

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
Faculté des Sciences Biologiques et sciences Agronomiques
Département d'agronomie

Mémoire



En vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Filière : Sciences agronomiques

Spécialité : sciences forestières

Thème

Contribution a l'élaboration d'un tarif de cubage de l'Eucalyptus dans la région d'Azeffoun de la wilaya de Tizi-Ouzou

Présenté par : Hablal Karim & RADi Idir

Devant le jury composé de :

Président :	Mr RABHI Khellaf.	Maitre de conférence « B » à U.M.M.T.O
Promoteur :	M ^r ASLA T.	Maitre assistant « A » à U.M.M.T.O
Examineur :	M ^r CHENOUNE K.	Maitre assistant « A » à U.M.M.T.O
Examineur :	M ^r ALILI N.	Maitre assistant « A » à U.M.M.T.O
Invite :	M ^r Ould Mohamed Y.	Conservateur des forêts de T.O

Promotion: 2017- 2018

Remerciement

Nous tenons à adresser nos profondes gratitudee à notre promoteur Monsieur
ASLA T Maitre
Assistant et chargé de cours à l'UMMTO pour son soutien et ses encouragements
durant tout notre travail, nous le remercierons très vivement pour les
connaissances que nous avons acquises tout au long de ce temps passé avec lui.
Avec gentillesse, il nous a permis de puiser de son expérience, de sa compétence et
de ses connaissances très variées, Pour ses conseils judicieux, sa disponibilité et sa
bonté, nous en seront que reconnaissant.

Nous exprimons toute notre reconnaissance à Monsieur RABHI KH Maitre de
conférence pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de ce mémoire.

Monsieur CHENOUNE K et Monsieur ALILI N maitres assistants chargés de
cours à l'UMMTO pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Nos remerciements vont également aux membres de la conservation des forêts de
Tizi-Ouzou, la Circonscription des forêts d'Azeffoun pour leurs accueils et leurs
aides durant la réalisation de ce travail.

Nous remercierons également tous les enseignants qui ont contribué à notre
formation universitaire dans la faculté des sciences biologiques et sciences
agronomiques de l'UMMTO.

A nos familles et tous ceux qui ont contribué à la réalisation de notre travail nos
remerciements.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes parents

A mes frères et mes sœurs

A Mon adorable nièce que j'adore.

A mes amis

Je vous souhaite ; santé, succès, bonheur et amour.

Idir

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes parents

A ma femme

A mes frères et ma sœur

A mes adorables neveux et nièces que j'adore.

A mes amis

Je vous souhaite ; santé, succès, bonheur et amour.

Karim

Liste des abréviations

DHP : Diamètre à la hauteur de la poitrine

DRS : Défense et restauration des sols

FAO : Food agriculture organization

AIC : Akaike information résiduel

H : Hauteur

D : Diamètre

V : Volume

Liste des figures

<u>Figure 1: Tendances de la superficie des forêts plantées, 1990-2010 (statistics from FAO, FRA 2010).....</u>	8
<u>Figure 2: Proportion de forêts plantées constituées d'espèces introduites (statistics from FAO, FRA 2010)</u>	9
<u>Figure 3: Représentation graphique du volume du bois fort de la tige (en dm^3) en fonction de la circonférence $c_{1,5}$ (en cm).....</u>	21
<u>Figure 4 : localisation géographique de la région d'étude dans la commune d'Azeffoun</u>	35
<u>Figure 5: Diagramme ombrothermique d'Azeffoun (2006-2016).....</u>	38
<u>Figure 6: Position de la région d'étude sur le climagramme d'Emberger</u>	39
<u>Figure 7: Histogramme de distribution des individus par classe de diamètres.....</u>	49
<u>Figure 8: Histogramme de structure du peuplement.....</u>	50
<u>Figure 9: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 11.</u>	53
<u>Figure 10: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 12.</u>	53
<u>Figure 11: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 13.</u>	54
<u>Figure 12: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 14.</u>	54
<u>Figure 13: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 15.</u>	55
<u>Figure 14: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 16.</u>	55
<u>Figure 15: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 17.</u>	56
<u>Figure 16: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 18</u>	56
<u>Figure 17: L'histogramme des résidus de la hauteur 11m.....</u>	59
<u>Figure 18: L'histogramme des résidus de la hauteur 12 m.....</u>	60
<u>Figure 19: L'histogramme des résidus de la hauteur 13 m.....</u>	60
<u>Figure 20: L'histogramme des résidus de la hauteur 14 m.....</u>	61
<u>Figure 21: L'histogramme des résidus de la hauteur 15 m.....</u>	61
<u>Figure 22: L'histogramme des résidus de la hauteur 16 m.....</u>	62
<u>Figure 23: L'histogramme des résidus de la hauteur 17 m.....</u>	62
<u>Figure 24: L'histogramme des résidus de la hauteur 18 m.....</u>	63

Liste des Photos

<u>Photo 1: Feuille d'Eucalyptus (Hablal et Radi, 2018)</u>	4
<u>Photo 2: Fleur d'Eucalyptus</u>	4
<u>Photo 3: les graines d'Eucalyptus (FJpower, 2015)</u>	5
<u>Photo 4: l'enracinement d'Eucalyptus (APCV de Lédenon, 2015)</u>	5
<u>Photo 5: coupage d'arbre en billons successifs</u>	41

Liste des tableaux

Tableau 1: Proportion de forêts plantées constituées d'espèces introduites (statistics from FAO, FRA 2010).....	10
Tableau 2: Tarif de cubage des chênes indigènes de taillis-sous-futaie (Ardennes françaises). Tiré de "Estimation et commerce des bois" (PONCELLE J., 1992).....	14
Tableau 3: Températures maximales et minimales de la région d'Azeffoun durant la période (2006-2016) après extrapolation (APC d'Azeffoun).....	36
Tableau 4: Précipitations moyennes mensuelles de région d'Azeffoun durant la période (2006-2016) après extrapolation.	37
Tableau 5 : Q2 d'Emberger calculé pour la région d'étude et l'étage bioclimatique correspondant	39
Tableau 6: Analyse descriptive de la hauteur, du diamètre et de volume.....	48
Tableau 7: Distribution des individus par classe de diamètres.	48
Tableau 8: Résultat du Test de Kolmogorov Smirnov.....	49
Tableau 9: Tableau des volumes réels et estimés.....	51
Tableau 10: Les modèles ajustés pour chaque catégorie d'hauteurs.....	52
Tableau 11: Tableau récapitulatif des tests arithmétiques.....	58

Sommaire

Remerciement	
Dédicaces	
Liste des abréviations	
Liste des figures	
Liste des photos	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur l'Eucalyptus	2
1. Généralités sur l'Eucalyptus	3
2. Description botanique.....	3
3. Classification.....	6
4. Caractéristiques écologiques et sylviculture	6
4.1. Ecologie.....	6
4.2. Sylviculture	7
5. Intérêt économique.....	8
6. L'Eucalyptus dans le monde	8
7. Les eucalyptus dans le bassin méditerranéen.....	9
8. Les reboisements d'Eucalyptus en Algérie	11
9. Le reboisement industriel d'Azeffoun.....	11
Chapitre II : Tarifs de cubage.....	13
1. Notions générales	14
2. Les différents types de tarif de cubage.....	15
2.1 Les tarifs nécessitant une seule mesure par arbre.....	15
2.2 Les tarifs nécessitant deux mesures par arbre	16
2.3 Les tarifs nécessitant plus de deux mesures par arbre	16
3. Construction d'un tarif de cubage.....	16
3.1. Récolte des données de base.....	17
3.2. Préparation des données	19
3.3. Construction proprement dite d'un tarif de cubage	20
3.4 Tarifs de cubage mathématiques	22
3.5. Critères de sélection du modèle.....	25
4. Choix des critères de sélection	27
5. Précision des tarifs de cubages	28
6. Détermination de la précision.....	29

Sommaire

7. Limites de validité d'un tarif de cubage.....	32
Chapitre III : Matériels et Méthodes	34
1. Présentation de la zone d'étude	35
1.1. Situation géographique et administrative	35
1.2. Structure oro topographique et géologique	35
1.3. Etude climatique de La région d'Azeffoun	36
2. Synthèse climatique de la région d'étude.....	37
2.1 Diagramme ombrothermique de Bagnouls & Gausсен	37
2.2. Détermination du bioclimat de la région d'étude	38
3. La végétation	39
4. Inventaire de peuplement et traitement des données	40
4.1. Inventaire du peuplement	40
4.2. L'inventaire dendrométrique	41
5. Traitement des données	42
5.1. Analyse des variables dendrométriques	42
6. Modélisation des tarifs de cubage	43
6.1. Ajustement des modèles	43
6.2. Qualité et précision des modèles	44
Chapitre IV : Résultats et discussions	46
1. Analyse descriptives des paramètres dendrométriques	47
2. Etude de la structure du peuplement	48
3. Etude de la normalité.....	49
4. Cubage des arbres abattus	50
4.1. Elaboration du tarif de cubage.....	50
5. Résultat de la modélisation.....	51
5.1. Ajustements des modèles	51
5.2. Les graphes de catégorie de Hauteur.....	53
6. Qualité et précision des ajustements.....	57
6.1. Tests statistiques.....	57
6.2. Test graphique (Analyse des résidus).....	58
Conclusion générale	63
Bibliographie	67

Introduction générale

Introduction générale

La forte demande en produits ligneux a exposé les forêts dans le monde à une exploitation sans cesse croissante. Cela a amené ces pays à planter des essences exotiques à croissance rapide.

L'Algérie par souci de couvrir les besoins en bois de tout genre et afin de promouvoir une industrie de panneaux de particules et de pâte à papier mis en œuvre de vastes projets de reboisement industriel dont celui d'Azeffoun étudié par la société espagnole « CALTELCHICA ».

L'objet de notre étude est d'établir un tarif de cubage suite à un inventaire réalisé dans le reboisement de Sidi Khelifa à Azeffoun.

Un tarif de cubage consiste en un outil d'estimation indirecte du volume d'un arbre à partir de paramètres dendrométriques plus faciles à mesurer tel que le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur, on le présente sous la forme d'un tableau, d'un graphe ou d'une équation (RONDOUX, 1993) il constitue l'étape préalable à l'élaboration des tableaux de rendement.

Les tarifs de cubage peuvent être catégorisés par le nombre de variables (entrées) utilisés pour prédire le volume, dans un tarif à une entrée une seule variable généralement le DHP permet de prédire le volume ces tarifs sont moins précis que les tarifs à deux entrées bien qu'ils soient plus simples et plus rapides à utiliser la forme de la tige particulièrement la relation entre DHP et la hauteur totale peut varier selon l'âge de l'arbre rendant ainsi les tarifs de cubage à une entrée plus limitatifs (PARDE ET BOUCHON 1988).

Dans le but de caractériser le peuplement d'Eucalyptus nous avons choisi dans le cadre de ce travail l'objet d'exploitation couvrant une superficie de 64 ha.

Notre étude a été réalisée en quatre parties.

- Une première partie réservée aux généralités sur le genre Eucalyptus.
- Une partie sur les différents types de tarifs de cubage.
- Une partie « matériel et méthodes » consacrée à la description de la zone d'étude ainsi que sur les méthodes d'inventaire et traitement des données.
- La dernière partie pour l'analyse et l'interprétation des résultats.

Chapitre I :
Généralités sur l'Eucalyptus

1. Généralités sur l'Eucalyptus

Originnaire d'Australie, notamment de la province de Tasmanie, l'Eucalyptus fût rapidement planté dans les régions subtropicales de l'Asie et du bassin méditerranéen. De nombreux pays ont rapidement intégré les usages médicaux des feuilles d'Eucalyptus dans leur pharmacopée : Chine, Inde, Sri Lanka, Afrique du Sud, Île de la Réunion, Europe, etc.

Possédant une exceptionnelle capacité d'absorber l'eau du sol sur lequel il croît, l'Eucalyptus assèche rapidement les marais qu'il colonise. Il élimine ainsi les milieux de reproduction des insectes qui transmettent la malaria, d'où le nom d'« arbre à la fièvre » ou Australian « fevertree ». Les aborigènes plaçaient une des extrémités d'une racine d'Eucalyptus dans une mare d'eau et l'autre dans un récipient afin de remplir celui-ci grâce à l'action de pompe qu'elle exerce. Ils utilisaient également les feuilles pour traiter la fièvre et divers autres maux.

La production commerciale d'huile essentielle d'Eucalyptus a débuté en 1860, dans la région de Victoria en Australie. Actuellement, l'Australie, le Maroc, l'Espagne et certains pays de l'ex-URSS sont parmi les principaux producteurs. Au XIX^e siècle, on utilisait l'huile essentielle pour aseptiser les cathéters urinaux dans les hôpitaux anglais. De nos jours, elle entre dans la fabrication de rince-bouche (Listerine, par exemple) et de dentifrices, de nombreuses préparations pharmaceutiques destinées aux diverses actions des voies respiratoires (Vicks Vaporub, par exemple) et de solvants endodontiques utilisés en dentisterie. On s'en sert aussi comme dégraissant industriel.

2. Description botanique

L'Eucalyptus est un bel arbre qui peut atteindre en moyenne 40 à 50 m mais pouvant aller jusqu'à 100 m dans son aire naturel, rejetant presque tous des souches jusqu'à un âge très avancé (100 à 120 ans) (BOUDY, 1952). La croissance est très rapide de l'ordre de 8 à 12 m en 4 ans pendant les premières années. En massif, ils s'élaguent et donnent des fûts rectilignes de 18 à 30 m et quelques fois à fibres torses.

Par les différences qu'elle présente (aspect, structure et épaisseur), l'écorce est un élément de distinction entre les différentes espèces.

Les feuilles sont coriaces, pendantes, persistantes et souvent aromatiques. La disposition des nervures est un caractère de classification des différentes espèces dont les périodes de foliation sont variables (RENIER, 1953 in TABTI et CHERFI, 2001).



Photo 1: feuille d'Eucalyptus (Hablal et Radi, 2018)

Les fleurs sont hermaphrodites, de formes variables et présentent un fond en forme de cloche fermé par un couvercle, le calice tombe avec l'épanouissement de la fleur. Phase de la floraison est essentiellement hivernale. La position des fleurs, leur forme et leur assemblage, sont utilisés en systématique. Les inflorescences se présentent sous différentes formes (ombelle, corymbe ou panicule) (SEIGUE, 1985).



Photo 2: Fleur d'Eucalyptus ((Hablal et Radi, 2018)

Les graines sont petites et très fines, de couleur foncée et conservent plus de 5 ans leur pouvoir germinatif (F.A.O, 1982).



Photo 3: les graines d'Eucalyptus (FJpower, 2015)

L'enracinement est très profond et parait pivotant. En se développant, le système racinaire se fascicule et parvient à occuper une importance surface dans le sol.



Photo 4: l'enracinement d'Eucalyptus (APCV de Lédénon, 2015)

3. Classification

L'étude taxonomique a permis de déterminer la systématique suivante VRDOLJAK (1965) in (BECHKOK, 1978).

Règne	<i>Plantae</i>
Sous-règne	<i>Tracheobionta</i>
Division	<i>Magnoliophyta</i>
Classe	<i>Magnoliopsida</i>
Sous-classe	<i>Rosidae</i>
Ordre	<i>Myrtales</i>
Famille	<i>Myrtaceae</i>
Genre	<i>Eucalyptus</i>

4. Caractéristiques écologiques et sylvicultures

4.1. Ecologie

Selon Anonyme (1981) l'Australie est caractérisée par un climat désertique régnant sur la majeure partie à l'exception de deux franges, l'une au nord avec un climat tropical et l'autre au sud et sud-est caractérisée par un climat méditerranéen, c'est là où se localise la majorité des peuplements d'Eucalyptus. De plus, il a été constaté que ces derniers sont principalement limités aux étages bioclimatiques semi-aride et sub-humide.

Les Eucalyptus ne supportent pas les basses températures (inférieures à 4°C), imposant ainsi leur limite altitudinale à moins de 1200 m excepté pour quelques espèces rares. Les Eucalyptus se développent sur des substrats très divers (argileux, argileux marneux, calcaire), et s'adaptent même à des terrains pauvres (LETREUCH, 1980).

En raison de leur faculté d'adaptation, Les Eucalyptus sont susceptibles d'apporter d'immenses avantages aux pays en voie de développement. Cependant, les critiques grandissantes concernant leurs effets écologiques nocifs ont amené la F.A.O à diriger une étude dont le but est d'analyser, d'une manière aussi objective que possible, les informations disponibles sur ces effets en question (MEZIANE, 1996) et dont les principales conclusions sont :

- L'exploitation des Eucalyptus à courtes révolutions entraîne un épuisement rapide des réserves nutritives du sol, ce qui est une conséquence directe de leur rapidité de croissance, chose qui se produirait avec d'autres essences à haut rendement.
- Il est prouvé aussi que certaines espèces produisent des toxines qui inhibent la croissance de certaine herbe annuelle.
- Lorsque les Eucalyptus sont plantés sur terrain nu, il ya accumulation et incorporation de matières organiques et absence de signes de podzolisation ou de dégradation irréversible du sol.
- Les Eucalyptus concurrencent les autres espèces pour l'eau en milieu sec et éliment le sous bois et de ce fait, en milieu aride, ils ne conviennent pas pour lutter contre l'érosion.

4.2. Sylviculture

(SCHUTZ, 1990), définit la sylviculture comme étant l'art d'appliquer des techniques fondées sur des bases scientifiques et biologiques dont l'objectif est de contrôler le développement naturel des forêts et de guider leur évolution dans la direction voulue au bon moment et de façon rationnelle, et finalement d'en conserver les forces productrices.

Le traitement en taillis sous futaie paraît mieux convenir aux Eucalyptus, car il permet d'obtenir en même temps des rejets de dimensions convenables, et du bois d'œuvre à fortes dimensions. (ASSAD & SIDOTMANE, 1994).

Le taillis est exploité de 7 à 12 ans, pour le bois de faibles dimensions, avec un diamètre de 15 à 20 cm selon les espèces. La futaie est exploitée de 40 à 50 ans pour le bois de grandes dimensions avec un diamètre de 50 à 60 cm.

D'après (NEDJAH, 1988 in ASSAD et SIDOTMANE, (1994), la densité optimale des peuplements issus de plantation serait de 1100 à 1200 tiges/ ha, et devraient être éclaircis périodiquement afin de ramener cette densité à 200 ou 300 tiges / ha à l'âge de 20 à 25 ans.

