet aussi de déterminer la liaison entre la variable expliquée et les variables explicatives à l'aide du coefficient de corrélation et l'estimation d'une éventuelle erreur survenue durant le calcul.

## III.7. Matlab 6.5

Pour mettre au point toutes les codes de calcul, permettant l'évaluation des potentialités énergétiques des biomasses forestières à l'exemple des pins et des eucalyptus, nous avons opté pour l'utilisation du logiciel MATLAB 6.5.

MATLAB ou MATrix LABoratory est une langage de programmation comme C et Fortran. Il est un langage performant pour informatique technique. MATLAB fournit beaucoup de fonctions pour exécuter des opérations mathématiques et aussi l'analyse des données.

En MATLAB, toutes les données sont considérées comme une matrice. Les codes de calculs sont construits et exécuter dans M-files. Il intègre les calculs, facilite la visualisation et permet une programmation avec utilisation facile dans un environnement où problèmes et solutions sont exprimés à l'aide des notations familières

Les codes de calculs pour les estimations sont en annexes.

### III.8. Application des méthodes

Considérons des données sur une fiche d'inventaire contenant des mesures dendrométriques. Les données se présentent sous forme de tableau :

**Tableau III.11 : Applications pour code de calcul**

Types d'arbres	DHP [m]	a [m]	b [m]	b' [m]
ad	0.65	20	-	-
ac	0.89	20	4	-
atc	0.78	20	4	2.5

Pour l'arbre droit (ad), on a  $L_1 = -1,2$  ;  $L_2 = 1,9$  ;  $L_3 = 3,6$ .

Pour l'arbre courbé (ac), on a  $L_1 = 0$  ;  $L_2 = 2,5$  ;  $L_3 = 4,56$ .

Pour l'arbre droit (ad), on a  $L_2 = 3,6$  ;  $L_3 = 5,2$  ;  $L_4 = 6,8$ .

Après, on choisit q types de diamètres différents. Dans notre cas, nous avons choisi q= 4 et n représente le nombre d'arbres pour ce diamètre choisi.

**Tableau III.12 : Valeurs des diamètres et nombres d'arbres**

DHP	0,3	0,6	0,85	1,1
n	100	86	30	8

Les résultats des calculs sont donnés par le tableau ci-dessous. Le tarif de cubage déterminé est :

$$V = -2,2204 + 0.4162d^2$$

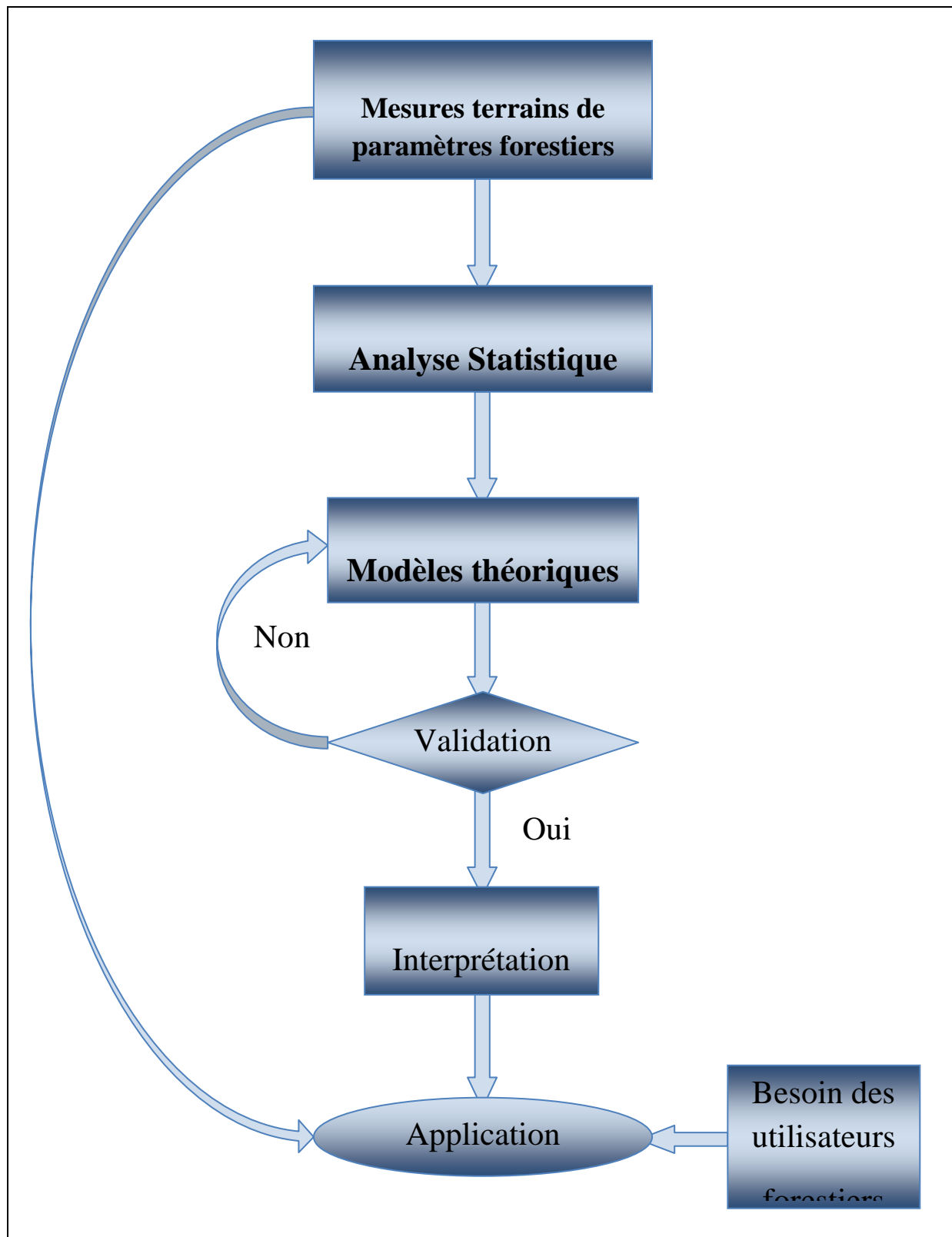
**Tableau III.13 : Valeurs des diamètres et nombres d'arbres**