Dans le souci d'augmenter la production, BOUDRU (1989), préconise une éclaircie des taillis basées sur la sélection des rejets précieux et l'élimination des brins malades, chétifs, mal conformés, infestés ou dépérissants et ne laisser que 2 à 3 brins par souche selon sa vigueur et le nombre de brins qui la compose.

Le rendement total d'un peuplement éclairci diminue de 15%, mais l'accroissement en diamètre est près du double de celui d'un peuplement non éclairci. (F.A.O, 1982).

5. Intérêt économique

Compte tenu de la rapidité de sa croissance (5 à 25 m³/ha/an) et de la résistance de son bois, l'Eucalyptus est largement utilisé dans les reboisements. De ces deniers peuvent être extraits divers âges, tels que l'écorce à tan, certaines huiles essentielles dans l'industrie (eucalyptol, peripetone, extrait rutosides), des piquets, des perches et même du bois d'œuvre pour certaines espèces.

Cependant, l'industrie de fabrication de pâte à papier constitue la plus importante débouchée du bois d'eucalyptus.

6. L'Eucalyptus dans le monde

Si elles ne représentent que 7% des surfaces des forêts avec 271 millions ha en 2010, les plantations forestières produisent 35% du marché du bois et la surface totale ne cesse de croître l'augmentation des surfaces plantées est observée dans tous les continents.

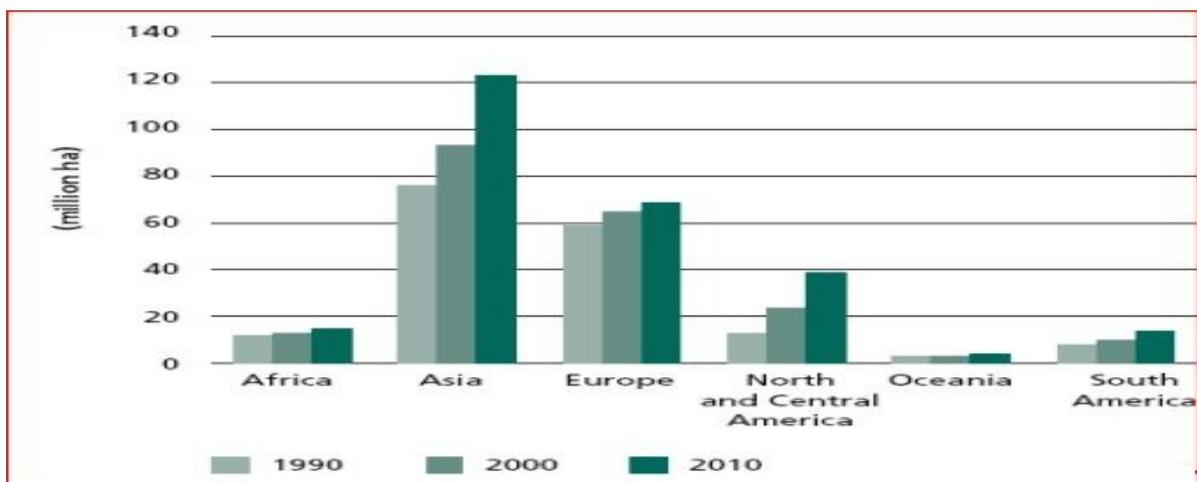


Figure 1: Tendances de la superficie des forêts plantées, 1990-2010 (statistics from FAO, FRA 2010)

En 2005, les conifères représentent 54% des surfaces plantées, principalement avec le genre *Pinus* (32% des surfaces), alors que 39% sont plantées avec des feuillus. (statistics from FAO, FRA 2010)

– Le genre *Eucalyptus* est le plus planté des feuillus dans le monde avec 8% des surfaces reboisées devant les genres *Acacia*, *Tectona*, *Castanea* et *Populus*. (statistics from FAO, FRA 2010)

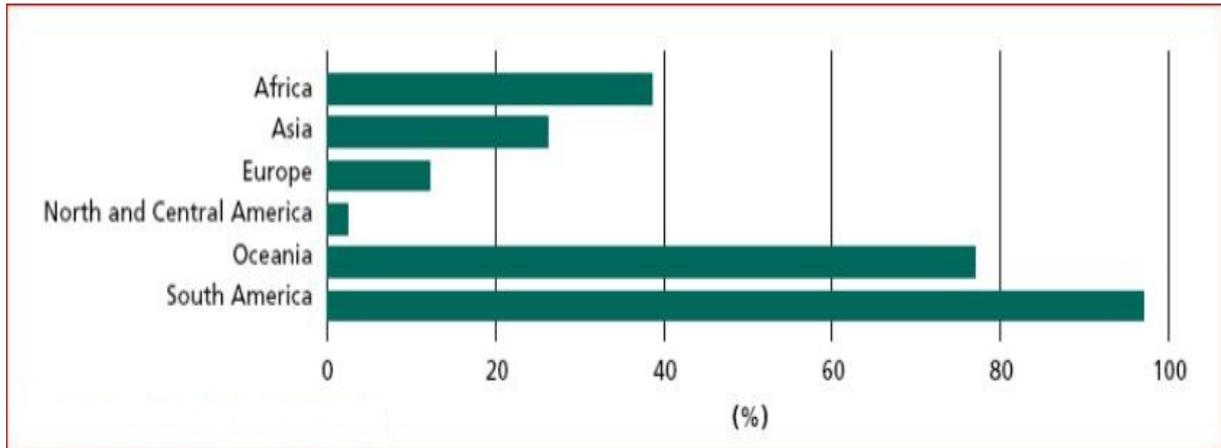


Figure 2: Proportion de forêts plantées constituées d'espèces introduites (statistics from FAO, FRA 2010)

7. Les eucalyptus dans le bassin méditerranéen

Le total des plantations d'Eucalyptus dans le Monde Méditerranéen est de l'ordre de 540.000 ha et il s'accroît d'environ 30.000 à 40.000 ha par an (Metro, 1973). Le tableau 1 ci-dessous résume l'ordre de grandeur des plantations existantes ou en projet, d'après les informations portées à la connaissance du symposium organisé par la FAO en 1967 à Canberra (Australie) au sujet des peuplements forestiers artificiels.

Toutefois, ces chiffres ne sont pas précis ; en 1963 MORANDINI, alors président du Groupe de Travail des Eucalyptus, de la Sous-commission des Questions Forestières Méditerranéennes, estimait ce total, d'après des informations fournies par les Gouvernements, à 650 000 ha. La source d'erreur provient des plantations dites d'alignement et de leur conversion en surface équivalente.

En outre, les prévisions pour les prochaines années sont, par nature, aléatoires. Les pays où les plantations d'Eucalyptus ont été les plus dynamiques sont : le Portugal, l'Espagne, le Maroc, l'Italie, la Tunisie et l'Algérie ; mais pour l'avenir la tendance varie.

Dans le groupe européen, malgré leur importance absolue, les plantations d'Eucalyptus ne constituent qu'une partie relativement modeste des plantations forestières globales (de 1 à 6 %) sauf peut-être pour le Portugal. Mais, dans les prévisions pour les prochaines années, cette proportion a tendance à augmenter.

Pour les trois pays du Proche Orient mentionnés dans le tableau 2, la proportion des surfaces occupées par les Eucalyptus est de 12 à 26 % mais la tendance n'y est pas explicitée.

Enfin, dans les quatre pays d'Afrique du Nord, la proportion des eucalyptus par rapport à l'ensemble des forêts artificielles est beaucoup plus grande que dans les régions précédentes (37 à 70 %) mais elle a tendance à nettement diminuer pour les années à venir.

En 1956, la superficie totale des eucalyptus en Méditerranée était de l'ordre de 263.000 ha. En 1961, elle était estimée, à l'issue de la deuxième conférence mondiale des Eucalyptus à Sao-Paulo, à 400.000 ha.

Tableau 1: Proportion de forêts plantées constituées d'espèces introduites (statistics from FAO, FRA 2010)

Principaux pays	Surface peuplements artificiels 1965 (1.000 ha)	Surface Eucalyptus existant en 1965		Plantations projetées annuellement 1966/70		
		(1.000 ha)	%	Totales (1.000 ha)	Eucalyptus (1.000 ha)	%
<i>Pays européens</i>						
Chypre	4	0,4	10			
Grèce	137	0,1	1	19	?	?
Italie	833	32	4	42	3	7
France (Corse)		1,5	1	?	?	?
Espagne	1 600	102 (2)	6	77	12	16
Portugal	1 500	140 (3)	9	25	8	32
		<u>276</u>		<u>163</u>	<u>23</u>	
<i>Proche Orient</i>						
R.A.U.	15	4	26	1	?	
Israël	36	9	25	2	0,5	
Turquie	47	6	12	5	?	
	<u>98</u>	<u>19</u>		<u>8</u>	<u>0,5</u>	
<i>Afrique du Nord</i>						
Libye	56	26	46	6,5	?	16
Tunisie	80	29	37	17	2	14
Algérie	72	28	38	36	6	
Maroc	176	123	70	18	7,5	41
	<u>384</u>	<u>206</u>		<u>77,5</u>	<u>15,5</u>	
TOTAL GENERAL		541			43	

8. Les reboisements d'Eucalyptus en Algérie

Les Eucalyptus sont très utilisés dans les reboisements pour leur élasticité écologique, leur croissance rapide et leur production ligneuse élevée. Ils furent d'abord introduits dans les arboretums dès 1948 (Métro, 1970 in Alili, 2002), puis occupèrent une place de choix dans les chantiers de reboisement (DRS, brise-vents, et assainissement des marécages) et enfin dans les reboisements dits industriels (production de bois de trituration).

Selon les statistiques (FAO, 2000) in Alili, (2002) les plantations d'Eucalyptus couvrent une superficie de 43.000 ha, destinées principalement pour la protection du milieu (brise-vents, bandes routières et ceintures vertes autour des villes) et pour la production de bois de trituration (pâte à papier et panneaux de particules) dans les régions humides et sub-humides. Les reboisements d'Eucalyptus furent initiés dès 1952 (zone de Mostaganem et d'El Kala) étendus dans le cadre du programme spécial de reboisement en 1974 à de nombreuses régions. De nombreuses espèces d'Eucalyptus ont été utilisées dans ces reboisements :

A Mostaganem, 18 espèces ont été introduites dans l'arboretum de Khadra que l'on peut considérer comme une plantation au vu de la surface affectée (450 ha). Parmi ces espèces, l'Eucalyptus cladocalyx a fourni à l'âge de 16 ans et 18 ans, respectivement des productions de $122.927 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ et $123.392 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ (LETREUCH, 1980 in ALILI, 2002).

A El Kala, les volumes obtenus sont très variables suivant l'âge et espèces utilisées, les plantations d'Eucalyptus sideroxydon. A. Cunn mélangé à l'Eucalyptus camaldulensis, ont produit en moyenne $29,65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$.

A Tiaret, l'Eucalyptus cladocalyx en mélange avec l'Eucalyptus camaldulensis a permis d'obtenir un volume de $21,32 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ à l'âge de 25 ans (Boulefred, 1989 in Alili 2002).

A Bainem, le reboisement d'Eucalyptus cladocalyx de 20 ans d'âge a produit $116.55 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ avec un accroissement moyen annuel de $6,939 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ (Bechkok, 1978).

9. Le reboisement industriel d'Azeffoun

L'idée du reboisement a commencé à prendre forme dès 1969, dans le cadre de mise en valeur de cette vaste région du maquis s'étendant de Dellys à Bejaia, qui est l'une des importantes régions d'Afrique du nord du point de vue forestier (BOUDY, 1952).

Les objectifs économiques visés ainsi que les potentialités physiques de la région, ont amené le bureau d'étude espagnol CALTECHNICA, qui s'est chargé de l'étude du projet en 1972, à sélectionner 4 espèces d'Eucalyptus (*Eucalyptus cladocayx*, *Eucalyptus maideni*, *Eucalyptus sidéroxydon* et *Eucalyptus botroïdes*).

Les espèces retenues sont celles qui ont donné des résultats satisfaisants au niveau des plantations expérimentales dans les arboretums et dans les reboisements industriels des régions d'El-Kantara et de Mostaganem. En outre, ces espèces présentent une grande capacité de rejet de souches, une résistance aux maladies, une rapidité de croissance et une haute production de bois (Anonyme 2, 1978).

Les travaux ont été réalisés par l'O.R.D.F, et les pépinières de Tagma, Bordj Menail et Bejaia ont assuré la production de plants. Cependant, en raison de l'insuffisance de plants en ces 4 espèces, les services forestiers les ont substitués, durant la campagne de plantation 1979/1980, par des résineux principalement les Pins (*Pin maritime*, *Pin pignon*, *Pin des Canaries*), d'autres espèces d'Eucalyptus (*Eucalyptus globulus gomphocéphala* et *Eucalyptus occidentalis*). Ainsi que par d'autres feuillus (*peuplier- chêne liégé* et *châtaigner*).

L'attaque du *Phoracantha* constatée en décembre 1981 à été déterminante dans l'arrêt des plantations d'Eucalyptus.

Selon la circonscription forestière d'Azeffoun, le reboisement fut réalisé en 8 compagnes de plantations et couvrant une superficie de 7718 ha.

Chapitre II :

Tarifs de cubage

Les tarifs de cubage sont des outils fondamentaux dans la détermination indirecte des volumes d'arbres. On distingue les tarifs de cubage individuels ou tarif de cubage arbre et les tarifs de cubage peuplement que nous aborderons ultérieurement à l'occasion de la détermination du volume des peuplements.

1. Notions générales

Un tarif de cubage individuel se présente sous la forme d'un tableau chiffré parfois aussi appelé « table de cubage », d'un graphique ou encore d'une équation qui fournit le volume d'un arbre en fonction d'une ou de plusieurs caractéristiques dendrométriques directement mesurables relatives à celui-ci. Pour fixer les idées, le tableau (3). Concerne un exemple de tarif de cubage établi pour les chênes indigènes. Il fournit les volumes moyens sur écorce (en mètres cubes) en fonction de la circonférence à 1,3 m (en cm) et la hauteur totale du fût des arbres (en m).

Tableau 2: Tarif de cubage des chênes indigènes de taillis-sous-futaie (Ardennes françaises).

Tiré de "Estimation et commerce des bois" (PONCELLE J., 1992)

Ø 1m30	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	
C 1m30	62	78	93	110	125	140	158	173	188	205	220	235	250	268	282	298	315	330	
Ht																			
3	0,08	0,13	0,19	0,25	0,33	0,42	0,52	0,62	0,74	0,87	1,01	1,16	1,32	1,49	1,67	1,86	2,06	2,27	
4	0,11	0,17	0,24	0,33	0,43	0,55	0,67	0,82	0,97	1,14	1,32	1,52	1,72	1,95	2,18	2,43	2,69	2,97	
5	0,13	0,21	0,30	0,40	0,53	0,67	0,83	1,00	1,19	1,40	1,62	1,86	2,11	2,39	2,68	2,98	3,30	3,64	
6	0,16	0,24	0,35	0,48	0,62	0,79	0,97	1,17	1,40	1,64	1,90	2,18	2,49	2,81	3,15	3,51	3,88	4,28	
7	0,18	0,28	0,40	0,54	0,71	0,90	1,11	1,34	1,60	1,88	2,17	2,50	2,84	3,21	3,60	4,01	4,44	4,89	
8	0,20	0,31	0,45	0,61	0,79	1,01	1,24	1,50	1,79	2,10	2,43	2,79	3,18	3,59	4,02	4,48	4,97	5,48	
9	0,22	0,34	0,49	0,67	0,88	1,11	1,37	1,65	1,97	2,31	2,68	3,08	3,50	3,95	4,43	4,94	5,47	6,03	
10	0,24	0,37	0,54	0,73	0,95	1,20	1,49	1,80	2,14	2,51	2,91	3,34	3,80	4,29	4,81	5,36	5,94	6,55	
11	0,26	0,40	0,58	0,78	1,02	1,29	1,60	1,93	2,30	2,70	3,13	3,60	4,09	4,62	5,18	5,77	6,39	7,05	
12		0,43	0,61	0,83	1,09	1,38	1,70	2,06	2,45	2,88	3,34	3,83	4,36	4,92	5,52	6,15	6,82	7,51	
13		0,45	0,65	0,88	1,15	1,46	1,80	2,18	2,60	3,05	3,53	4,06	4,62	5,21	5,84	6,51	7,21	7,95	
14			0,68	0,93	1,21	1,54	1,90	2,29	2,73	3,20	3,71	4,26	4,85	5,48	6,14	6,84	7,58	8,36	
15			0,71	0,97	1,27	1,60	1,98	2,40	2,85	3,35	3,88	4,46	5,07	5,73	6,42	7,15	7,92	8,74	
16			0,74	1,01	1,32	1,67	2,06	2,49	2,97	3,48	4,04	4,64	5,27	5,95	6,68	7,44	8,24	9,09	
17				1,05	1,37	1,73	2,13	2,58	3,07	3,60	4,18	4,80	5,46	6,16	6,91	7,70	8,53	9,41	
18					1,41	1,78	2,20	2,66	3,17	3,72	4,31	4,95	5,63	6,35	7,12	7,94	8,80	9,70	
19					1,45	1,83	2,26	2,73	3,25	3,82	4,43	5,08	5,78	6,53	7,32	8,15	9,03	9,96	
20					1,48	1,87	2,31	2,80	3,33	3,91	4,53	5,20	5,92	6,68	7,49	8,34	9,24	10,19	

Un tarif de cubage doit être établi à partir d'observations sûres comprenant chacune la variable expliquée (le volume) et les variables explicatives (circonférence ou diamètre, Hauteur). Son domaine de validité est le domaine couvert par l'échantillon d'arbres sur lesquels on a effectué les observations (RONDEUX, 1999).

Par opposition au tarif de cubage, le barème de cubage n'est pas déterminé sur la base d'observations directes relatives au volume, mais il s'appuie sur une relation supposée connue à priori entre volume, diamètre, hauteur,... (On se base alors sur des hypothèses concernant la forme des arbres ou leur appartenance à des types géométriques déterminés ; le cylindre par exemple).

Le principe de base d'un tarif de cubage repose sur le fait que des arbres de même essence, de même grosseur, de même hauteur et de même forme, ayant grandi dans des milieux de croissance comparables ont un volume identique ou qui oscille peu autour d'un volume moyen pouvant être exactement déterminé (RONDEUX, 1999).

Les tarifs de cubage sont construits par la recherche de relations entre le volume de l'arbre d'une part et sa grosseur et / ou sa hauteur d'autre part.