Méthodes utilisés	Te	Quantité de chaleur produite [Kcal]	
		Pin	Eucalyptus
Tarif de cubage à double entrée (intégral)	-	$2.2091 \cdot 10^6$	$2.8040 \cdot 10^6$
Tarif de cubage à double entrée (échantillonnage)	0.9 %	$2.4546 \cdot 10^8$	$3.1155 \cdot 10^8$
Tarif de cubage à double entrée (échantillonnage)	5 %	$5.6079 \cdot 10^7$	$4.4182 \cdot 10^7$
Tarif de cubage à double entrée (échantillonnage)	80 %	$2.7614 \cdot 10^6$	$3.5049 \cdot 10^6$
Tarif de cubage à une entrée (intégral)	-	$1.7116 \cdot 10^7$	$2.1725 \cdot 10^7$
Tarif de cubage à une entrée (échantillonnage)	20 %	$0.8558 \cdot 10^8$	$1.0862 \cdot 10^8$
Tarif de cubage à une entrée (échantillonnage)	95 %	$1.7411 \cdot 10^7$	$2.2868 \cdot 10^7$
Bitterlich (intégral)	-	$1.373 \cdot 10^7$	$1.2371 \cdot 10^7$

Ces résultats nous donnent la quantité de chaleur dégagée par un pin ou un eucalyptus lors d'une combustion.

Nous n'avons pas utilisé la méthode d'inventaire par échantillonnage pour la détermination du volume sur pied (Méthode de BITTERLICH) car elle demande des précisions venant des données sur terrain. On constate aussi que le volume varie en fonction de taux d'échantillonnage introduit lorsqu'on utilise la méthode d'inventaire par échantillonnage. Lorsque Te tend vers 1, le volume obtenu par la méthode d'inventaire par échantillonnage est sensiblement égal à celui obtenu par échantillonnage.

D'une part, la détermination avec précision de Te est nécessaire pour obtenir des résultats fiables pour la méthode par échantillonnage. D'autre part, la méthode d'inventaire pied par pied reste la méthode la plus sûre mais demande des moyens considérables pour sa réalisation.



**Fig III.6 :** Schéma représentant la méthodologie adoptée dans cette mémoire

## CONCLUSION

Le bois et le charbon de bois restent la principale source d'énergie dans la plupart des pays en voie de développement. Ceci est dû à la demande en énergie qui ne cesse de croître en raison de l'accroissement démographique et aussi le renchérissement des autres sources d'énergie.

Un déboisement trop rapide, souvent sans souci de renouvellement des espèces coupées, est l'une des conséquences néfastes de nos jours et en plus de cela les feux de brousses et les tavy.

D'où la nécessité de l'estimation et l'évaluation des potentialités énergétiques de la biomasse forestière pour assurer sa gestion et pour compenser si besoin est la demande de la population.

L'une des outils les plus efficaces avant d'entamer l'évaluation est la reconnaissance des sites à évaluer à l'aide de la télédétection suivi des descentes sur terrain pour les données pour le code de calcul.

Même si la méthode d'inventaire pied par pied est la plus précise mais demande aussi énormément de temps pour la descente sur terrain, la méthode par échantillonnage associé au tarif de cubage, ainsi que la méthode de BITTERLICH permettent d'obtenir des résultats plus ou moins satisfaisants pour certaine prise de décision.

La méthode qui conviendrait le mieux pour l'inventaire de la biomasse forestière est celle de l'inventaire pied par pied. Pour la méthode d'inventaire par sondage, il faut bien déterminer le taux d'échantillonnage pour obtenir des résultats fiables.