Les tarifs de cubage sont généralement utilisés dans trois types de problèmes : L'aménagement et la gestion forestière, la commercialisation des bois et la recherche forestière (études de productivité). Ils peuvent être conçus en fonction des objectifs poursuivis ou de la précision souhaitée et, de manière très générale, ils se différencient les uns des autres par le nombre d'« entrées » qu'ils comportent, c'est-à-dire par les caractéristiques de l'arbre en fonction desquels ils fournissent le volume.

2. Les différents types de tarif de cubage

2.1 Les tarifs nécessitant une seule mesure par arbre

Ce sont les tarifs à une entrée. Ceux-ci expriment le volume moyen d'un arbre en fonction d'un seul critère qui est la grosseur à hauteur d'homme : $v = f(d)$ 1,3

L'utilisation d'un tarif à simple entrée pour cuber exactement un peuplement est une exception (seulement en cas de grande homogénéité de la station en cause). Leur domaine d'application est d'autant plus limité que le nombre de sujets ayant servi à les construire est restreint et localisé. Les tarifs de cubage à une entrée ne conviennent généralement pas pour cuber de manière précise un peuplement. Par contre, ils permettent à l'utilisateur d'avoir rapidement une idée générale de son volume (RONDEUX, 1999).

Parfois, on parle de « tarif aménagement » : il s'agit en fait d'un tarif de cubage à une entrée (diamètre à hauteur d'homme) donnant un certain volume des arbres d'une essence donnée dans une unité d'aménagement donnée (RONDEUX, 1999).

2.2 Les tarifs nécessitant deux mesures par arbre

Ils font intervenir un facteur supplémentaire tel que la hauteur totale [$v=f(d, h)$] et gagnent donc en précision. Ces tarifs sont d'usage nettement plus général. Leur fiabilité dépend beaucoup plus de la forme des arbres concernés que de l'essence ou des lieux de croissance ; en d'autres termes, pour chaque classe diamètre-hauteur la forme des arbres pour lesquels la table est utilisée doit en principe correspondre à la forme des arbres ayant servi à construire le tarif.

2.3 Les tarifs nécessitant plus de deux mesures par arbre

Ils peuvent être envisagés pour obtenir davantage de précision et ont en principe un caractère plus universel en considérant, par exemple, outre la grosseur à hauteur d'homme et la hauteur totale, la grosseur à une hauteur déterminée $v = : (d, d_i, h)$. Sur un plan pratique, l'utilisation de ce type de tarifs est évidemment plus laborieuse. Comme ceux à deux entrées d'ailleurs, ils conviennent mieux au cubage d'arbre pris individuellement encore que la précision à attendre soit peu élevée, compte tenu de la variabilité biologique naturelle difficilement maîtrisable.

Si dans certains cas les entrées du tarif correspondent aux variables ou aux termes de la fonction mathématique fournissant le volume ($v=f(d)$, par exemple) dans d'autres cas, les variables pourront résulter de "la transformation mathématique ou de la combinaison des entrées (d^2 ou d^2h , par exemple). Il ne faudra donc pas confondre entrées et variables. Pour fixer les idées, l'équation $v = f(d^2, h, d^2h)$, tout en comportant trois variables, relève d'un tarif à deux entrées.

3. Construction d'un tarif de cubage

L'élaboration d'un tarif de cubage s'effectue en plusieurs phases parmi lesquelles il convient de citer:

- La récolte des données de base,
- La préparation des données, comportant leur réduction et le calcul des volumes,
- Le choix et l'application de la méthode de construction proprement dite.

3.1. Récolte des données de base

3.1.1 Taille de l'échantillon

Fixer l'importance de l'échantillon d'arbres abattus ou sur pied nécessaire à l'élaboration d'un tarif de cubage est un problème relativement complexe lié à l'échantillonnage, aux objectifs poursuivis et à la précision souhaitée.

Le choix de l'échantillon suppose la prise en compte de plusieurs critères tels que : le nombre de sujets à mesurer, les dimensions de ceux-ci et le choix des peuplements dans lesquels ils sont prélevés (RONDEUX, la mesure des arbres et des peuplements forestiers, 1999). L'utilisation que l'on fera du tarif est évidemment également importante à considérer (cubage en vue de la commercialisation, cubage destiné à des études de production, cubage réalisé à l'échelle locale, régionale ou nationale).

Si le tarif concerne une aire limitée où les conditions de croissance sont relativement homogène, on peut admettre un échantillon variant de 30 à 100 bois (SCHMITT & SCHNEIDER, 1959) ; (LOETSH, ZOHRER, & HALLER, 1973) ; (RONDEUX, 1973). Pour un tarif d'application plus large, devant par exemple couvrir une région ou les principaux milieux de croissance d'une essence (station écologiques, âges, traitement), il est indispensable de mesurer un plus grand nombre de bois.

Si l'on s'en réfère à la littérature existante, les nombres de bois envisagés sont très variables et semblent être le reflet de l'importance quantitative et qualitative des essences mesurées plutôt que du souci d'atteindre une grande précision. On note, de façon générale, que les tarifs intéressant les essences feuillues sont basés sur un plus grand nombre d'arbres, et qu'en moyenne celui-ci est assez bien lié à la grandeur des zones d'application, comme l'indiquent les chiffres approximatifs suivants qui découlent de l'examen d'environ 70 tarifs issus d'une quinzaine de pays (RONDEUX, 1999) :

Peuplement = 30 à 100 arbres

Forêt = 400 arbres

Région = 1000 arbres

Pays = 2000 arbres

3.1.2. Choix proprement dit de l'échantillon

En principe, les arbres destinés à construire un tarif de cubage doivent être représentatifs de la population ou de l'ensemble auquel il est appliqué.

La plupart du temps, la récolte des données se fait à partir d'arbres issues d'éclaircies ou de coupes rases, voire d'arbres abattus pour la circonstance ou plus rarement à partir d'arbres sur pied mesurés au moyen d'appareils adéquats tels que le relascope de Bitterlich. Dans le cas d'arbres provenant d'éclaircies, les sujets retenues ne constituent généralement pas un échantillon représentatif de la population observée, car ils appartiennent à une population différente ou ont des caractéristiques propres ayant justifié leur élimination (AVERY, 1975). Cette observation doit cependant être nuancée en fonction du type d'éclaircie pratiquée du but de l'opération sylvicole. Selon (ABADIE & AYRAL, 1956).

Dans le cas où l'estimation des volumes se fait en fonction de la grosseur à hauteur d'homme et de la classe sociale des arbres (dominé, codominant, dominant) il n'y aurait pas de différence significative entre les arbres d'éclaircie et ceux sur pied. Sur la base de placettes d'expérience d'essences diverses, (BOUCHON, 1974) compare les caractéristiques d'arbres abattus et sur pied (circonférences, hauteurs position sociales, houppiers) il conclut que certains tarifs à une ou à deux entrées, donneraient lieu à des résultats biaisés lors de leur application au cubage d'ensembles d'arbres sur pied et donc aussi de peuplements.

Il est très important de veiller à utiliser un échantillon assurant une bonne dispersion de la distribution des grosseurs. En d'autres termes, il sera souvent plus avantageux de mesurer un nombre plus élevé d'arbres appartenant aux catégories de grosseur extrêmes plutôt que d'accroître l'effectif total. En particulier, on veillera à disposer d'un nombre suffisamment important de gros bois au sein de l'échantillon eu égard à la plus grande variabilité des volumes de ceux-ci. Ces considérations impliquent que l'on mesure, autant que possible, un nombre pratiquement constant d'arbres dans chaque classe de diamètre.

3.1.3. Types de données récoltées

Les données à récolter sont globalement fonction du type de tarif à construire et du type de volume intéressant l'utilisateur.

Dans ces conditions, on sera évidemment attentif à ce que ces données correspondent aux « entrées » du tarif ou puissent permettre de les déterminer ; il en sera de même pour les "sorties" du tarif. Toutes les données capables d'expliquer la variabilité du volume d'un arbre,

qu'elles concernent l'arbre lui-même ou le peuplement auquel il appartient ou le milieu écologique environnant, méritent également d'être prises en compte.

Parmi les mesures couramment effectuées, le plus souvent sur des arbres abattus, il faut mentionner:

- la grosseur à hauteur d'homme sur écorce.
- les grosseurs, à divers niveaux de longueur, de billons successifs.
- la hauteur totale, la hauteur bois fort et la hauteur bois d'œuvre.
- l'épaisseur de l'écorce (mesures à divers niveaux).
- la largeur et la longueur du houppier.

D'autres mesures, moins fréquentes, ont trait aux caractéristiques dimensionnelles des branches en vue de la détermination de leur volume, à l'âge des arbres, à la grosseur et à la longueur des billes de pied (feuillus), à la circonférence (ou diamètres perpendiculaires) des souches des arbres abattus faisant partie de l'échantillon.

Certaines des mensurations évoquées peuvent également être effectuées sur arbres debout si l'on souhaite disposer d'un échantillon plus étoffé ou plus représentatif.

Les mesures relatives aux peuplements ou aux stations dont proviennent les sujets échantillonnés pourront concerner la hauteur moyenne ou la hauteur dominante, la surface terrière et le nombre de bois à l'hectare pour les peuplements, et des éléments tels que l'altitude, la pente, l'association pédologique ou phytosociologique pour les stations ou les milieux de croissance, encore que ces informations n'expliquent pas toujours de manière satisfaisante la variabilité du volume.

3.2. Préparation des données

Il est très important d'organiser et de prétraiter les données récoltées sur le terrain (données brutes) en vue de la phase de construction du tarif proprement dite. Dans cet esprit, l'utilisation de l'information s'avère particulièrement intéressante et efficace en imposant une récolte standardisée et beaucoup plus rigoureuse des données et surtout en permettant d'effectuer rapidement un nombre élevé de calculs fastidieux (RONDEUX, 1973) ; (OTOUL & RONDEUX, 1988) Dans notre terminologie, « les données dendrométriques brutes » concernent principalement les grosseurs et les longueurs de billons qui permettent, au moyen de formules adéquates de déterminer le volume des arbres échantillonnés.

Au même titre que les grosseurs à hauteur d'homme, les grosseurs à divers niveaux et les différentes hauteurs, les volumes constituent les principales "données" à partir desquelles la construction du tarif va être envisagée. Vues sous cet angle, les données éventuellement

transformées ou combinées, constituent les "variables" à mettre en relation et parmi celles-ci on distinguera les variables à expliquer ou variables dépendantes, c'est-à-dire les volumes, et les variables explicatives, c'est-à-dire les grosseurs et les hauteurs ou tout autre variable liée au volume.

3.3. Construction proprement dite d'un tarif de cubage

La construction d'un tarif peut s'appuyer sur plusieurs méthodes :

- Méthode directe.
- Méthode graphique
- Méthode mathématique

Il est bien évident que les deux premières méthodes sont aujourd'hui largement supplantées par la méthode mathématique.

3.3.1. Méthode directe

Dans cette méthode, les arbres sont regroupés par classes de grosseur dans le cas d'un tarif à une entrée et par classes de grosseur et de hauteur dans le cas d'un tarif à deux entrées, dans le premier cas, on calcule alors le volume moyen correspondant à chaque classe de grosseur et dans le second cas, il est nécessaire de calculer le volume pour chaque classe de grosseur à l'intérieur de chaque classe de hauteur.

Cette manière de procéder conduit presque inévitablement au tracé de lignes brisées, la loi de variation obtenue pour le volume est irrégulière et le tarif résultant est très peu précis pour les combinaisons de variables explicatives qui ne comportent qu'un nombre limité de mesures ; on ne peut d'ailleurs pas estimer la précision de pareil tarif.

3.3.2. Méthode graphique

Cette méthode est surtout utilisée dans la construction de tarifs à une entrée et comparée à la précédente, elle présente l'avantage de mieux tenir compte de l'allure générale du nuage de points. Tous les arbres de l'échantillon sont placés dans un graphique dont les axes matérialisent respectivement le volume en ordonnée, et la grosseur à hauteur d'homme, en abscisse.

On trace ensuite, à main levée, une courbe continue occupant le mieux possible une position moyenne au sein de tous les points du graphique. Les courbes de ce genre présentent généralement une concavité orientée vers le haut ou sont très tendues au point de se rapprocher d'une ligne droite, surtout si l'amplitude des catégories de grosseur est assez

limitée. De la même manière que dans la méthode directe, rien n'empêche d'appliquer la procédure qui vient d'être décrite à chaque classe de hauteur dans l'optique de la construction de tarifs à deux entrées.

Certaines améliorations ont été apportées à cette méthode en reportant les volumes et les grosseurs sur des échelles logarithmiques. Cette façon de procéder permet de transformer la courbe, dont question ci-avant, en une courbe à rayon de courbure très grand tourné vers le bas, ce qui facilite la représentation graphique. On cubera à l'aide de ce tarif tous les arbres de l'échantillon ayant servi à le construire et dont le volume réel total est connu V_r , on obtiendra un volume total estimé V_e . A chaque application du tarif à un lot donné de bois on multipliera le volume estimé par le facteur de correction v_r/v_e .

Contrairement à la méthode directe, la méthode graphique impose une évolution régulière des volumes en fonction des grosseurs. Elle ne nécessite pratiquement aucun calcul et peut donc être intéressante à considérer pour répondre rapidement à certains problèmes locaux ou venir en aide aux forestiers complètement démunis de moyens de calcul. Le gros inconvénient de cette technique réside dans sa subjectivité, les résultats obtenus dépendent en effet de l'habileté de celui qui trace la courbe et de sa plus ou moins bonne connaissance des lois de variation du volume. En outre, elle ne permet pas d'estimer la précision du tarif de cubage lors de la détermination du volume d'un ensemble d'arbres.

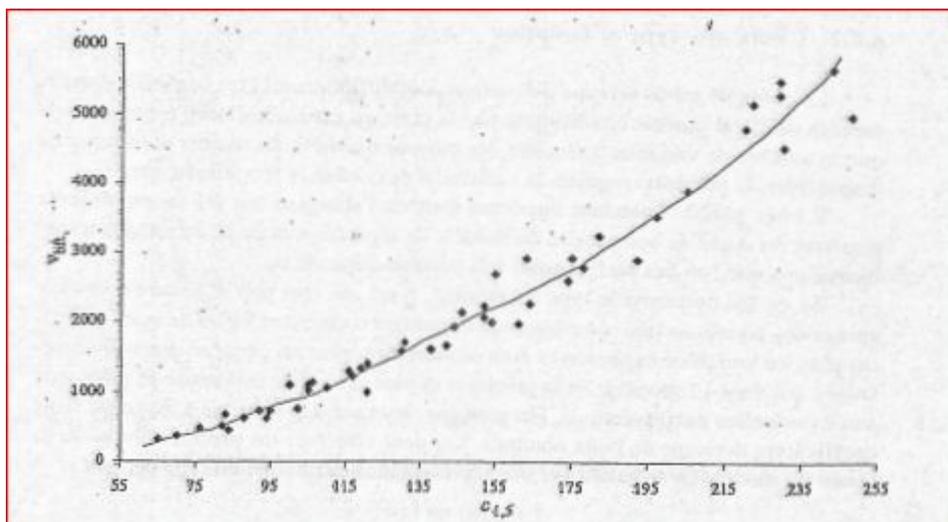


Figure 3: Représentation graphique du volume du bois fort de la tige (en dm^3) en fonction de la circonférence $c_{1,5}$ (en cm).

3.3.3. Méthode mathématique

Les tarifs de cubage sont actuellement pratiquement tous construits par voie mathématique et se présentent sous la forme d'équations résultant de l'application de la méthode statistique de régression par les moindres carrés (DRAPER & SMITH, 1966) et (DAGNELIE, 1975c). Ce procédé de construction est largement facilité par l'utilisation de programmes de calcul sur ordinateur (OTOUL et RONDEUX, 1988) permettant d'envisager des régressions multiples de diverses formes : linéaires et non linéaires.

3.4 Tarifs de cubage mathématiques

Etant donné l'importance considérable de la construction par voie mathématique des tarifs de cubage, nous envisagerons de manière plus approfondie, dans les paragraphes qui suivent, divers points essentiels des méthodes tant de construction que de choix d'équations ou encore d'estimation de la précision.

3.4.1 Principaux types d'équations

La démarche utilisée pour déterminer la forme des équations revient principalement à effectuer un choix parmi les entrées possibles (première phase), puis à sélectionner la formule mathématique (seconde phase).

En ce qui concerne la première phase, le choix des entrées repose avant tout sur la commodité de leur détermination et sur l'intensité de leur liaison avec le volume.

Les entrées le plus souvent retenues seront les grosseurs (circonférences ou diamètres) à hauteur d'homme (tarifs à une entrée), associées à des hauteurs totales ou partielles (tarifs à deux entrées).

Dans le cas de tarifs à deux entrées, certains auteurs préconisent d'utiliser le diamètre à 1,3 m et, plutôt que la hauteur, un second diamètre à un niveau compris entre 5 et 9m (SCHMID & al, 1971) ou à une hauteur relative constante de 0,3h (POLLANSCHUTZ, 1965) voire de 0.1h (EVERT, .1969) avec des résultats tout à fait satisfaisants. Un second diamètre apporterait une précision comparable à celle fournie par la hauteur et à condition de se situer à un niveau ne posant pas de problèmes techniques de mesure, il serait intéressant à considérer en matière de cubage d'essences feuillues. Dans tous les cas, l'objectif est évidemment de maîtriser le mieux possible la forme de l'arbre.

En ce qui concerne la seconde phase qui a trait au choix de l'équation de cubage, de nombreux modèles mathématiques sont présentés dans des ouvrages de synthèse tels que ceux de (SPURR, 1952), (LOETSCH et al 1973), (AVERY 1975), (HUSCH & al, 1982), (AVERY & BURKHART, 1983). Plutôt que de fournir une liste exhaustive d'équations identifiées dans la littérature et concernant respectivement des tarifs à une, deux, trois et même plus de trois entrées, nous nous limiterons volontairement à quelques modèles parmi les plus utilisés.

Si l'on souhaite exprimer le volume en fonction d'une seule variable, la première qui vient à l'esprit et qui est la plus nettement liée au volume est la grosseur, par exemple le diamètre à 1,3 m, soit d .

En général, la relation unissant le volume v et le diamètre d est curvilinéaire et peut se présenter sous la forme : $V = a_0 + a_1 d^{a_2}$

Dans de nombreux cas, on constate que la représentation graphique du volume en fonction du carré du diamètre est linéaire. Cela implique que le coefficient a_2 soit égal à 2 et, dans ces conditions l'équation devient : $v = a_0 + a_1 d^2$.

Un autre modèle non linéaire : $v = a_0 d^{a_1}$ est souvent utilisé ; il peut être ajusté par régression linéaire après transformation logarithmique, soit : $\log v = a'_0 + a'^1 \log d$.