Donc pour aboutir à un inventaire plus ou moins fiable, il nous faut choisir la bonne méthode selon le site à étudier.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] \_ [http://www.thermya.com/index\\_thermya.php?id=20](http://www.thermya.com/index_thermya.php?id=20)
- [2] \_ RASOANANDRASANA Emilienne, Contribution à l'étude des déchets domestiques et industriels de Mahajanga : Application à la gestion et méthanisation simultanés des effluents de distillerie de l'industrie sucrière et d'abattoir, Thèse, Antananarivo, Septembre 2006, 183 pages.
- [3] \_ F.E. Robertson/Traduit par Ph. Cavois, Biocombustibles : Biosphère, Biomasse, Bioconversion, Biocombustibles
- [4] \_ <http://www.leguieduchauffage.com/biomase.html>
- [5] \_ [http://www.gdle.net/fr/124\\_ecologie\\_biomasse\\_naturel\\_cheminee.html](http://www.gdle.net/fr/124_ecologie_biomasse_naturel_cheminee.html)
- [6] \_ [http://www.thermya.com/index\\_thermya.php?id=37](http://www.thermya.com/index_thermya.php?id=37)
- [7] \_ RATSIMBAZAFY Hoby, Contribution à l'étude du fonctionnement d'un moteur à huile de Jatropha dans le cadre de la protection de l'environnement, Mémoire d'Ingénieur, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo, ESPA, Juin 2007.
- [8] \_ G.R.E.T., Biomasse : Comparaison des valorisations des sous produits agricoles, Collection TECHNOLOGIES ET DEVELOPPEMENT
- [9] \_ Cours de combustion 3<sup>e</sup> année de Génie Chimique, Année 2006
- [10] \_ <http://www.eco2initiative.com/energie-biomasse.html>
- [11] \_ <http://www.bioetlogic.com/bio/article>
- [12] \_ <http://www.ac-creteil.fr/svt/scexp/lev.htm>
- [13] \_ Frédéric FLORICOURT, Modélisation des processus biochimiques et physiques d'une alvéole de Centre d'Enfouissement Technique Valorisation du biogaz, Mémoire de D.E.A., Université de la Réunion, Septembre 2001, 119 pages.
- [14] \_ Stéphane SINACOUTY, Etude du séchage thermique et de la méthanisation des boues des stations d'épuration, Mémoire de D.E.A., Université de la Réunion, Septembre 2001, 147 pages.
- [15] \_ Philippe SPEYER/ARES, Le biogaz à la ferme aux U.S.A
- [16] \_ Onja Tiana RAHARIJAONA, Contribution à l'étude technico-économique comparative de deux modèles de biodigesteurs : cloche-flottante et plug-flow. Cas de fermes de vaches laitières, Mémoire de D.E.A, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo, ESPA, 2007, 94 pages.
- [17] \_ Nirintsoa Françoise RASELISON, Contribution à l'étude technico-économique comparative de modèles de biodigesteurs : plug-flow et cloche-flottante. Cas de fermes de poules pondeuses, Mémoire de D.E.A, 2007, Mémoire d'Ingénieur, Université d'Antananarivo, ESPA, 70 pages.

- [18] \_ Harimbinintsoa RAVAOMIALITIANA et Nirina RAKOTONDRAMONJA, Contribution à l'étude contrôlée de la fermentation du litchi, Mémoire d'Ingéniorat, Université d'Antananarivo, ESPA, 1987.
- [19] \_ Norosoa RAZAFIMAMONJY, Inventaire des ressources forestières de Tampolo en vue de son exploitation et comparaison avec l'analyse sylvicole, Mémoire de fin d'étude, Université d'Antananarivo, ESSA, 1995.
- [20] \_ Lydie RAHARIMANIRAKA, La statistique et l'informatique au service d'un massif forestier, Mémoire de fin d'étude, Université d'Antananarivo, ESSA.
- [21] \_ Haribenja ANDRIANTSOAVINA, Inventaire et étude de l'aménagement de la forêt de Saint André II, Mémoire de fin d'étude, Université d'Antananarivo, ESSA, 1982.
- [22] \_ RAKOTONDRA SOA L.O., Contribution à l'établissement de l'état des lieux des parcelles détachées du parc national Masoala et de leur forêt littorales environnantes pour l'amélioration de leur protection, Mémoire de fin d'étude, Université d'Antananarivo, ESSA, 2007.
- [23] \_ DOKOLAHY R. J., Etude de la régénération naturelle du savoka du Pont forestier d'Ambatolaidama du Parc National Masoala en vue d'une restauration forestière, Mémoire de DEA, Université d'Antananarivo, ESSA, 2004, 80 pages
- [24] \_ ANDRIANJAKA, Anatomie de bois de diverses espèces de la forêt secondaire, Mémoire de fin d'étude, Université d'Antananarivo, ESSA, 1990
- [25] \_ RAZAFINDRIANILANA, Cours inédit d'inventaire forestier, 4<sup>e</sup> année, Université d'Antananarivo, ESSA.
- [26] \_ RAZAKAMANARINA Harivony, Contribution à l'étude dendrométrique de l'Acacia Galpini, Mémoire de fin d'étude, Université d'Antananarivo, ESSA, 1998.
- [27] \_ MINISTERE DE LA COOPERATION ET DU DEVELOPPEMENT, N°15
- [28] \_ RAZAFINDRAMANGA Minoniaina, Esquisse de carte forestière en vue d'exploitation par interprétation visuelle des prises de vues satellitaires : Cas de la forêt de Kirindy- Morondava, Mémoire de DEA, Université d'Antananarivo, ESSA, 1990.
- [29] \_ RAKOTOMANGA Yves Florent, Etude des principales caractéristiques physico-chimiques des charbons de bois malgaches. Processus de transformation et perspectives d'utilisation industrielle, Mémoire de DEA, Université d'Antananarivo, ESPA, 1986.

# Annexes

```

% METHODE DE BITTERLICH (ECHANTILLONNAGE)
function varargout=evaluation_par_echantillonnage_simple(varargin)
% Surface totale à inventorier (Stot de l'espèce)
Stot = input('Stot = ');
% Fixer le taux d'échantillonnage Te
Te = input('Te = ');
Spla = Stot * Te;
% Si on est en présence d'une pente d'angle alpha en radian
alpha = input('alpha = ');
% La surface réelle de chaque placette
r='rectangulaire';
c='circulaire';
methode = input('methode = ');
switch methode
    case 'rectangulaire'
        L=input('L=');
        l=input('l=');
        Sp=L*l*cos(alpha);
    case 'circulaire'
        R = input('R = ');
        Sp = pi * R^2 * cos(alpha);
    otherwise
        disp('Vous avez tapé une lettre autre que r et c')
end
% La surface réelle de chaque placette doit être inférieur ou égale à
% Spla
if Sp >= Spla
    disp('La surface réelle de chaque placette doit être inférieur ou égale à Spla')
else
    % Le nombre de placettes de mesure
    N1 = Stot/Sp
    % entrez le nombre réel de placette de mesure
    N=input('N = ');
    %ESTIMATION DU VOLUME SUR PIED
    % Détermination de la hauteur moyenne des arbres dans une placette
    % N est le nombre totale de placettes
    m = input('m = ');
    % Abondance
    A = m/Sp;
    for j = 1:N
        % m est le nombre d'arbre dans une placette
        for i = 1:m
            ad = 'arbre_droit';
            ac = 'arbre_courbé';
            atc = 'arbre_très_courbé';
            safidy = input('safidy = ');
            % tan(alpha1)=x,tan(alpha2)=y,tan(alpha3)=z,tan(alpha4)=x1,tan(alpha5)=x2,
            % tan(alpha6)=x3,tan(alpha7)=x4,tan(alpha8)=x5
            switch safidy
                case 'arbre_droit'
                    a = input('a = ');L1 = input('L1 = ');L2 = input('L2 = ');L3 = input('L3 = ');
                    x = L1/a ; y = L2/a ; z = L3/a ;
                    hf(i,j) = a * (abs(x)+abs(y));
                    hT(i,j) = a * (abs(x)+abs(z));
                case 'arbre_courbé'
                    a = input('a = ');b = input('b = ');L2 = input('L2 = ');L3 = input('L3 = ');
                    x1= L2/a;x2= L3/a;
                    hf(i,j) = a * x1;
                    hT(i,j) = a * x1 + sqrt(b^2+(a^2*(x2-x1)^2));
                case 'arbre_très_courbé'

```

```

a = input ('a = ');b = input ('b = ');bpri = input ('bpri = ');L2 = input('L2 =');L3 = input('L3
=');L4 = input('L4 =');
x3 = L2/a;x4 = L3/a;x5 = L4/a;
hf(i,j) = a * x3;
hT(i,j) = a * x3 + sqrt(b^2+(a^2*(x4-x3)^2))+sqrt(bpri^2+(a^2*(x5-x4)^2));
otherwise
end
t = 'tsotra';
mi = 'misampana';
safidy_betha = input ('safidy_betha = ');
switch safidy_betha
case 'tsotra'
    dmoy(i,j) = input ('dmoy = ');
case 'misampana'
    df1 = input ('df1 = ');
    df2 = input ('df2 = ');
    dmoy(i,j) = (df1+df2)/2;
otherwise
end
if hf < 1.5
    disp('Entrer la valeur de Betha :')
    betha(i,j) = input('betha = ');
else
    % DHP : diamètre à 1m30 du sol
    DHP(i,j) = input ('DHP = ');
    betha(i,j) = ((dmoy(i,j))^2)/(DHP(i,j)^2);
end
diam = 'diamètre';
cir = 'circonférence';
safidy_terriere = input ('safidy_terriere = ');
switch safidy_terriere
case 'diamètre'
    g(i,j) = (pi*(DHP(i,j)^2))/4;
    gm(:,j)= sum(g(:,j))/m;
case 'circonférence'
    Cm(i,j)=pi*DHP(i,j);
    Cmoy(:,j)=sum(Cm(:,j))/m;
    Gm(:,j)=((Cmoy(:,j))^2)/(4*pi);
    gm(:,j)=A/Gm(:,j);
otherwise
end
end
end
%-----
% hfmoy est la hauteur moyenne des fut par placettes
for j=1:N
    hfm(:,j) = sum(hf(:,j));
    hfmoy(:,j)=hfm(:,j)/m;
end
% Hfmoy est la hauteur totale des futs dans une placette
Hfmoy = sum(hfmoy)/N;
% hTmoy est la hauteur moyenne des arbres dans chaque placette
for j=1:N
    hTm(:,j) = sum(hT(:,j));
    hTmoy(:,j)=hTm(:,j)/m;
end
Hmoy = sum(hTmoy)/N;
%-----
% Calcul du coefficient de forme moyen Fmoy
% calcul de betham
for j=1:N