On recommandera l'utilisation de l'équation linéaire en d^2 , sachant que le volume est davantage lié à une surface (d^2 , au facteur $\pi/4$ près) qu'à une longueur (d). Si l'on poursuit ce raisonnement, des équations faisant intervenir les variables d^2 et h (hauteur), au sens d'un tarif à deux entrées, maîtrisent mieux la variabilité du volume.

L'expérience montre que les équations les plus pertinentes sont généralement de la forme :

$$V = a_0 + a_1 d^2 h$$

$$V = a_0 + a_1 d^2 + a_2 d^2 h$$

$$\log V = a_0 + a_1 \log d + a_2 \log h$$

Équations auxquelles on pourrait également ajouter d'autres termes issus de la combinaison de la hauteur avec le diamètre ou de combinaisons diverses entre : variables (produits, exposants, etc.). C'est par exemple le cas des équations suivantes (DAGNELIE & al, 1976; 1985):

$$V = a_0 + a_1 d^2 + a_2 h + a_3 d^2 h$$

$$v = a_0 + a_1 d + a_2 d^2 + a_3 d^3 + a_4 h + a_5 d^2 h$$

Quant aux équations exprimant le volume en fonction de plus de deux variables, elles ne paraissent pas très utiles à appliquer, eu égard au faible gain de précision qu'apporte une mesure supplémentaire. Parmi celles-ci, les plus fréquentes sont du type:

$$V = f(d, d_i, h).$$

Enfin, les équations de cubage tenant compte d'un paramètre représentatif du peuplement tel que la hauteur dominante peuvent se présenter sous la même forme que les équations relatives aux tarifs à deux entrées.

3.4.2. Choix du type d'équation

Le choix de tel ou tel type d'équation peut difficilement être conseillé dans la mesure où il est parfois conditionné par la prise en considération d'éléments tels que le nombre de variables à récolter, les moyens humains, financiers et techniques disponibles, la précision requise, la variabilité des essences forestières, etc.

Il nous paraît cependant opportun d'attirer l'attention sur les inconvénients résultant du degré de complexité du modèle de régression et de la nature des transformations que l'on fait parfois subir à la variable dépendante.

En ce qui concerne le type de modèle, il est souvent peu réaliste de vouloir ajuster des équations très compliquées comportant un nombre élevé de coefficients, car plus les variables explicatives sont nombreuses, plus on observe des auto corrélations qui vont à l'encontre de la précision et plus le modèle lui-même se prête mal aux éventuelles extrapolations. En pratique, les modèles simples à deux ou trois coefficients donnent de bons résultats (RONDEUX, 1999). On peut effectuer un premier choix de la forme du modèle en se basant sur une représentation graphique du type suivant :

$$V = f(d) \text{ ou } f(d^2)$$

Pour un tarif à une entrée, ou encore :

$$V = f(d^2h)$$

Par classe d'une autre variable explicative telle que la hauteur, pour un tarif à deux entrées.

En ce qui concerne les modèles pour lesquels l'ajustement porte sur une variable dépendante transformée, par exemple v^{-1} ou $\log v$, où v représente le volume, le calcul des coefficients par la méthode des moindres carrés n'est pas simple.

Si l'on se trouve en présence d'une équation du type :

$$V = a_0 d^{a_1}$$

« d » représentant le diamètre à hauteur d'homme, les valeurs de a_0 et a_1 sont obtenues en minimisant la quantité : $\sum_{i=1}^n (v_i - a_0 d_i^{a_1})^2$

« n » désignant le nombre total d'arbres pris en considération.

Par souci de simplification, on propose généralement de linéariser de pareilles équations, en procédant à une logarithmique.

La droite résultante de la linéarisation ne passe plus par la moyenne des valeurs du volume mais bien par la moyenne des logarithmes de ces valeurs ou encore, après retour aux variables initiales, par la moyenne géométrique des volumes. Comme la moyenne géométrique est plus petite que la moyenne arithmétique, la transformation logarithmique a donc pour effet de sous-estimer systématiquement les volumes. Généralement, ce biais n'est pas très important et peut être corrigé (BASKERVILLE, 1972) mais, quoi qu'il en soit, il nous paraît que le recours aux tarifs du type logarithmique ne devrait être envisagé que dans les situations où l'on se trouve confronté à des problèmes d'ajustement, par exemple non linéaire, de modèles simples dans lesquels le volume n'est pas transformé.

3.5. Critères de sélection du modèle

3.5.1. Méthodes non statistiques

Lorsque les ajustements sont réalisés exclusivement par voie graphique, pour juger de la qualité de ceux-ci, on peut utiliser des paramètres basés sur la comparaison des volumes observés v_i et des volumes calculés ou estimés. Ces paramètres (BRUCE, 1920), (SPURR, 1952) sont calculés comme suit:

$$\text{Déviation globale} = \sum_{i=1}^n (v_i - \tilde{v}_i) / \sum_{i=1}^n \tilde{v}_i$$

$$\text{Déviation moyenne} = \sum_{i=1}^n |v_i - \tilde{v}_i| / \sum_{i=1}^n \tilde{v}_i$$

La première expression traduit le biais global éventuel du tarif de cubage et n'excède pas d'habitude 1 % (en régression linéaire pure il est évidemment nul), tandis que la seconde indique essentiellement la variabilité inhérente aux observations effectuées [SPURR, 1952].

Dans le cas d'un ajustement réalisé par voie statistique, en l'absence de transformation de la variable dépendante, la déviation globale est évidemment nulle, les écarts positifs situés au-dessus de la ligne ou de la surface de régression compensant les écarts négatifs situés au-dessous.

3.5.2. Méthodes statistiques

– Les coefficients de détermination et de corrélation

Le coefficient de détermination correspond au carré du coefficient de corrélation (mesurant la netteté de la liaison existant entre la variable dépendante et Les variables

explicatives) et traduit la part de variation de la variable dépendante "expliquée" par la régression.

Il est parfois tentant d'apprécier la qualité d'une régression au vu du seul coefficient de corrélation. Cette approche est à déconseiller car à un coefficient de corrélation élevé pourrait correspondre un mauvais ajustement. Il suffit pour cela de se trouver en présence d'un modèle biaisé, d'un échantillon non homogène ou encore d'arbres anormaux.

De manière générale, un coefficient de détermination élevé ou un écart-type résiduel faible témoigne d'un bon ajustement.

– Les paramètres basés sur la valeur des résidus

Les différences entre les volumes observés et les volumes calculés par l'équation de cubage constituent les résidus. Ceux-ci peuvent être utilisés sous différentes formes dans le but de comparer plusieurs ajustements (PALM & RENDOUX, 1976). Nous pensons à :

- l'écart-type résiduel estimé.
- la moyenne quadratique des résidus absolus et relatifs.

L'écart-type résiduel estimé est une mesure de la dispersion des résidus représentés par les différences qui existent entre les Volumes observés « v_i » et les volumes estimés « \tilde{v}_i ».

Dans ces conditions, l'écart-type estimé des résidus [$e_i = v_i - \tilde{v}_i$] s'écrit :

$$\sigma_{v.x1, \dots, xp} = \sqrt{\frac{1}{n-p-1} \sum (v_i - \tilde{v}_i)^2}$$

Où n : nombre total d'arbres

p : nombre de variables explicatives intervenant dans le calcul de V_i .

Dans le cas plus simple d'une seule variable explicative x , l'estimation de cet écart-type résiduel devient :

$$\sigma_{v.x} = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum (v_i - \tilde{v}_i)^2}$$

Il est généralement d'autant plus élevé que les arbres sont plus gros et d'autant plus petit que les arbres sont plus petits.

On utilise fréquemment la notion de coefficient de variation résiduelle qui n'est rien d'autre que l'écart-type défini ci-avant exprimé en pourcentage de la moyenne générale de la variable dépendante, soit :

$$\text{CRV} = C\tilde{V}_{v.x} = [100 \sigma_{v.x}] / \tilde{v}$$

En égard à l'absence d'homogénéité de la variance des volumes pour les différentes catégories de grosseur, ces paramètres comme nous le verrons ultérieurement, laissent fortement à désirer.

Il faut souligner que les coefficients de variation résiduelle n'ont pas la même signification selon qu'ils s'adressent à des variables dépendantes exprimées sous la forme logarithmique ($y' = \log y$) ou non logarithmique (y). En termes statistiques, pour une variable « logarithmique » le coefficient de variation, exprimé en pourcentage, s'écrit dans le cas de logarithmes décimaux (DAGNELIE, 1973): $Cv = 231 \sigma_{v,x}$

Dans le cas d'équations logarithmiques ou de transformations logarithmiques permettant d'atténuer l'hétérogénéité de la variance, le coefficient de variation résiduelle de la variable initiale non transformée concerne chacune des valeurs fournies par l'équation (erreur relative constante tandis que dans le cas d'équations non logarithmiques, ce même coefficient traduit l'erreur susceptible d'être commise sur la valeur moyenne de la variable dépendante.

Pour la moyenne quadratique des résidus absolus « S_a » et relatifs « S_r », nous aurions tendance à recommander le calcul systématique, pour chaque ajustement (PALM, 1981), des expressions suivantes, soit respectivement :

$$S_a = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \tilde{v}_i)^2}$$

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i - \tilde{v}_i}{\tilde{v}_i}\right)^2}$$

On notera au passage que :

$$S_a = \sigma_{v,x_1, \dots, x_p} \sqrt{\frac{n-p-1}{n}}$$

Dans l'hypothèse où une transformation des variables aurait été effectuée, ces critères seraient appliqués après retour aux variables initiales. La moyenne quadratique des résidus relatifs « S_r » est un critère intéressant à considérer car le fait de diviser par la quantité « V_i^2 » contribue à homogénéiser la variance.

4. Choix des critères de sélection

Les différents critères envisagés antérieurement permettent tous d'apprécier la validité des ajustements et a priori rien ne permet de dire que l'un est préférable à l'autre. Leur détermination est souvent justifiée car, dans beaucoup de circonstances, une confrontation des résultats auxquels ils donnent lieu permet de prendre position de manière plus tranchée.

Nous voudrions cependant aussi attirer l'attention sur l'intérêt d'une procédure déterminante qui permet de juger réellement la qualité d'une régression ou encore la pertinence d'un modèle. Elle consiste à analyser la représentation graphique des résidus en fonction des volumes soit observés, soit ajustés ou en fonction d'une autre variable explicative telle que la grosseur ou la hauteur des arbres.

On peut résumer ces objectifs d'une pareille analyse comme suit (ALDEK, 1980).

- vérifier que les résidus sont distribués normalement avec une variance homogène dans le cas où les résidus, exprimés en fonction des volumes estimés, sont uniformément répartis autour de zéro. Le modèle ne présente pas, à première vue, des caractéristiques indésirables.
- déceler un éventail défaut d'ajustement se traduisant par une tendance systématique dans le nuage des résidus.
- étudier la forme des relations entre les résidus et les variables explicatives éventuellement non encore introduites dans le modèle.
- cette méthode est surtout d'application dans le cas de tarif à une entrée. Lorsque le volume estimé est exprimé en fonction du diamètre « d » et de la hauteur « h », on pourra utiliser la variable explicative d^2h pour permettre la représentation graphique (CAILLIEZ, 1980).

5. Précision des tarifs de cubages

Il ne faut pas perdre de vue qu'un tarif de cubage est construit à partir d'un échantillon d'arbres plus ou moins représentatif des peuplements ou des milieux étudiés et qu'il fournit par conséquent des valeurs moyennes pour les quelles il est opportun de pouvoir estimer les marges d'erreur. A ce titre, la construction d'un tarif par voie mathématique est mieux adaptée.

Cependant, les conditions d'application des méthodes de régression ne doivent pas être sous-estimées si l'on veut interpréter valablement les résultats auxquels elles donnent lieu. En principe, si ce n'est pour les régressions pondérées, on supposera que les différentes valeurs conditionnelles de la variable dépendante sont normales (Volumes correspondant à une catégorie de grosseur donnée), indépendantes et de même variance, et que les variables explicatives sont connues sans erreur de mesure ou d'observation.

Lors de l'utilisation d'un tarif de cubage, l'erreur globale observée, pour un arbre donné, correspond à la différence entre le volume réel de cet arbre et son volume estimé par le tarif.

Cette erreur de cubage peut être importante et résulter de plusieurs sources :

- Erreur de mesures relatives aux arbres destinés à la construction du tarif de même qu'aux arbres à cuber au moyen du tarif : les principales erreurs portant sur les arbres échantillonnés concernent les mesures affectant les grosseurs et les hauteurs (SCHMID & al, 1971) C'est erreurs aussi bien dues aux opérateurs qu'aux appareils utilisés, ont également trait aux mesures intéressant les arbres à cuber au moyen du tarif. On suppose qu'il n'y a pas a priori d'erreurs de ce type ;
- Variabilité naturelle des sujets à cuber : elle est mesurée au moyen de la variance résiduelle des volumes ; en d'autres termes pour une même grosseur et une même hauteur, la variation du volume correspondant n'est pas toujours totalement expliquée.
- Variabilité liée à l'échantillonnage : elle s'explique par le fait que le tarif construits sur base d'un échantillon est appliqué à l'entièreté d'une population, l'imprécision de l'estimation fournie par le tarif diminue avec l'augmentation du nombre d'arbres échantillonnés en vue de construire le tarif.

6. Détermination de la précision

L'écart-type résiduel « $\sigma_{y,x}$ » s'identifie à l'écart-type des résidus « $y_i - \hat{y}_i$ » et mesure la dispersion des points observés (volumes) autour de la ligne ou de la surface de régression.

Dans l'hypothèse d'un écart-type résiduel constant pour toutes les valeurs de « x » (variable explicative), approximativement dans 2/3 des cas (68 %), en moyenne, le volume réel d'un arbre se situera au sein d'un intervalle de « $\pm \sigma_{y,x}$ » autour du volume estimé.

L'erreur due à l'application du tarif sur le volume moyen d'un ensemble de « N » arbres, résulte de l'expression. $e(\bar{y}) = \pm t \sigma_{y,x} / \sqrt{N}$

Ce type de calcul ne donne cependant qu'un ordre de grandeur de l'erreur commise, il ne tient pas compte de l'allure générale de la relation unissant le volume et les variables liées. Il fournit des erreurs trop élevées pour les arbres de petites dimensions.

Une manière plus cohérente de chiffrer la précision est de déterminer l'intervalle de confiance des valeurs estimées au moyen de l'équation de régression. dans le cas de l'utilisation de l'écart-type résiduel estimé, on mesure la dispersion des points observés de part et d'autre de la courbe de régression ; l'erreur commise dans l'appréciation des volumes

est identique quel que soit le volume des arbres, ce qui s'accommode évidemment mal de la réalité, étant donné l'inégalité présumée des variances des volumes cette méthode ne fournit à ce titre qu'un ordre de grandeur de l'erreur commise.

Plutôt que d'apprécier globalement la précision du tarif, il est plus réaliste d'estimer les valeurs de la variable dépendante « y » (ici le volume) qui correspondent à diverses valeurs de la variable explicative « x » (ici diamètre) et de déterminer la précision correspondante en termes d'intervalle de confiance. Par exemple, étant donné un diamètre fixé « x_i », on souhaite estimer, via une équation de cubage spécifique, une moyenne conditionnelle correspondante au volume « y » ainsi qu'à ses limites de confiance.

Dans l'hypothèse d'une équation de régression linéaire simple, l'estimation de la moyenne conditionnelle « m_{y/x_i} » découle de la relation :

$$\hat{m}_{Y/x_i} = \bar{y} + b(x_i - \bar{x}) = \bar{y}(x_i)$$

Pour autant que la variance de « Y » autour de la ligne de régression (variance résiduelle) soit la même pour toutes les valeurs de « x », les limites de confiance de la moyenne conditionnelle estimée sont calculées à partir de l'expression (DAGNELIE, 1973; FREESE, 1978b)

$$\bar{y}(x_i) \pm t_{1-\alpha/2} \sqrt{\sigma_{y,x}^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{SCE_X} \right]}$$

$\sigma_{Y,X}^2$ représente la variance résiduelle estimée et t la variable de STUDENT à n-2 degrés de liberté.

La variance liée à l'estimation d'une moyenne conditionnelle du volume et qui mesure la variabilité liée à l'équation, est égale à :

$$\text{Var } \bar{y}(x_i) = \sigma_{y,x}^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{SCE_X} \right]$$

On pourrait cependant s'intéresser à l'estimation d'une valeur individuelle du volume et vouloir connaître les limites de confiance correspondantes. Dans ce cas, outre la variance liée à la valeur moyenne $\bar{y}(x_i)$, il faut aussi tenir compte de la variance propre de la valeur individuelle $\bar{y}(x_i)$, ce qui se traduit par l'expression :

$$\text{Var } y(x_i) = \text{var } \bar{y}(x_i) + \text{var}(e_i) \quad [e_i = \text{résidus}]$$

Pouvant aussi s'écrire sous la forme :

$$\text{Var } y(x_i) = \sigma_{y,x}^2 \left[\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{SCE_X} \right] + \sigma_{Y,X}^2$$

Et les limites de confiance découlent dès lors de l'expression :

$$y(x_i) \pm t_{1-\alpha/2} \sqrt{\sigma_{y,x}^2 \left[\frac{n+1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{SCE_X} \right]}$$

Outre le problème de détermination de la précision au sens dont il vient d'être question, c'est-à-dire largement conditionné par le choix de l'échantillon, il convient aussi d'être attentif à la précision de l'estimation du volume d'un ensemble d'arbres à cuber, autres que ceux composant l'échantillon. Ce problème est peu abordé dans la littérature forestière. (BOUCHON, 1974) et (PALM, 1981) y font néanmoins explicitement allusion, le dernier nommé simulant les résultats à attendre d'un cubage de 10, 100 et 1.000 arbres dont les circonférences seraient réparties selon 13 distributions théoriques.

Dans le calcul de la variance du volume total d'un ensemble d'arbres, il faut tenir compte de la corrélation existant entre les volumes estimés, ceux-ci résultant de la même équation de cubage.