```

```

    betham(:,j) = sum (betha(:,j));
    bethamoy(:,j)=betham(:,j)/m;
end
Fmoy=sum(bethamoy')/N;
%-----
% Calcul de la surface terrière Gmoy
Gmoy=sum(gm')/N;
%-----
% Calcul du volume par la méthode pied par pied
Vp = Gmoy*Fmoy*Hmoy;
% Le volume total pour toute la surface à inventorier
V = Vp * Stot
% Determination de la masse de tous les arbres et des quantités de chaleur
% évalués
p = 'pin';
e = 'eucalyptus';
inona_ny_hazo = input ('inona_ny_hazo = ');
switch inona_ny_hazo
    case 'pin'
        denp = 270; % densité en Kg/m3
        Ip=8250; % Pouvoir calorifique inférieur
        Mp=denp*V; % Masse
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qp=Ip*Mp % Quantité de chaleur
    case 'eucalyptus'
        dene = 350;
        Ie=8078;
        Me=dene*V;
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qe=Ie*Me
    otherwise
end
end
end

```

```

% Tarif de cubage à simple entrée 1
function varargout = tarif_de_cubage_simple_1 (varargin)
% Etablissement du tarif de cubage donné par  $V = a + b \cdot (d^2)(Y = a + b \cdot X)$ 
%  $Y = V$  : Volume
%  $X$  = le carré du diamètre à 1m30 (DHP)
% -----
N = input('N = ');
% Calcul de somme(X)
char('Entrer le(s) valeur(s) des diamètres à 1m30 du sol : ')
for i=1:N
    DHP(i,:) = input('DHP = ');
    X(i,:) = (DHP(i,:))^2;
    X_au_2(i,:) = (X(i,:))^2;
end
somme_de_X = sum(X);
Xmoy = somme_de_X/N;
somme_de_X_au_2 = sum(X_au_2);
somme_de_X_letout_2 = (somme_de_X)^2;
somme_de_X_letout_2_sur_N = somme_de_X_letout_2/N;
for j=1:N
    x(j,:) = X(j,:)- Xmoy;
    format long
    x_au_2(j,:) = (x(j,:))^2;
end
somme_de_x_au_2 = sum (x_au_2);
% Calcul de somme(Y)
char('Entrer les caracteristiques de chaque arbre pour le calcul de volume :')
for i=1:N
    betha=0.53;
    [hf,hT]=hauteur;
    % Le volume par la methode de Dawkins
    Y(i,:)=(pi/4)*betha*hT*(DHP(i,:))^2
    Y_au_2(i,:) = (Y(i,:))^2;
end
somme_de_Y = sum(Y);
Ymoy = somme_de_Y/N;
somme_de_Y_au_2 = sum(Y_au_2);
somme_de_Y_letout_2 = (somme_de_Y)^2;
somme_de_Y_letout_2_sur_N = somme_de_Y_letout_2/N;
for j=1:N
    y(j,:) = Y(j,:)- Ymoy;
    format long
    y_au_2(j,:) = (y(j,:))^2;
end
somme_de_y_au_2 = sum (y_au_2);
for k=1:N
    XY(k,:) = X(k,:) * Y(k,:);
end
somme_de_XY = sum(XY);
somme_de_X_fois_somme_de_Y_sur_N = somme_de_X * somme_de_Y / N;
for m=1:N
    xy(m,:) = x(m,:) * y(m,:);
end
somme_de_xy = sum(xy);
% Calcul de b (coefficient de regression)
char('La valeur du coefficient de regression de Y en X est de : ')
b = somme_de_xy / somme_de_x_au_2
% Calcul de a
a = Ymoy - (b * Xmoy)
% Calcul de dxy
for n=1:N

```

```

    dxy(n,:) = y(n,:)-(b*x(n,:));
    dxy_2(n,:) = (dxy(n,:))^2;
end
somme_de_dxy_2 = sum(dxy_2);
% La somme des carrés des écarts à la droite de régression :
syx_2 = somme_de_dxy_2 / (N-2);
% L'écart type observé du coefficient de régression
sb = sqrt(syx_2)/sqrt(somme_de_x_au_2);
% Le coefficient de corrélation
r = somme_de_xy / (sqrt(somme_de_x_au_2 * somme_de_y_au_2))
tb = b/sb;
% Calcul du volume à l'aide du tarif
% q est le nombre des arbres de différent diamètre
q = input('q = ');
for j = 1:q
    % Le diamètre
    diam = input('diam = ');
    % Le nombre des arbres ayant une meme diamètre
    nom = input('nom = ');
    % Le volume à partir du tarif de cubage
    Vt(j,:) = a + (b*(diam^2));
end
% La somme des volumes
Vs = sum(Vt);
int = 'integral';
ech = 'echantillonnage';
methode = input('methode = ');
switch (methode)
    case 'integral'
        % Le volume total est donné par
        V = Vs;
    case 'echantillonnage'
        % Le volume total est donné par
        char('Entrer le taux d"échantillonnage Te :')
        Te = input('Te = ');
        V = (100*Vs)/Te
    otherwise
end
% Determination de la masse de tous les arbres et des quantités de chaleur
% évalués
p = 'pin';
e = 'eucalyptus';
inona_ny_hazo = input ('inona_ny_hazo = ');
switch inona_ny_hazo
    case 'pin'
        denp = 270; % densité en Kg/m3
        Ip=8250; % Pouvoir calorifique inférieur
        Mp=denp*V; % Masse
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qp=Ip*Mp % Quantité de chaleur
    case 'eucalyptus'
        dene = 350;
        Ie=8078;
        Me=dene*V;
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qe=Ie*Me
    otherwise
end
end

```

```

% Tarif de cubage à double entrée 2
function varargout = tarif_de_cubage_double_2(varargin)
% Etablissement du tarif de cubage donné par  $V = a + b \cdot ((d^2)(hT))$  ( $Y = a + b \cdot X$ )
%  $Y = V$  : Volume
%  $X$  = le produit du carré du diamètre à 1m30 (DHP) avec la hauteur totale hT
% -----
N = input('N = ');
% Calcul de somme(X)
char('Entrer le(s) valeur(s) des diamètres à 1m30 du sol : ')
for i=1:N
    DHP(i,:) = input('DHP = ');
    [hf,hT]=hauteur;
    X(i,:) = (DHP(i,:)^2)*hT;
    X_au_2(i,:)= (X(i,:)^2);
    betha=0.53;
    % Le volume par la methode de Dawkins
    Y(i,:)=(pi/4)*betha*hT*(DHP(i,:)^2)
    Y_au_2(i,:)= (Y(i,:)^2);
end
somme_de_X = sum(X);
somme_de_X_au_2 = sum(X_au_2);
% Calcul de somme(Y)
somme_de_Y = sum(Y);
somme_de_Y_au_2 = sum(Y_au_2);
for k=1:N
    XY(k,:) = X(k,:) * Y(k,:);
end
somme_de_XY = sum(XY);
% Détermination de a et de b à l'aide du système d'équation
% Détermination de delta
x1=somme_de_X; x2=somme_de_Y; x3=somme_de_X_au_2; x4=somme_de_XY;
x5=somme_de_Y_au_2;
delta = N * (x3) - (x1)^2;
deltaa = ((x2)*(x3)) - ((x4)*(x1));
deltab = (N*(x4)) - ((x1)*(x2));
a = deltaa/delta;
b = deltab/delta;
% Détermination de T
T = (x4)-(((x1)*(x2))/N);
% Détermination de R
R = (x3)-(((x1)^2)/N);
% Détermination de S
S = (x5)-(((x2)^2)/N);
% Détermination du coefficient de corrélation r
r = T / (sqrt(R*S))
% Le volume moyen
Vmoy = (x2)/N;
% Determination de l'erreur e
e=(2/sqrt(N))*(sqrt(((1-(r)^2)*((N*(x5))-((x2)^2))/(N*(N-1))))))
% Calcul du volume à l'aide du tarif
% q est le nombre des arbres de différent diamètre
q = input('q = ');
for j = 1:q
    % Le diamètre
    diam = input('diam =');
    % Le nombre des arbres ayant une meme diamètre
    nom = input('nom = ');
    % Le volume à partir du tarif de cubage
    Vt(j,:) = a + (b*(diam^2));
end
% La somme des volumes

```

```

Vs = sum(Vt);
int = 'integral';
ech = 'echantillonnage';
methode = input('methode = ');
switch (methode)
    case 'integral'
        % Le volume total est donné par
        V = Vs;
    case 'echantillonnage'
        % Le volume total est donné par
        char('Entrer le taux d"échantillonnage Te :')
        Te = input('Te = ');
        V = (100*Vs)/Te
    otherwise
end
% Determination de la masse de tous les arbres et des quantités de chaleur
% évalués
p = 'pin';
e = 'eucalyptus';
inona_ny_hazo = input ('inona_ny_hazo = ');
switch inona_ny_hazo
    case 'pin'
        denp = 270; % densité en Kg/m3
        Ip=8250; % Pouvoir calorifique inférieur
        Mp=denp*V; % Masse
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qp=Ip*Mp % Quantité de chaleur
    case 'eucalyptus'
        dene = 350;
        Ie=8078;
        Me=dene*V;
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qe=Ie*Me
    otherwise
end