De ce fait, si l'on envisage « m » arbres, la variance de la somme de leurs volumes n'est pas égale à la somme des variances des estimations, elle se met sous la forme :

$$\text{Var} (\sum_{i=1}^m y_i) = \sigma_{y,x}^2 \left[\frac{1}{n} + \sum_{i=1}^m \frac{(x_i - \bar{X})^2}{\text{SCE}_x} \right] + \sum_{i=1}^m \sigma_{y,x}^2$$

Quant à la variance de la moyenne des volumes, elle est égale à :

$$\text{Var } \bar{y} = \frac{1}{m^2} \text{var} (\sum_{i=1}^m y_i)$$

On observera que la première composante de la variance relative à une valeur individuelle, mesure la variabilité liée à l'équation et est fonction du nombre d'arbres faisant partie de l'échantillon, de la distribution des arbres par catégories de grosseur ainsi que de la variance résiduelle. Quant à la seconde elle représente la variation résiduelle des arbres et est plutôt liée au type de tarif calculé et à l'essence étudiée. Les deux composantes ne sont pas indépendantes.

En conclusion, si l'on dispose de moyens de calculs adéquats, la détermination des Intervalles de confiance des volumes estimés donne une idée de la précision d'un tarif de cubage. Il reste cependant que le vrai problème est celui de l'utilisation d'un tarif pour déterminer le volume des arbres, au sein des peuplements ou de zones fixés. Dans l'hypothèse où la construction d'un tarif est appuyée sur la mesure de plusieurs dizaines ou centaines d'arbres appartenant à des lots déterminés, on peut tester la qualité du tarif "moyen" obtenu en comparant le volume réel « v_r » des arbres par lot avec le volume estimé « V_e » pour le tarif et en déduire l'erreur relative.

$$e = \frac{V_e - v_r}{v_r}$$

De la même manière, on peut effectuer des contrôles de qualité ou de validité sur des lots indépendants de ceux qui ont servi à établir le tarif (DUPLAT & TRAN-HA, 1974)

7. Limites de validité d'un tarif de cubage

Lorsque l'on dispose d'un tarif de cubage et que l'on a fixé les grandes lignes de son utilisation, il convient encore de le tester. En toute rigueur, les tarifs sont uniquement utilisables pour l'essence, la région et l'amplitude des caractéristiques dimensionnelles des arbres ayant servi à le construire.

Dans la plupart des cas, on a généralement recours à 3 méthodes pour tester, en pratique, si un tarif peut être appliqué à une zone forestière donnée (BOUCHON, 1974).

1^{ère} méthode

Si le tarif a été construit par la méthode des moindres carrés pondérés, on peut déterminer les intervalles de confiance pour les cubages individuels. On vérifie si, parmi les arbres cubés, on en trouve bien 68 % à l'intérieur de l'intervalle $v \pm a$.

2^{ème} méthode

Le tarif ne comporte aucun renseignement permettant de calculer sa précision. Dans ces conditions, une façon de procéder est de comparer des cubages exacts d'arbres réalisés dans la zone étudiée, aux cubages de ces mêmes arbres effectués par l'intermédiaire de l'équation à tester.

On vérifie alors, soit la nullité des écarts entre les 2 méthodes, soit la comparabilité par un test χ^2 des distributions observées (cubes exacts) et théoriques (cubes issus du tarif). Un semblable procédé a entre autres été appliqué par (LAMONT et al, 1996) et (PITA CARPENTER, 1967)

Une autre manière de procéder, plus expéditive et généralement satisfaisante pour les besoins de la pratique (GEVORKIANTZ & OLSEN, 1995), est de vérifier si la moyenne des écarts relatifs, éventuellement calculés par classes de grosseur, entre les volumes mesurés et les volumes estimés par l'équation est supérieure à l'expression:

$$\frac{tCVR}{\sqrt{n}}$$

Sachant que :

t = variable de STUDENT (= 2)

CVR = coefficient de variation résiduelle (relative au tarif utilisé)

n = nombre d'arbres mesurés pour tester la validité du tarif

3^{ème} méthode

Plusieurs tarifs ont été établis au sein de plusieurs régions et on souhaite voir s'il existe des différences entre eux ou si l'on peut accepter pour une région donnée un tarif construit dans une autre région. Le problème se ramène alors essentiellement à tester l'existence de différences significatives z entre coefficients de régression d'équations de cubage établies séparément pour plusieurs stations écologiques, par exemple (DAGNELIE ET al 1969).

Ce problème peut être résolu par analyse de la covariance, méthode explicitée dans des ouvrages de statique ou de biométrie (DAGNELIE, 1975c ; DRAPER & SMITH, 1966), et des exemples d'application au domaine forestier, plus spécialement à celui des tarifs de cubage, peuvent être trouvés dans (KOZAK, 1970) et dans (DECOURT, 1971) qui compare les coefficients de forme de peuplements d'épicéa dans cinq régions françaises différentes.

Une approche plus simple peut cependant aussi être envisagée si l'on veut éviter d'entrer dans une longue procédure de calculs. Elle consiste à comparer les tarifs sur la base de leur représentation graphique (au moyen de papier Transparent, par exemple) ou sur la base des valeurs individuelles et de leurs écarts-types.

Comme nous l'avons déjà exposé au cours des différents paragraphes traitant des tarifs de cubage, ceux-ci peuvent sous la forme de tableaux chiffrés, d'abaques, d'équations de régression ou de formules simplifiées à partir desquelles, par l'intermédiaire de moyens de calcul actuellement à la portée de tous, il est possible d'estimer rapidement un volume. Beaucoup de tarifs de cubage construits et publiés de par le monde, sont souvent muets ou peu explicites en ce qui concerne des informations pourtant très utiles en vue de leur utilisation correcte. A titre indicatif, nous suggérons de mentionner :

- l'essence ou le groupe d'essences auquel le tarif se réfère.
- La zone de validité (région, localisation des peuplements échantillonnés).
- La définition des variables dépendantes (volume bois fort limité à telle ou telle découpe, sur ou sous écorce) et explicatives (circonférence ou diamètre sur ou sous écorce et leur niveau de mesure, hauteur totale, bois fort, bois d'œuvre, etc.), ainsi que les unités de mesure utilisées.
- le nombre d'arbres échantillonnés.
- la méthode de calcul des volumes individuels des arbres échantillonnés.
- la méthode de construction utilisée (graphique, mathématique, avec ou sans pondération, etc).
- la précision du tarif, exprimée en termes aussi stricts que possible et relative, par convention, aux données utilisées pour la construction du tarif en dissociant l'erreur due au tarif de l'erreur résiduelle.

Chapitre III :

Matériels et Méthodes

1. Présentation de la zone d'étude

1.1. Situation géographique et administrative

Le reboisement industriel d'Azeffoun occupe le versant Nord de la région montagneuse du littoral de la Kabylie et couvre une superficie de 7718 ha.

Administrativement, le reboisement dépend des communes d'Ait-chafaa, d'Aghrib, d'Azeffoun et de Timizart.

Il est limité au Nord par la méditerranée, à l'Est par Ighzar Mahcine, limité entre la Wilaya de Tizi Ouzou et celle de Bejaia, au sud par les villages Ibahriène, Igoujal, Ihamziwen, Tizi-Boumesaoud, Cherfa et Ighil M'henni et à l'Ouest par la ligne de crête avec la circonscription d'Azazga.

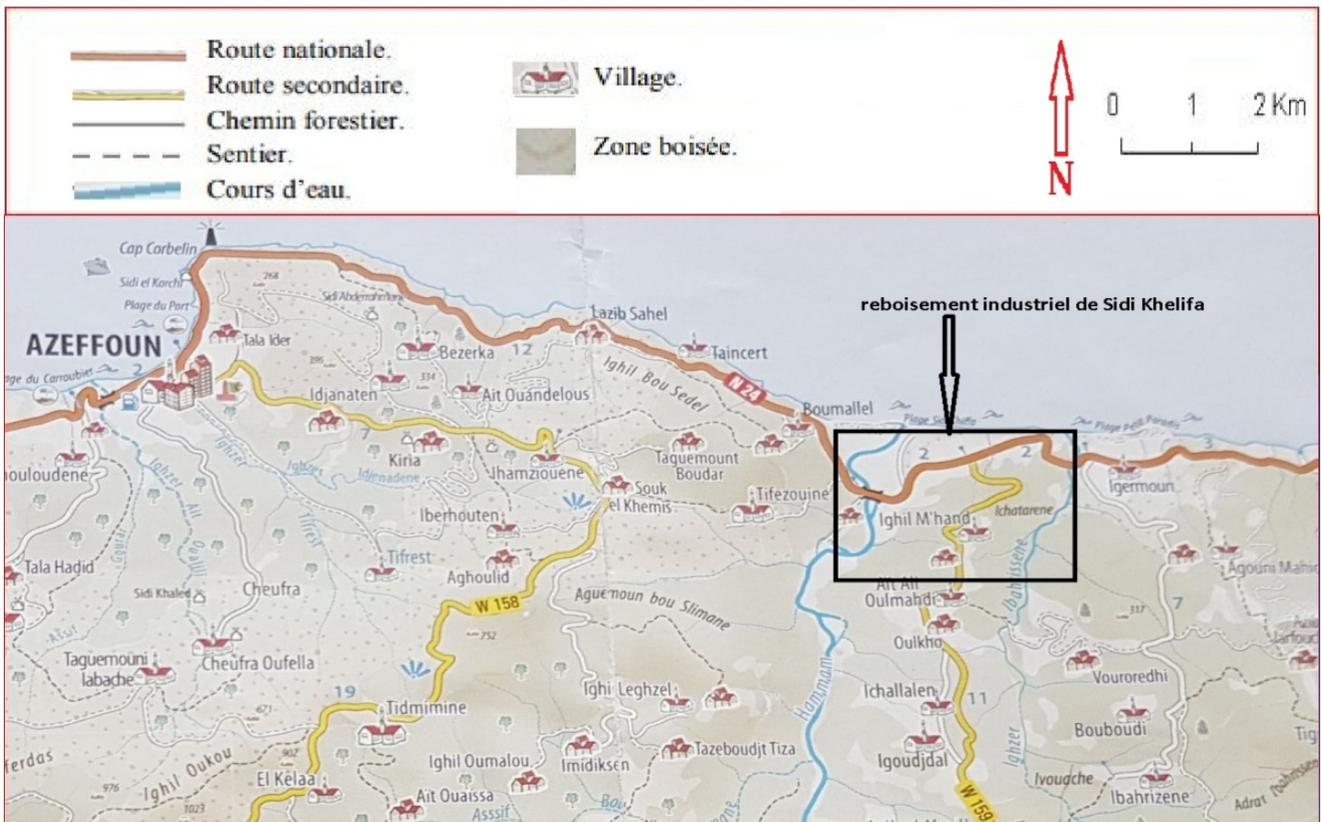


Figure 4 : localisation géographique de la station d'étude dans la région d'Azeffoun.

1.2. Structure oro topographique et géologique

La zone d'étude, d'exposition nord présente un relief plus au moins accidenté avec une pente de 12% et une altitude de 70 m.

Selon le bureau d'étude CALTECHNICA (1972) la région d'Azeffoun est uniforme du point de vue géologique et le terrain est assez perméable. La roche mère présente une alternance d'ardoise ferrugineuse très argileuse de couleur sombre, ainsi que de bancs de grès,

de schistes, de marnes et de quartzites. La région présente des sols gréseux à texture argilo-siliceuse et argilo-marneuse, un pH acide et une hydromorphie temporaire n'excédant pas un mètre de profondeur. Les sols sont profonds plus ou moins structurés et présentent des horizons A1 A2 Bt et C.

1.3. Etude climatique de La région d'Azeffoun

- **Les températures moyennes mensuelles d'Azeffoun**

La différence d'altitude entre Tizi-Ouzou (188m) et Azeffoun (25m) est de 163m. Selon (SELTZER, 1946), la température maximale diminue de 0.7°C pour chaque augmentation de 100 mètres en altitude. La température minimale diminue de 0.4°C pour chaque augmentation de 100m.

Le tableau suivant présente les températures M et m de la région d'Azeffoun.

Tableau 3: Températures maximales et minimales de la région d'Azeffoun durant la période (2006-2016) après extrapolation (APC d'Azeffoun).

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Dec
M (°C)	15.08	15.21	17.55	20.71	23.94	28.71	32.99	32.33	28.95	25.27	18.29	15.78
m (°C)	6.38	6.22	7.98	10.74	13.56	16.96	20.61	20.94	18.24	15.16	11.33	7.23
(M+m)/2	10.73	10.7	12.7	15.73	18.75	22.84	26.80	26.64	23.60	20.22	14.81	11.51

M : moyenne des températures maximales en (°c)

m : moyenne des températures minimales en (°c)

M+m/2 : moyenne des températures mensuelles en (°c)

$M (°c) = t \text{ de Tizi-Ouzou } (163 * 0.7) / 100$

$m (°c) = t \text{ de Tizi-Ouzou } (163 * 0.4) / 100$

Le tableau ci-dessus montre que pour la région d'Azeffoun, le mois de Juillet est le plus chaud avec une moyenne de 26.80°C et le mois de Février est le plus froid avec une moyenne de 10.7°C.

- **Les précipitations mensuelles d’Azeffoun**

Selon SELTZER, (1946). Les précipitations augmentent de 40mm chaque 100m en altitude. Le tableau suivant représente les précipitations d’Azeffoun de 2006 – 2016.

Tableau 4:Précipitations moyennes mensuelles de région d’Azeffoun durant la période (2006-2016) après extrapolation.

Mois	Jan	Fer	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Sep	Oct	Nov	Dec
P (mm)	117.86	130.77	127.66	84.55	74.34	16.99	3.09	6.04	42.63	72.62	130.78	124.9

P : annuelle d’Azeffoun (mm) = P annuelle de Tizi-Ouzou + $(163 \cdot 40 / 100)$.

P : mensuelle d’Azeffoun (mm) = $(P$ annuelle d’Azeffoun/ P annuelle de Tizi-Ouzou) $\cdot P$ mensuelle de Tizi-Ouzou.

Le tableau ci-dessus montre que pour la région d’Azeffoun, le mois le plus pluvieux est celui de Novembre avec 130.78 mm, les mois de Juillet et Août sont les moins arrosés avec respectivement, 3.09 mm et 6.04 mm.

2. Synthèse climatique de la région d’étude

2.1 Diagramme ombrothermique de Bagnouls & Gausson

Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson permet de définir les périodes sèches (MUTIN, 1977). C’est un mode de représentation classique du climat d’une région déterminée (DAJOZ, 2000). Bagnouls et Gausson (1953), définissent un mois sec comme étant celui où les précipitations, exprimées en millimètres, sont inférieures ou égales au double de la température moyenne en degré Celsius.

La construction du diagramme se fait en portant sur l’axe des abscisses les mois de l’année pris en considération. Et en ordonnées les températures moyennes à droite et les précipitations à gauche de telle façon que 1°C correspond à 2mm ($P=2T$). La figure (5) représente le diagramme ombrothermique obtenu pour la région d’étude (Azeffoun) durant la période de 2006-2016.

D'après ce diagramme (figure 5), la période sèche s'étale, pour la région d'Azeffoun, sur quatre mois, du la fin du mois de mai à fin du mois de Septembre. La période humide s'étale de fin Septembre à la fin du mois de mai.

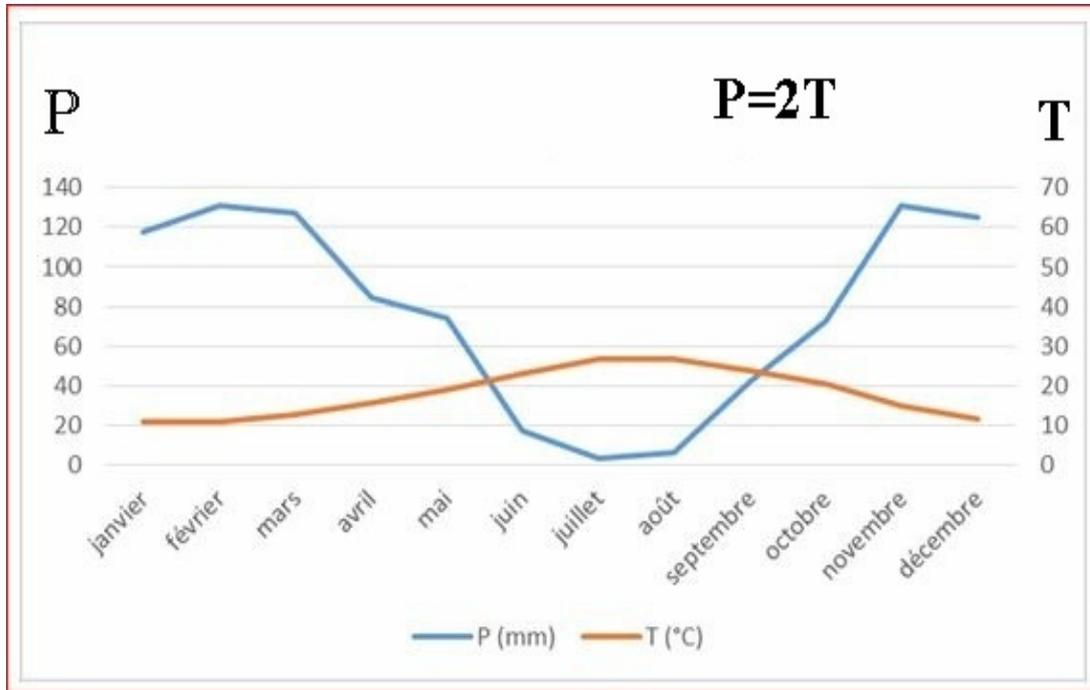


Figure 5: Diagramme ombrothermique d'Azeffoun (2006-2016)

2.2. Détermination du bioclimat de la région d'étude

Le climagramme d'Emberger permet le classement de différents types de climats. Il permet de définir un quotient pluviométrique qui permet de distinguer entre les différentes nuances du climat méditerranéen (Dajoz. 2000). Il est réalisé dans le but de définir l'étage bioclimatique auquel appartient une région donnée. Le quotient est calculé par la formule de Stewart (1969) comme suit :

$$Q2 = 3.43 (P / (M - m))$$

Q2 : est le quotient pluviométrique d'Emberger.

P : est la moyenne des précipitations des années prises en considération exprimés en mm.

M : est la moyenne des températures maxima du mois le plus chaud exprimée en degrés Celsius.

m : est la moyenne des températures minima du mois le plus froid exprimée en degrés Celsius.

Le tableau ci-dessous indique la valeur du Q2 calculée pour la région d'étude et l'étage bioclimatique auquel elles appartiennent.

Tableau 5 : Q2 d'Emberger calculé pour la région d'étude et l'étage bioclimatique correspondant.

Region	P (mm)	M (°C)	m (°C)	Q2
Azeffoun	932.42	32.99	6.22	119.45

D'une manière générale, sur le climagramme d'Emberger, la région d'Azeffoun se situe dans l'étage bioclimatique subhumide à hiver tempéré (Figure 6).