```

```

function varargout = andrana_1(varargin)
% Tarif de cubage à simple entrée 1

% Etablissement du tarif de cubage donné par  $V = a + b \cdot (d^2)(Y = a + b \cdot X)$ 
% Y = V : Volume
% X = le carré du diamètre à 1m30 (DHP)
% -----
N = input('N = ');
% Calcul de somme(X)
char('Entrer le(s) valeur(s) des diamètres à 1m30 du sol : ')
for i=1:N
    DHP(i,:) = input('DHP = ');
    X(i,:) = (DHP(i,:))^2;
    X_au_2(i,:) = (X(i,:))^2;
end
somme_de_X = sum(X);
Xmoy = somme_de_X/N;
somme_de_X_au_2 = sum(X_au_2);
somme_de_X_letout_2 = (somme_de_X)^2;
somme_de_X_letout_2_sur_N = somme_de_X_letout_2/N;
for j=1:N
    x(j,:) = X(j,:)- Xmoy;
    format long
    x_au_2(j,:) = (x(j,:))^2;
end
somme_de_x_au_2 = sum (x_au_2);
% Calcul de somme(Y)
char('Entrer les caracteristiques de chaque arbre pour le calcul de volume :')
for i=1:N
    betha=0.53;

    % Le volume par la methode de Dawkins
    Y(i,:)=input('Y =');
    Y_au_2(i,:)= (Y(i,:))^2;
end
somme_de_Y = sum(Y);
Ymoy = somme_de_Y/N;
somme_de_Y_au_2 = sum(Y_au_2);
somme_de_Y_letout_2 = (somme_de_Y)^2;
somme_de_Y_letout_2_sur_N = somme_de_Y_letout_2/N;
for j=1:N
    y(j,:) = Y(j,:)- Ymoy;
    format long
    y_au_2(j,:) = (y(j,:))^2;
end
somme_de_y_au_2 = sum (y_au_2);
for k=1:N
    XY(k,:) = X(k,:) * Y(k,:);
end
somme_de_XY = sum(XY);
somme_de_X_fois_somme_de_Y_sur_N = somme_de_X * somme_de_Y / N;
for m=1:N
    xy(m,:) = x(m,:) * y(m,:);
end
somme_de_xy = sum(xy);
% Calcul de b (coefficient de regression)
char('La valeur du coefficient de regression de Y en X est de : ')
b = somme_de_xy / somme_de_x_au_2
% Calcul de a
a = Ymoy - (b * Xmoy)
% Calcul de dxy

```

```

for n=1:N
    dxy(n,:) = y(n,:)-(b*x(n,:));
    dxy_2(n,:) = (dxy(n,:))^2;
end
somme_de_dxy_2 = sum(dxy_2);
% La somme des carrés des écarts à la droite de régression :
syx_2 = somme_de_dxy_2 / (N-2);
% L'écart type observé du coefficient de régression
sb = sqrt(syx_2)/sqrt(somme_de_x_au_2);
% Le coefficient de corrélation
r = somme_de_xy / (sqrt(somme_de_x_au_2 * somme_de_y_au_2))
tb = b/sb;
% Calcul du volume à l'aide du tarif
% q est le nombre des arbres de différent diamètre
q = input('q = ');
for j = 1:q
    % Le diamètre
    diam = input('diam = ');
    % Le nombre des arbres ayant une meme diamètre
    nom = input('nom = ');
    % Le volume à partir du tarif de cubage
    Vt(j,:) = a + (b*(diam^2));
end
% La somme des volumes
Vs = sum(Vt);
int = 'integral';
ech = 'echantillonnage';
methode = input('methode = ');
switch (methode)
    case 'integral'
        % Le volume total est donné par
        V = Vs;
    case 'echantillonnage'
        % Le volume total est donné par
        char('Entrer le taux d"échantillonnage Te :')
        Te = input('Te = ');
        V = (100*Vs)/Te
    otherwise
end
% Determination de la masse de tous les arbres et des quantités de chaleur
% évalués
p = 'pin';
e = 'eucalyptus';
inona_ny_hazo = input ('inona_ny_hazo = ');
switch inona_ny_hazo
    case 'pin'
        denp = 270; % densité en Kg/m3
        Ip=8250; % Pouvoir calorifique inférieur
        Mp=denp*V; % Masse
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qp=Ip*Mp % Quantité de chaleur
    case 'eucalyptus'
        dene = 350;
        Ie=8078;
        Me=dene*V;
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qe=Ie*Me
    otherwise
end