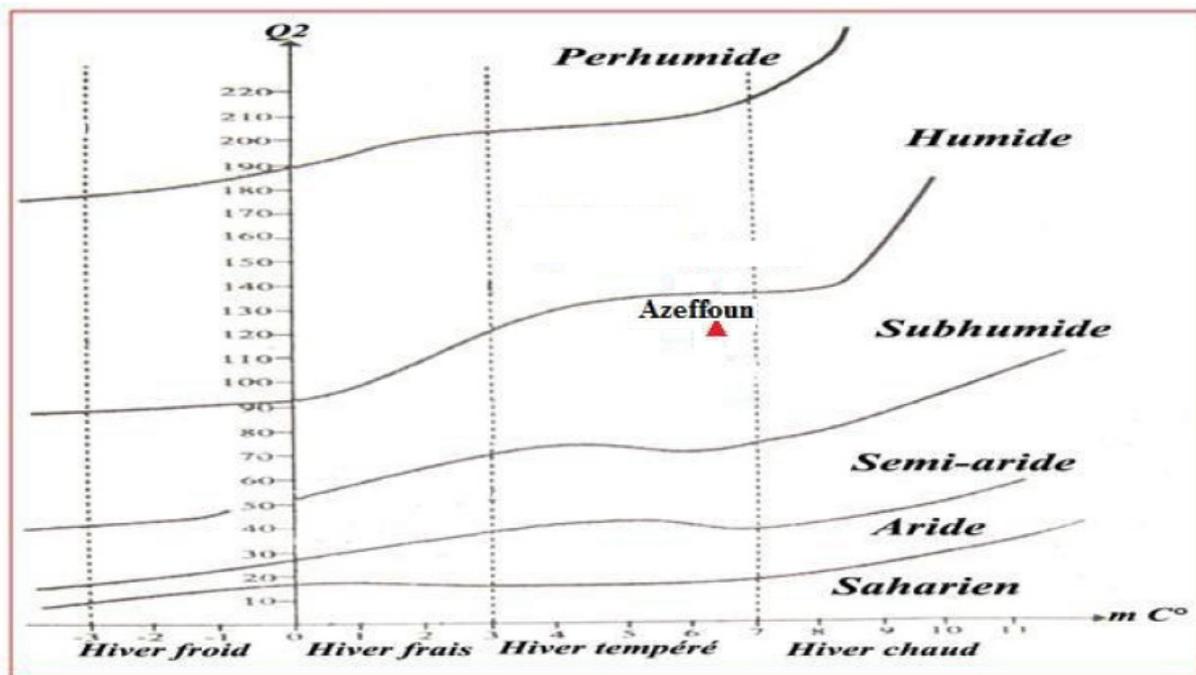


Figure 6: Position de la région d'étude sur le climagramme d'Emberger.

3. La végétation

Antérieurement au reboisement, la zone correspondait à une ancienne subéraie très dégradée (Boudy, 1955), laquelle se trouve, selon les endroits. Soit disparue. Soit restée

réduite à des surfaces de forêts claires avec des pieds minces, isolés et une densité inférieure à 50 pieds à l'hectare, avec un sous bois très fourni empêchant la régénération.

Dans les parties incendiées où la subéraie a été complètement anéantie, l'espace est occupé par des maquis formés principalement de : *Cistus monspeliensis*, *Calycotome spinosa*, *Pistacia lentiscus* et *Erica arborea*.

En basse altitude, on signale la présence d'*Oléa europaea* *Myrtus communis* et *Ampelodesma mauritanica*.

Dans la zones à fortes pentes (45%), se forment des groupes de broussailles à base de *Cistus monspeliensis* et *Ampelodesma mauritanica*. Au dessus de la maison forestière de BouRouma (600 m Altitude) se conserve une belle masse de chêne liège constituée par ce qui reste de la forêt de Tigrine (CALTECHNICA, 1972).

Actuellement, en plus des essences introduites pour le reboisement (*Eucalyptus maidenii*, *Eucalyptus Sideroxylon*, *Eucalyptus cladocalyx* et *Eucalyptus botrvoides*) et certains Pins, l'ouverture des terrasses a engendré un développement intense de sous bois composé essentiellement de : (*Erica arborea* *Myrthus communis*, *Arbutus unedo* *Cistus Monsnelliensis*, *Pistachia lentiscus* *Olea europaea*, *Genista tricuspidata* et *Cistus salvifolius*) de recouvrement moyen de 70% et de hauteur d'environ 1m ; qui engendre une forte concurrence avec les espèces introduites et augmente le risque d'incendie dans cette zone (TABTI & SEDAOU, 1991).

4. Inventaire de peuplement et traitement des données

4.1. Inventaire du peuplement

Le reboisement industriel d'Azefoun a été l'objet d'un inventaire forestier de 02 Juillet au 13 juillet, afin d'évaluer les potentialités productives de ce peuplement.

Dans notre travail la parcelle choisie est située à la partie nord de Sidi-khelifa qui couvre une superficie de 64 ha et le nombre d'arbres échantillonnés est de 53 arbres abattus par l'entreprise des travaux forestiers, d'exploitation des forêts et l'aménagement des espaces verts Djelaili ouardia.

Selon les moyens dont on disposait et tenant compte des contraintes rencontrées sur le terrain, nous avons opté pour une méthode d'échantillonnages aléatoire qui consiste à mesurer les arbres abattus d'une manière aléatoire afin de faciliter le travail d'une part et la méthode avec laquelle l'entreprise travaillait d'autre part.

4.2. L'inventaire dendrométrique

La réalisation d'un inventaire forestier nécessite des relevés dendrométriques et un matériel adéquat est pour cela nous avons procédé aux mesures suivantes :

- Le diamètre à 1.30 m de sol mesuré avec le compas forestier.
- La hauteur totale : avec un blum-liess.
- La hauteur d'arbre abattu grâce à un décamètre.
- Le diamètre des billons avec un compas forestier.
- La longueur des billons.

Notons que les billons ont été coupés suivant des longueurs différentes 1m, 1.25m 1.80m selon les commandes et la nature d'utilisation.



Photo 5: coupage d'arbre en billons successifs (Hablal, Radi, 2018)

Le volume de bois recensé a été calculé par le logiciel « cubage » qui applique une formule de cylindre pour les billons plus ou moins cylindrique et une formule de cône pour les deux derniers billons à la découpe inférieure.

5. Traitement des données

5.1. Analyse des variables dendrométriques

A fin de d'écrire nos paramètres dendrométriques, une analyse statistique représentée par les paramètres de position et de dispersion, s'avère nécessaire.

– La moyenne de la variable considérée, qui exprime le rapport de l'ensemble des valeurs observées au nombre total de placettes ou de l'effectif.

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

– L'écart type, qui exprime les variations des différentes valeurs par rapport à la moyenne.

$$\Theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{X})^2}{N-1}}$$

– Le coefficient de variation, traduit le degré d'hétérogénéité des placettes en ce qui concerne la variable considérée.

$$C.V(\%) = \frac{\Theta}{\bar{X}} \cdot 100$$

– Le coefficient d'aplatissement (KURTOSIS), caractérise la forme de distribution d'une variable (forme de pic ou aplatie) comparée à une distribution normale.

$$Y_1 = \frac{N(N+1)}{(N-1)(N-2)(N-3)} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{X}}{\Theta} \right)^4 - \frac{3(N-1)^2}{(N-2)(N-3)}$$

– Un kurtosis positif indique une distribution relativement pointue, tandis qu'un kurtosis négatif indique une distribution aplatie.

– Le coefficient d'asymétrie de FICHER : caractérise le degré d'asymétrie d'une distribution par rapport à la moyenne.

$$B = \frac{N}{(N-1)(N-2)} \sum_{i=1}^N \left(\frac{x_i - \bar{X}}{\Theta} \right)^3$$

Un coefficient positif indique une distribution étalée à droite ou dissymétrique à gauche, alors qu'une asymétrie négative indique un étalement à gauche ou dissymétrique à droite (BAILLY, 1999).

6. Modélisation des tarifs de cubage

La modélisation est un principe d'analyse de données visant l'élaboration de modèles, constitués d'un système d'équations qui permettent de suivre le comportement de certaines caractéristiques dans le temps (CARPENTIER, 1996 in TABTI et CHERFI, 2001).

Les tarifs de cubage sont élaborés à partir des mesures dendrométriques (diamètre – hauteur) des individus échantillons, choisis aléatoirement dans toutes les classes de diamètre et de hauteur. Les volumes sont calculés par le biais de la formule commerciale.

RONDEUX (1993), préconise le nombre minimum de 30 à 50 arbres pour la construction des tarifs locaux. Dans notre cas la taille d'échantillon est de 53 arbres.

6.1. Ajustement des modèles

L'ajustement des modèles est obtenu par l'utilisation des logiciels EXCEL, IBM SPSS STATISTICS 23 et EXCEL-STAT.

Les différentes équations testées sont représentées par les modèles suivants :

- Equations polynomiales : $y = ax^2 + b$.

$$y = ax^2 + bx + c.$$

$$y = ax^2z + b.$$

$$y = ax^2z + bx + c.$$

$$y = ax^2z + bx + cz + d.$$

- Equation linéaire : $y = ax + b$.

- Equations allométriques : $\text{Ln} = a \text{Ln} x + b$.

$$\text{Ln} = a \text{Ln} x + b \text{Ln} z + c.$$

- Equation exponentielle : $y = ae^{bx}$.

- Equation puissance : $y = ae^x$.

6.2. Qualité et précision des modèles

La qualité des ajustements est étroitement liée à sa précision, celle-ci est évaluée par plusieurs paramètres statistiques (arithmétiques et graphiques) parmi lesquelles on se contentera de ceux-ci :

- **Le coefficient de détermination (R²)**

Le coefficient de détermination (R²) est un indicateur qui permet de juger, la qualité d'une régression linéaire, simple ou multiple. D'une valeur comprise entre 0 et 1, il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées. Certes, le R² a ses imperfections, mais son utilité n'a d'égale que sa simplicité. Le (R²) se définit comme la part de variance expliquée par rapport à la variance totale.

Il est exprimé par la formule suivante : $R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT}$

- **L'AIC (Akaike Information Criterion)**

C'est un outil efficace pour le choix et la sélection du modèle qui représente le mieux la réalité du terrain (AKAIKE, 1973 in BEAL, 2005). Il est basé sur la méthode du maximum de vraisemblance dont les résultats et le principe serait identiques avec la méthode des moindres carrés. En fait, l'AIC évalue la ressemblance entre le modèle estimé et le modèle "réel théorique", donc les meilleurs modèles montrent des valeurs minimales d'AIC.

- **Carré moyen résiduel (CMR)**

Appelé aussi variance résiduelle sans biais (PAUWELS, al, 1999). C'est un indicateur des écarts entre les observations et les estimations du modèle, il représente la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les prévisions et les observations, le modèle est d'autant plus efficace que le CMR tend vers zéro. L'avantage de son utilisation par rapport à la moyenne des résidus (MR) est qu'il tient compte du nombre de paramètre surtout en cas d'une régression multiple. Il est formulé par l'équation suivante (p étant le nombre de paramètres dépendants et indépendants) :

$$MCR = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2$$

- **Analyse des résidus**

Les testes arithmétiques précédemment énumérés s'avère insuffisants pour contrôler la qualité d'un modèle construit. FONWEBAN et HOULLIER (1995) estiment que l'examen visuel et le comportement qualitatif des résidus sont essentiels pour se prononcer sur la validation et la cohérence des modèles. Ces testes supplémentaires sont présentés comme suit :

- **Histogramme des résidus :**

C'est un examen visuel qui permet de vérifier la normalité des résidus ainsi que leur moyenne nulle.

- **Tracée normal des résidus :**

Dans le cadre d'une régression ou d'un lissage, on peut visualiser la droite de Henry des résidus afin de s'assurer que leur distribution ne s'éloigne pas trop d'une loi normale. Elle permet en outre de détecter d'éventuels valeurs aberrante.

Chapitre IV :

Résultats et discussions

1. Analyse descriptives des paramètres dendrométriques

Nous déduisons du tableau (6) que la moyenne des diamètres des arbres abattus est de 25.06 cm.

Les diamètres de notre peuplement varie entre 13 cm et 38 cm, les plus faibles diamètres sont localisés en haute altitude tandis que les gros diamètres se trouvent dans la partie basse de ce peuplement au dessus de la nappe phréatique de l'oued Sidi Khelifa, ce qui explique les grandes différences entre les classes.

Quant aux hauteurs la moyenne est de 14.06 m. Les hauteurs varient dans ce peuplement entre 7.5 m et 18 m. Comme mentionné la hauteur pour les diamètres, les hauteurs importantes sont enregistrées dans les bas de la colline et les plus petites hauteurs sont localisées en haut de colline. Les arbres sont issus des rejets de souches des coupes d'exploitations faites par le passé.

Pour tous les paramètres dendrométrique les valeurs du coefficient de variation observées sont sensiblement faibles pour les paramètres diamètre et hauteur soient respectivement de 29.75% et 17.55%. Cela traduit une dispersion insignifiante, par contre les volumes des arbres accusent une variation très importante avec un coefficient de variation de 65.95% ce qui explique une grande hétérogénéité des volumes.

Un paramètre de dispersion faible témoigne de l'homogénéité des caractéristiques dendrométriques des tiges mesurées.

Les valeurs du coefficient d'aplatissement (Kurtosis) pour tous les paramètres (hauteurs, diamètres, volume) sont inférieure à 3 ($B = -1.18$ à 0.15) les distributions sont platykurtique (trop plate comparée à la distribution normale). Quant au coefficient d'asymétrie des valeurs positives et négatives sans trop s'éloigner de 0 ($a = -0,49$ à 0.90) donc les distributions sont légèrement décalées de part et d'autre de la distribution normale.

Tableau 6: Analyse descriptive de la hauteur, du diamètre et de volume.

Paramètre	Diamètre cm	Hauteur m	Volume m ³
Moyenne	25,06	14,06	0,34
Variance	55,55	6,08	0,05
Ecart type	7,45	2,47	0,22
Kurtosis	-1,18	0,15	0,09
C. Asymétrie	0,12	-0,49	0,91
C. Variation	29,75	17,55	65,94

2. Etude de la structure du peuplement

L'histogramme des fréquences montre les distributions des arbres inventoriés par classe de diamètre figure (7).

De cette distribution il ressort un léger déséquilibre en faveur du petit bois (7.55 %) si non nous remarquons que les tiges inventoriées sont toutes en équilibre avec des fréquences très proches. La répartition des diamètres autour de la moyenne montre que 30.19% des tiges ont un diamètre supérieur au diamètre moyen.

Tableau 7: Distribution des individus par classe de diamètres.

classe de diamètre (cm)	Nombre de tige	fréquence relative %
[10 - 15[	4	7,55
[15 - 20[	12	22,64
[20 - 25[	10	18,87
[25 - 30[	11	20,75
[30- 35[	7	13,21
[35 - 40[	9	16,98

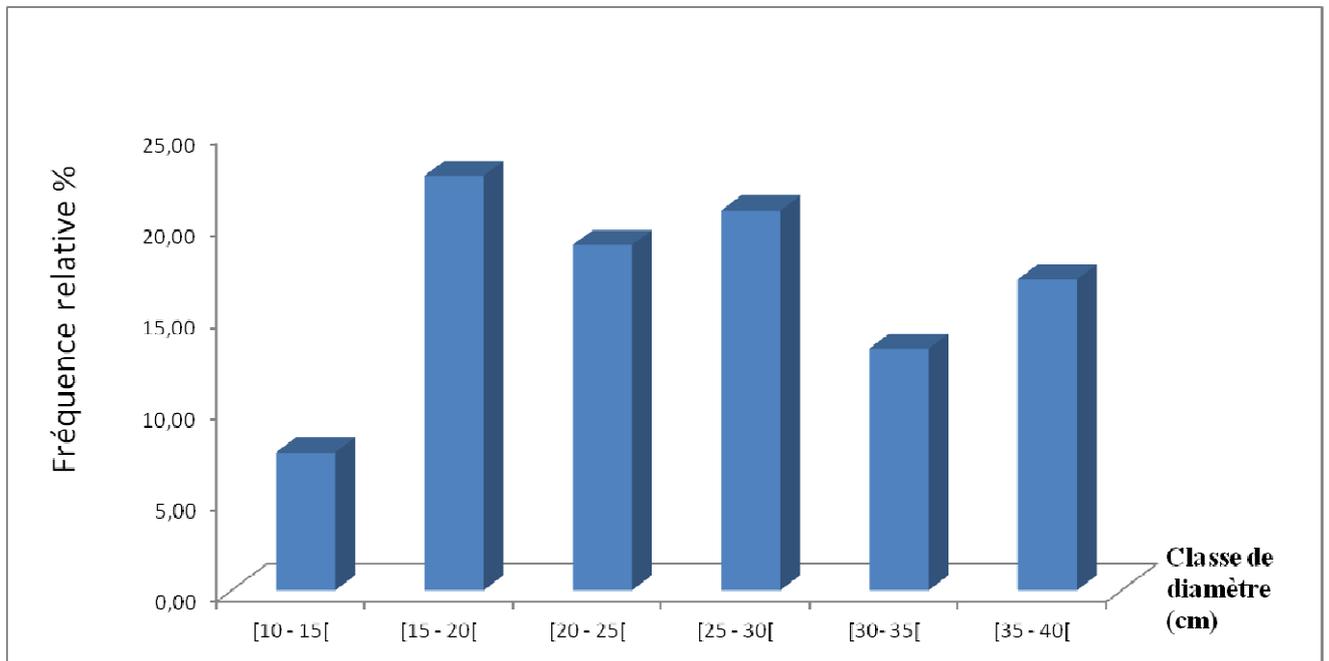


Figure 7: Histogramme de distribution des individus par classe de diamètres.

3. Etude de la normalité

L'application de l'ajustement à la loi Normale avec l'intervalle de confiance (IC : 95%) sert à rechercher la qualité de l'approximation de la distribution de la variable par cette loi et de savoir si notre échantillon provient d'un peuplement qui suit une loi Normale. Il est important aussi de pouvoir apprécier si la distribution théorique que l'on utilise donne une bonne représentation de la distribution des tiges d'un peuplement. Pour cet objectif, on a utilisé le test de KOLMOGROV-SMIRNOV.

Etant donné que la p-value calculée est supérieur au niveau de signification seuil $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle, donc l'échantillon suit une loi normale.

Tableau 8: Résultat du Test de Kolmogorov Smirnov.

P-value	0.679
Alpha	0.05

D'après BOUDRU (1989), les peuplements équiennes se présentent par une courbe en cloche, d'abord normale ; elle devient par la suite dissymétrique à droite, ainsi on peut conclure que la structure est régulière pour le peuplement en générale.

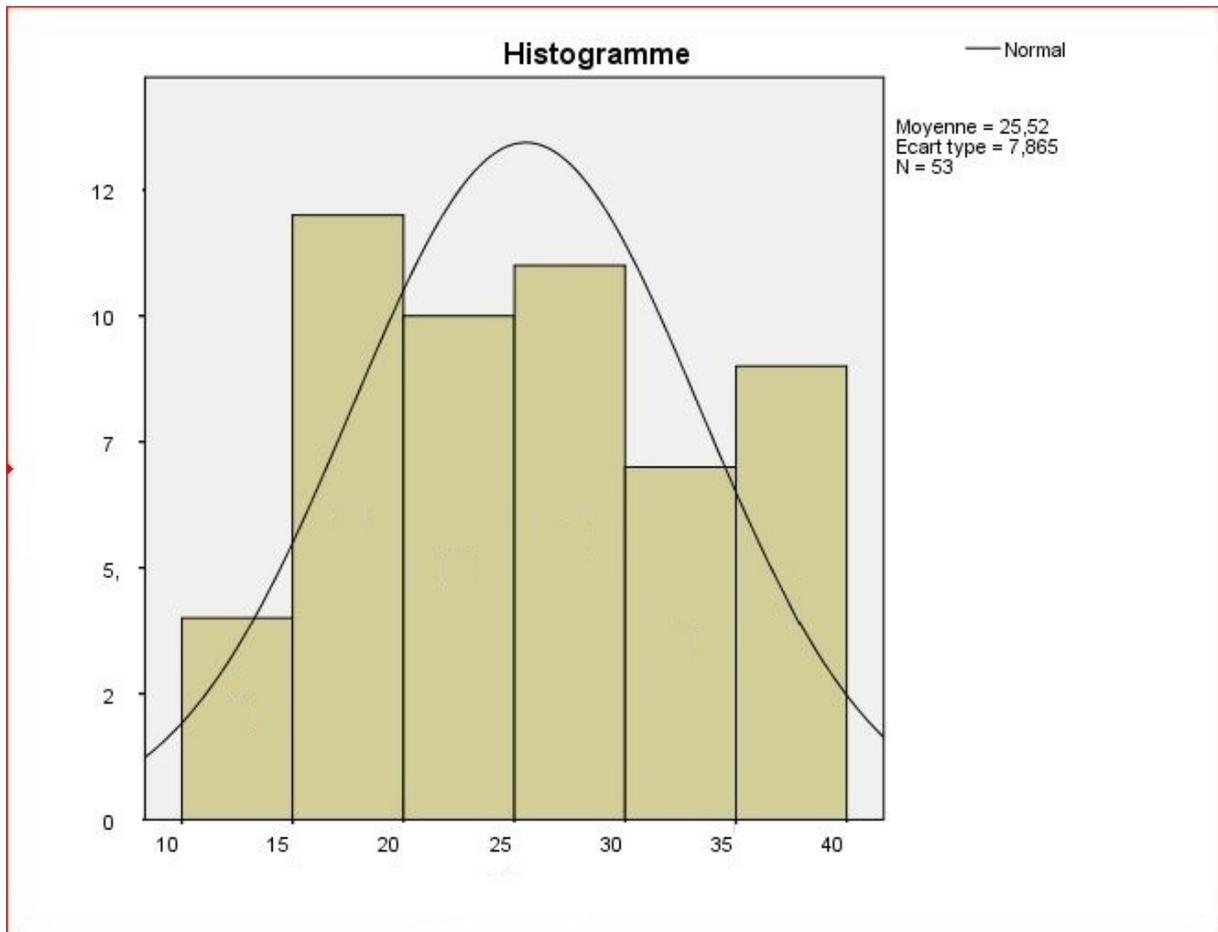


Figure 8: Histogramme de structure du peuplement

4. Cubage des arbres abattus

4.1. Elaboration du tarif de cubage

Les tarifs de cubage sont établis selon l'objectif d'aménagement, d'exploitation ou de commercialisation du bois, de la zone d'application (tarifs locaux ou régionaux) et de la précision recherchée (tarifs rapides ou de précision). La conformité de ces tarifs tient compte particulièrement de la taille de l'échantillon qui sert à la construction des tarifs, de sa structure devant refléter celle du peuplement et des modèles d'équations qui lui y sont ajustés (RNDEUX, 1980) et MHIRIT, 1982 in ALLILI, 2002).

Nous avons construit un tarif tabulaire tableau (9) à deux entrées notamment avec les variables les plus influentes à savoir la hauteur et le diamètre.

Les volumes ont été calculés suite aux mesures des billons successifs pour chaque arbre abattu, pour la même hauteur et qui appartient à la même classe de diamètre, nous avons calculé la moyenne des volumes à partir des équations pour chaque hauteur que seront détaillées dans les paragraphes suivant.

Tableau 9: Tableau des volumes réels et estimés

diamètre (cm)	Hauteurs (m)										
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
[10 - 15 [			0,07	0,10	0,10	0,11	0,13	0,15	0,15	0,16	0,17
[15 - 20 [			0,11	0,12	0,12	0,14	0,15	0,17	0,17	0,18	0,21
[20 - 25 [				0,22	0,24	0,25	0,26	0,26	0,27	0,28	0,29
[25 - 30 [					0,30	0,31	0,35	0,37	0,37	0,38	0,41
[30- 35 [						0,41	0,41	0,42	0,47	0,64	0,65
[35 - 40 [							0,61	0,55	0,75	0,71	0,85
[40 - 45 [								0,82	1,18	1,22	1,29
[45 - 50 [									1,71	1,76	1,81

5. Résultat de la modélisation

5.1. Ajustement des modèles

Pour mieux présenter la relation diamètre – volume, nous avons divisés notre échantillonnage en 08 catégories d’hauteur, et parmi les équations testées nous avons opté pour l’exponentiel pour toutes les catégories de hauteur celui-ci offre des coefficients de

détermination très élevée d'une part et d'autre par c'est le modèle le plus retenu dans l'élaboration des tarifs.

Notons que la catégorie 8 m et 10 m n'ont pas été retenus par manque d'effectif.

Tableau 10: Les modèles ajustés pour chaque catégorie d'hauteurs.

Catégorie de Hauteur	équation	R ²
Hauteur 11	$\text{volume} = 0,024 * \exp(0,096 * \text{diamètre})$	0,97
Hauteur 12	$\text{Volume} = 0,031 * \exp(0,080 * \text{diamètre})$	0,96
Hauteur 13	$\text{Volume} = 0,035 * \exp(0,082 * \text{diamètre})$	0,69
Hauteur 14	$\text{Volume} = 0,038 * \exp(0,079 * \text{diamètre})$	0,97
Hauteur 15	$\text{Volume} = 0,071 * \exp(0,051 * \text{diamètre})$	0,74
Hauteur 16	$\text{Volume} = 0,041 * \exp(0,092 * \text{diamètre})$	0,93
Hauteur 17	$\text{Volume} = 0,055 * \exp(0,072 * \text{diamètre})$	0,97
Hauteur 18	$\text{Volume} = 0,068 * \exp(0,068 * \text{diamètre})$	0,63

Les coefficients de déterminations sont hautement significatifs, la plus petite valeur est enregistrée dans la catégorie Hauteur 18 (0.63) et la plus élevée dans les catégories (H 11, H 14, H 17).

Les modèles ajustés présentent une précision élevée si l'on se réfère aux résultats obtenus dans la littérature (DHOTE ET HERCE, 1994).

5.2. Les graphes de catégorie de Hauteur

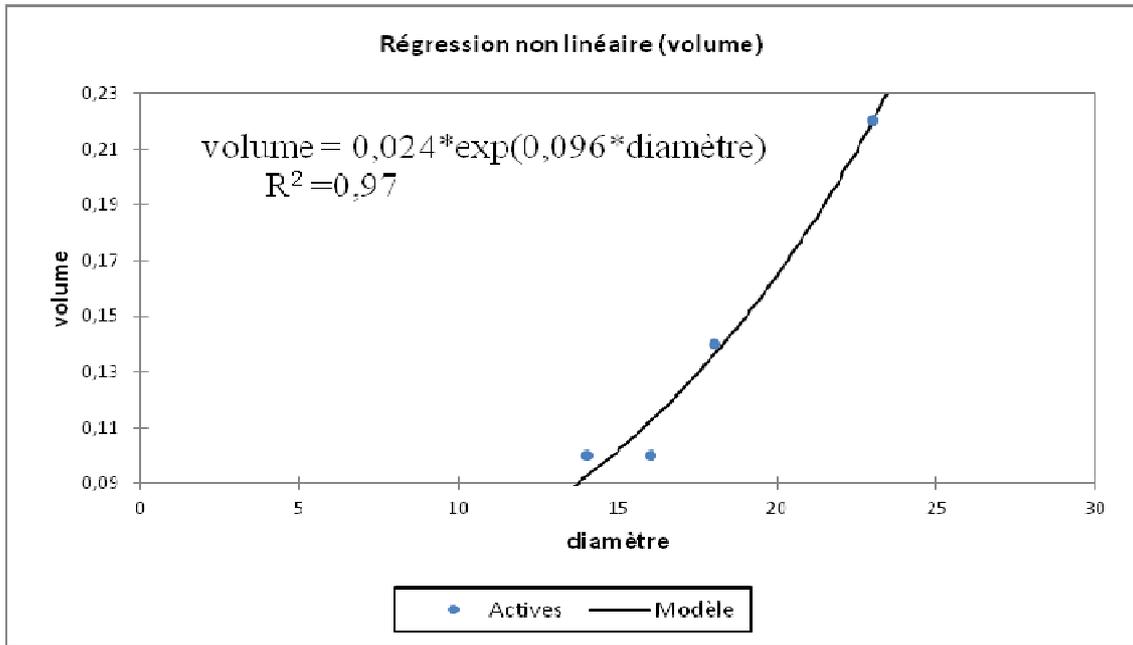


Figure 9: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 11.

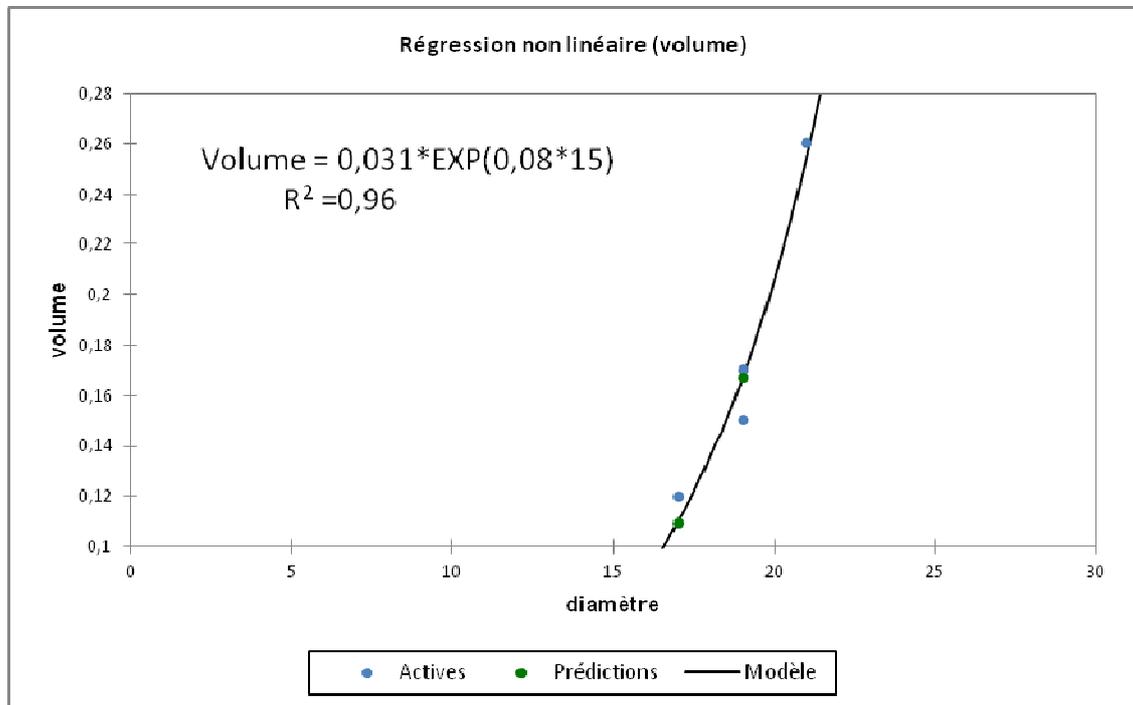


Figure 10: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 12.

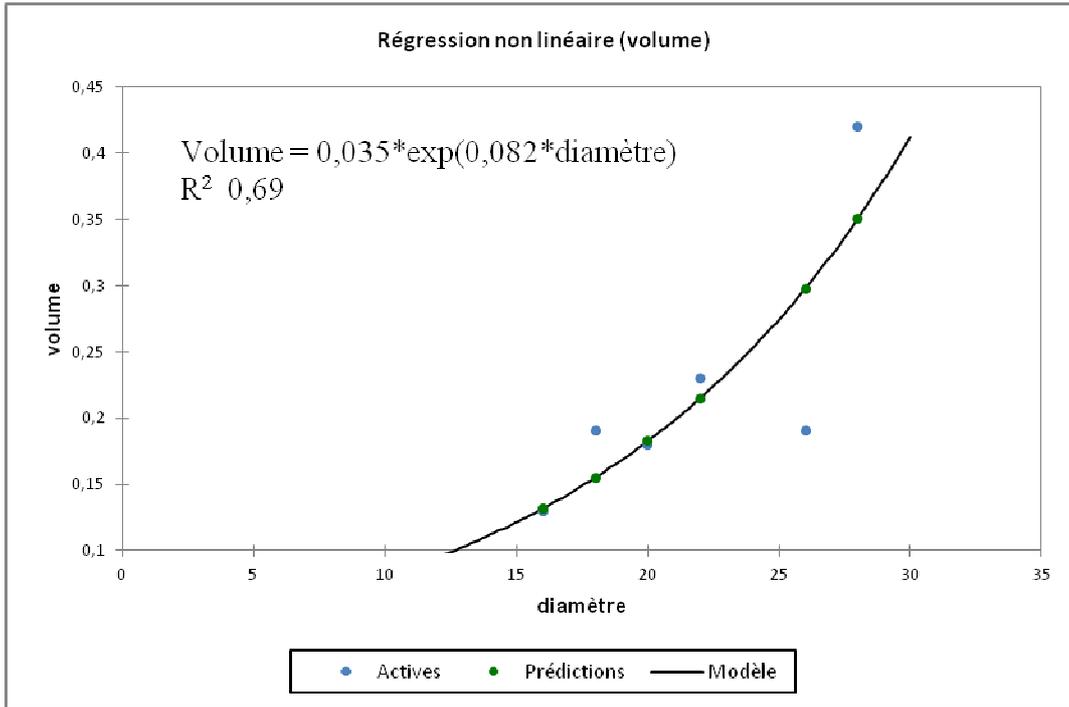


Figure 11: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 13.

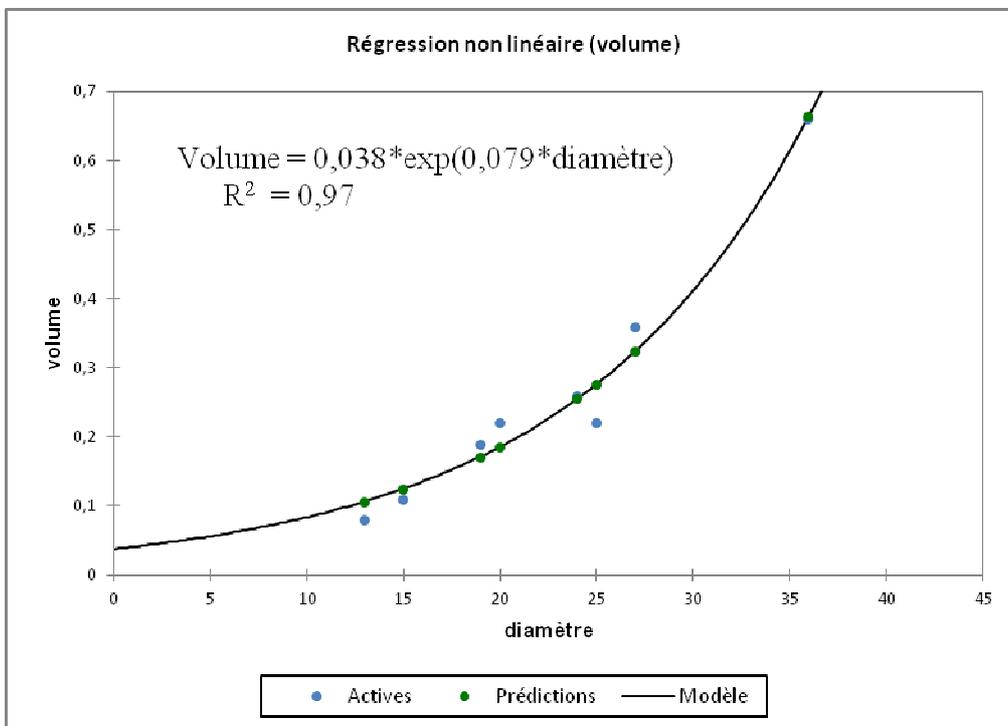


Figure 12: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 14.