```



```

function varargout = andrana_2 (varargin)
% Tarif de cubage à simple entrée 2
% Etablissement du tarif de cubage donné par  $V = a + b \cdot (d^2)(Y = a + b \cdot X)$ 
% Y = V : Volume
% X = le carré du diamètre à 1m30 (DHP)
% -----
N = input('N = ');
% Calcul de somme(X)
char('Entrer le(s) valeur(s) des diamètres à 1m30 du sol : ')
for i=1:N
    DHP(i,:) = input('DHP = ');
    X(i,:) = (DHP(i,:))^2;
    X_au_2(i,:)= (X(i,:))^2;
end
somme_de_X = sum(X);
somme_de_X_au_2 = sum(X_au_2);
% Calcul de somme(Y)
char('Entrer les caracteristiques de chaque arbre pour le calcul de volume :')
for i=1:N
    betha=0.53;

    % Le volume par la methode de Dawkins
    Y(i,:)=input('Y = ');
    Y_au_2(i,:)= (Y(i,:))^2;
end
somme_de_Y = sum(Y);
somme_de_Y_au_2 = sum(Y_au_2);
for k=1:N
    XY(k,:) = X(k,:) * Y(k,:);
end
somme_de_XY = sum(XY);
% Détermination de a et de b à l'aide du système d'équation
% Détermination de delta
x1=somme_de_X; x2=somme_de_Y; x3=somme_de_X_au_2; x4=somme_de_XY;
x5=somme_de_Y_au_2;
delta = N * (x3) - (x1)^2;
deltaa = ((x2)*(x3)) - ((x4)*(x1));
deltab = (N*(x4)) - ((x1)*(x2));
a = deltaa/delta
b = deltab/delta
% Détermination de T
T = (x4)-(((x1)*(x2))/N);
% Détermination de R
R = (x3)-(((x1)^2)/N);
% Détermination de S
S = (x5)-(((x2)^2)/N);
% Détermination du coefficient de corrélation r
r = T / (sqrt(R*S))
% Le volume moyen
Vmoy = (x2)/N;
% Determination de l'erreur e
e=(2/sqrt(N))*(sqrt(((1-(r^2))*((N*(x5))-((x2)^2))/(N*(N-1))))))
% Calcul du volume à l'aide du tarif
% q est le nombre des arbres de différent diamètre
q = input('q = ');
for j = 1:q
    % Le diamètre
    diam = input('diam =');
    % Le nombre des arbres ayant une meme diamètre
    nom = input('nom = ');
    % Le volume à partir du tarif de cubage

```

```

    Vt(j,:) = a + (b*(diam^2));
end
% La somme des volumes
Vs = sum(Vt);
int = 'integral';
ech = 'echantillonnage';
methode = input('methode = ');
switch (methode)
    case 'integral'
        % Le volume total est donné par
        V = Vs;
    case 'echantillonnage'
        % Le volume total est donné par
        char('Entrer le taux d"échantillonnage Te :')
        Te = input('Te = ');
        V = (100*Vs)/Te
    otherwise
end
% Determination de la masse de tous les arbres et des quantités de chaleur
% évalués
p = 'pin';
e = 'eucalyptus';
inona_ny_hazo = input ('inona_ny_hazo = ');
switch inona_ny_hazo
    case 'pin'
        denp = 270; % densité en Kg/m3
        Ip=8250; % Pouvoir calorifique inférieur
        Mp=denp*V; % Masse
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qp=Ip*Mp % Quantité de chaleur
    case 'eucalyptus'
        dene = 350;
        Ie=8078;
        Me=dene*V;
        char('La quantité de chaleur produite en Kcal pendant la combustion est de : ')
        format short
        Qe=Ie*Me
    otherwise
end
end

```

# **TITRE : Contribution à l'évaluation des potentialités énergétiques de la biomasse forestière.**

## **RESUME :**

La principale source d'énergie des Malagasy reste l'énergie d'origine végétale surtout celle de la biomasse forestière. C'est pour cela qu'il faut estimer et évaluer les potentialités énergétiques de la biomasse forestière pour mieux la gérer et l'exploiter.

Le chemin le plus court pour évaluer est la méthode d'inventaire par échantillonnage. La valeur du coefficient de corrélation permet de vérifier la relation entre les variables explicatives et la variable expliquée. Le choix du volume s'est porté sur Dawkins car nous nous situons en région tropicale. Le code de calcul sur MATLAB nous aide à déterminer la quantité de chaleur des espèces inventorier par la méthode soit par échantillonnage, soit intégrale.

La connaissance de ces potentialités entraîne une meilleure gestion des ressources nationales en biomasse.

**Mots-clés :** biomasse, pied par pied, échantillonnage, tarif de cubage, coefficient de corrélation, pouvoir calorifique, variable explicative, variable expliquée.

## **ABSTRACT :**

The main source of energy of Malagasy rest the energy of the vegetal origin especially the one of the forest biomass. It is for it that it is necessary to estimate and to value the energizing potentialities of the forest biomass to manage it better and to exploit it.

The path the more cost to value is the method of inventory by sampling, the value of the interrelationship coefficient permits to verify the relation between the explanatory variables and the variable explained. The choice of the volume carried itself on Dawkins because we are located in tropical region. But most reliable is the method of inventory foot by foot but asks considerable means on the other hand. The code of calculation on MATLAB helps us to determine the quantity of heat of the species to inventory by the method is by sampling, either foot by foot.

The knowledge of these potentialities entails a better management of the national resources in biomass.

**Keywords :** biomass, foot by foot, sampling, tariff of cubage, coefficient of interrelationship, calorific power, explanatory variable, variable explained.

## **Encadreur :**

Pr. RANDRIAMANANTANY Zely  
Arivelo  
Pr. RANAIVO-NOMENJANAHARY  
Flavien

## **Impétrant :**

ANDRIAMASIMAMPIANINA Andry Ny  
Aina  
Lot III O 21 A, Mananjara  
Antananarivo, 101  
andriamasimampianinaandry@gmail.com