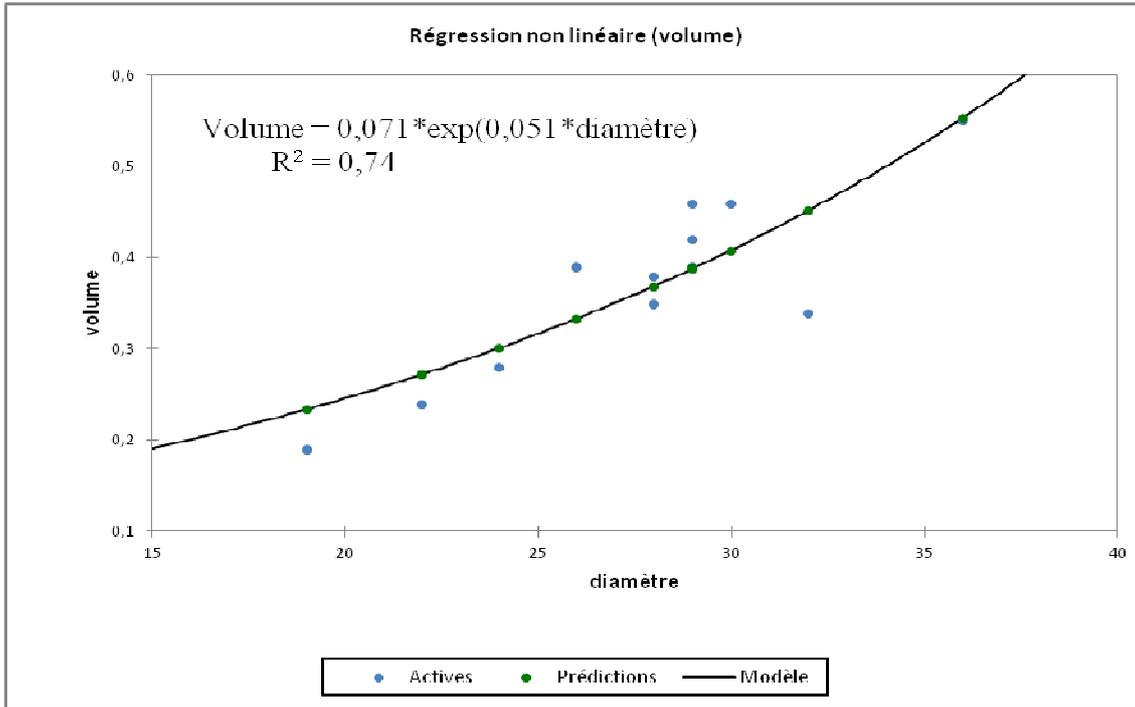


Figure 13: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 15.

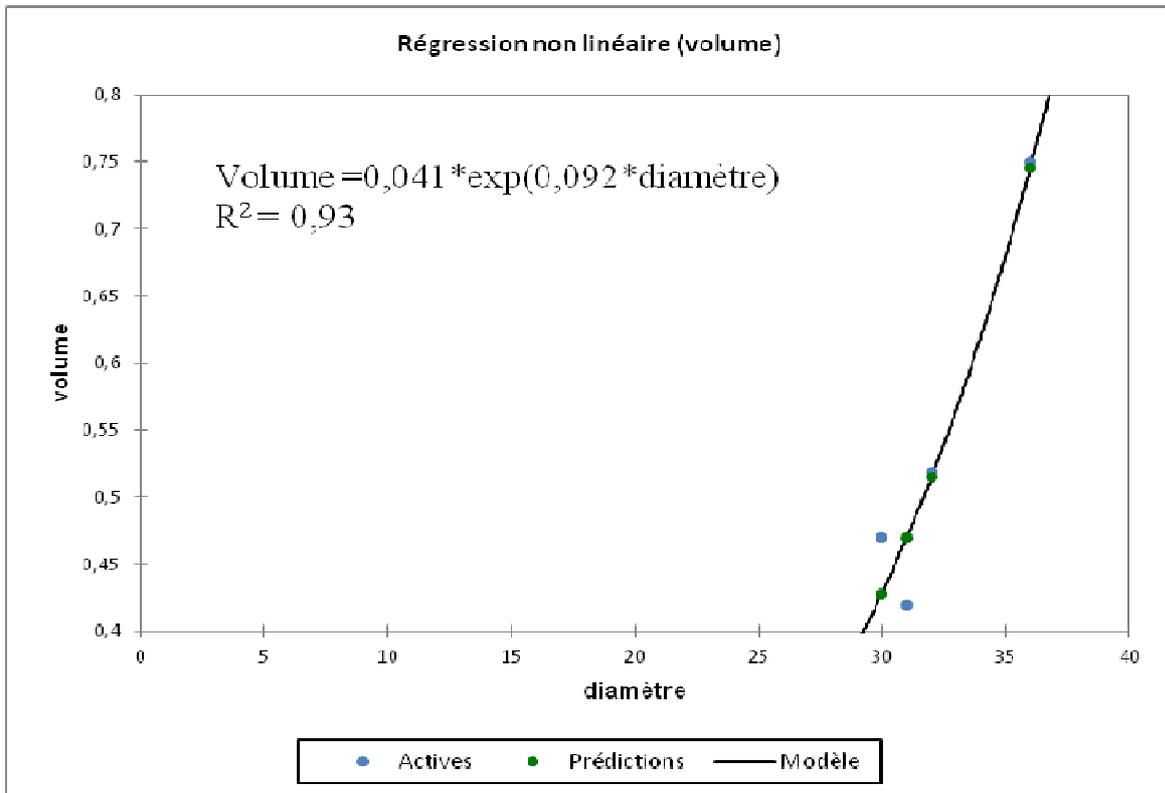


Figure 14: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 16.

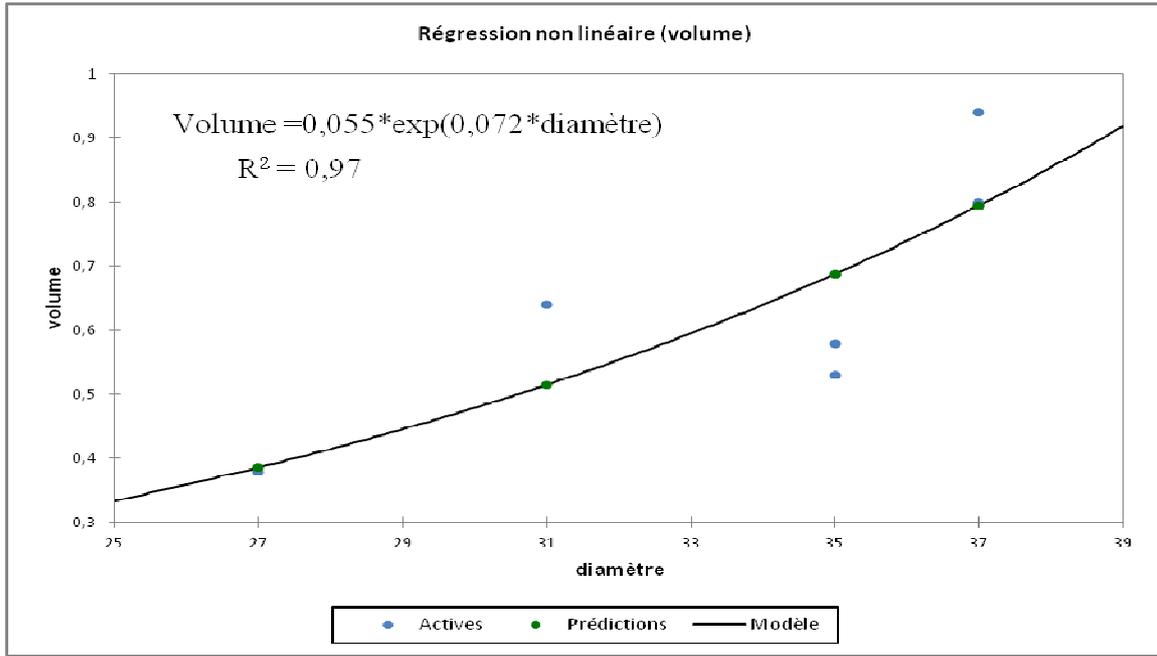


Figure 15: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 17.

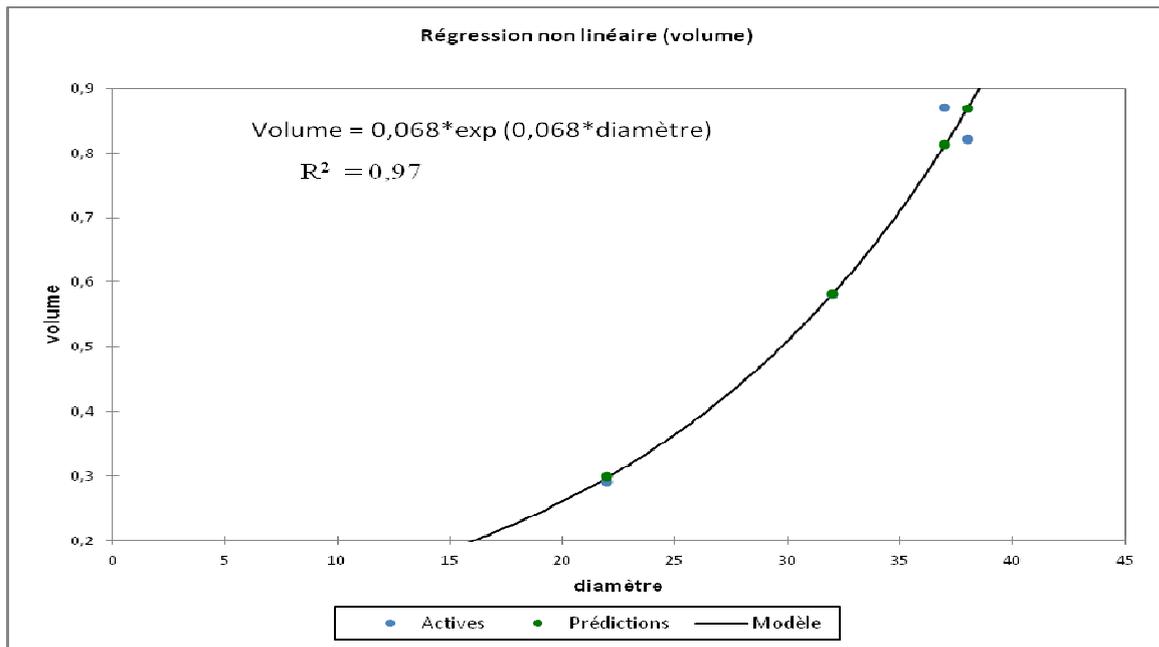


Figure 16: Relation diamètre – Volume pour les arbres de hauteur 18

6. Qualité et précision des ajustements

Pour se prononcer sur la qualité et la fiabilité des modèles statistiques des tarifs de cubage construits, il est nécessaire d'appliquer certains tests arithmétiques et graphiques aux équations des tarifs de cubage à deux entrées ajustées par une analyse des résidus et par un examen visuel.

6.1. Tests statistiques

En plus du coefficient de détermination (R^2) utilisé comme indice pour déterminer le modèle de régression le plus adéquat, nous avons jugé utiles d'en rajouter d'autres encore plus fiables qui nous permettent une bonne évaluation de la fiabilité des modèles des tarifs de cubages que nous avons construit. Ces coefficients sont :

- L' Akaike information Criterion (AIC)
- Le carré moyen résiduel (CMR)

Tous ces tests sont appliqués aux 08 tarifs de cubage élaborés correspondant aux 08 hauteurs d'arbres définies dans l'échantillon des 53 arbres choisis pour la construction des tarifs à deux entrées.

L'AIC est d'autant plus petit que le modèle soit accepté. En ce qui concerne nos résultats il ressort du tableau (11) que les valeurs de l'AIC varient entre « -178.93 » et « -61,15 ». Les modèles d'équations exponentielles pour la hauteur 14 et hauteur 18 montrent respectivement les valeurs minimales et maximales de ce test. En outre tous les autres modèles des six hauteurs restants montrent des valeurs négatives et donc inférieurs à zéro. Ceci montre que les 08 tarifs de cubage élaborés sont acceptables.

Le coefficient de détermination (R^2) quant à lui (tableau 11) détermine le degré de représentativité de la corrélation des deux variables mises en jeu (diamètre et volume) pour chaque hauteur étudiée, les résultats font ressortir que les huit tarifs de cubage (modèles statistiques) présentent des coefficients de régression tous proche de « 1 » à part pour les régressions des hauteurs 13 et 18 qui enregistrent respectivement les valeurs minimales de R^2 de « 0.69 » et « 0.63 ». Globalement, le coefficient de détermination nous a permis donc de choisir le type de régression adéquat pour nos tarifs et il s'avère que c'est le modèle exponentielle qui montre le plus grand coefficient de détermination se rapprochant de « 1 » comparé aux autres modèles mathématiques.

Pour le coefficient résiduel moyen (CMR), quant il tend vers zéro le modèle montre un bon ajustement et que la variance non expliquée par le modèle est minimale.

Les huit modèles mathématiques correspondants aux huit tarifs de cubage construits montrent des coefficients résiduels moyens très inférieures à zéro, il varie entre « 0.000055 » pour la hauteur 11 (le plus petit coefficient résiduel) et « 0.0025 » pour la hauteur 13 (le CMR le plus grand).

Au final nos résultats pour l'analyse des tests statistiques confirment ceux de (RABHI, 2011) où il affirme que les modèles polynomiaux sont les moins adaptés à décrire la croissance en hauteur en fonction de la circonférence ou diamètre et par voie de conséquence à décrire le volume des arbres. Notre recours à l'utilisation de modèles exponentiels s'explique par leur fiabilité à estimer les volumes dans le contexte d'élaboration des tarifs de cubage à deux entrées.

Tableau 11: Tableau récapitulatif des tests arithmétiques.

	H11	H12	H13	H14	H15	H16	H17	H18
R2	0,97	0,96	0,69	0,97	0,74	0,93	0,97	0,63
AIC	-87,26	-81,78	-91,10	-178,93	-145,04	-63,55	-84,12	-61,15
CMR	0,000055	0,00011	0,0025	0,00087	0,0024	0,0011	0,0018	0,0014

6.2. Test graphique (Analyse des résidus)

6.2.1. Histogrammes des résidus figures (17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 et 24)

L'examen visuel des graphes figures (17, 18, 19, 20, 21, 22, 23 et 24) des résidus des huit tarifs de cubage obtenus révèle une grande homogénéité puisque il y a un certain équilibre entre les valeurs négatives et les valeurs positives au tour de la valeur nulle, cette caractéristique est essentielle pour évaluer l'efficacité et la fiabilité d'un modèle est donc d'un tarif de cubage.

Néanmoins, nous remarquons que les plus grands écarts des résidus au tour de la valeur nulle s'observent au niveau des faibles diamètres pour les hauteurs basses « H 11 et H

12 » figures (17,18) et au niveau des gros diamètres pour les grandes hauteurs « H 18 » (figure 24) par contre pour les autres hauteurs, la tendance observée pour les résidus est plutôt homogène entre les valeurs positives et celle négatives (h14 h15 h17) figure (20, 21, 23).

Dans l'ensemble, la disposition des résidus montre que ces derniers s'éloignent légèrement de la valeur nulle d'où l'efficacité et la robustesse de nos tarifs de cubage ce qui signifie que les volumes estimés par ces modèles ne s'écartent que très peu des valeurs observées (Annexe).

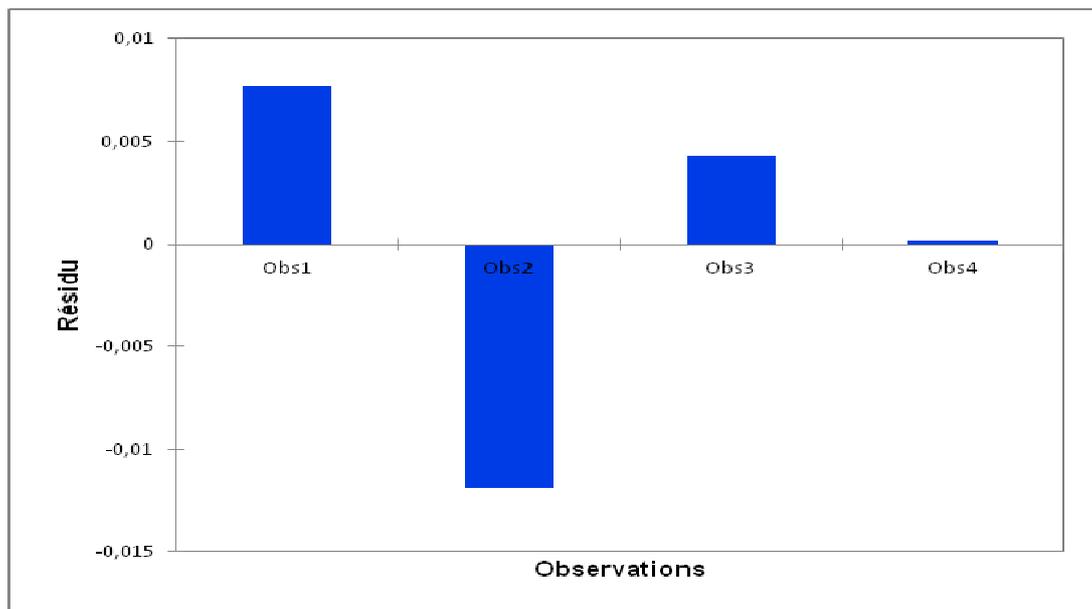


Figure 17: L'historgramme des résidus de la hauteur 11m.

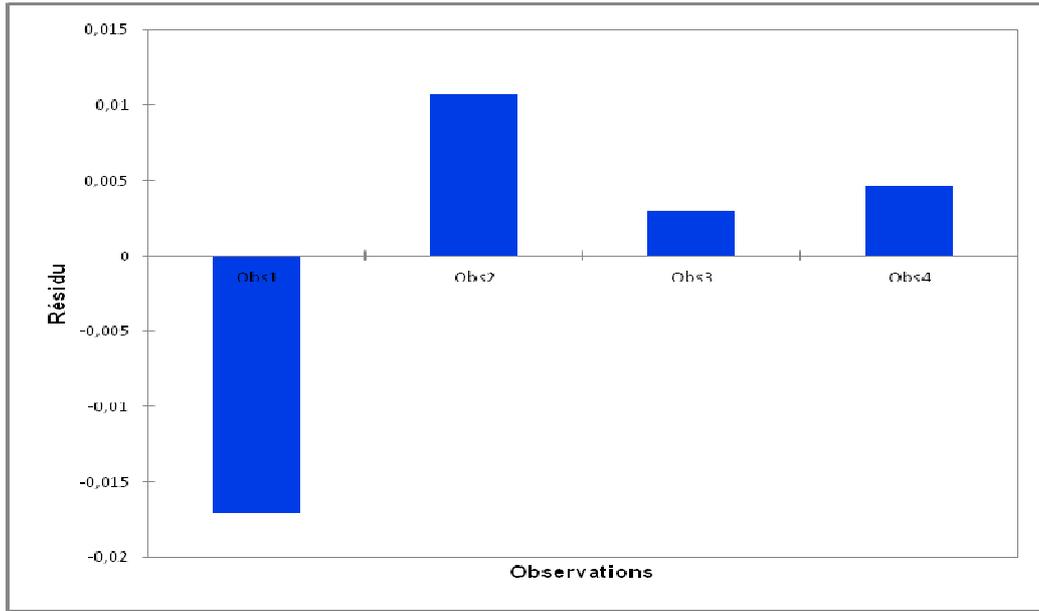


Figure 18: L'historgramme des résidus de la hauteur 12 m.

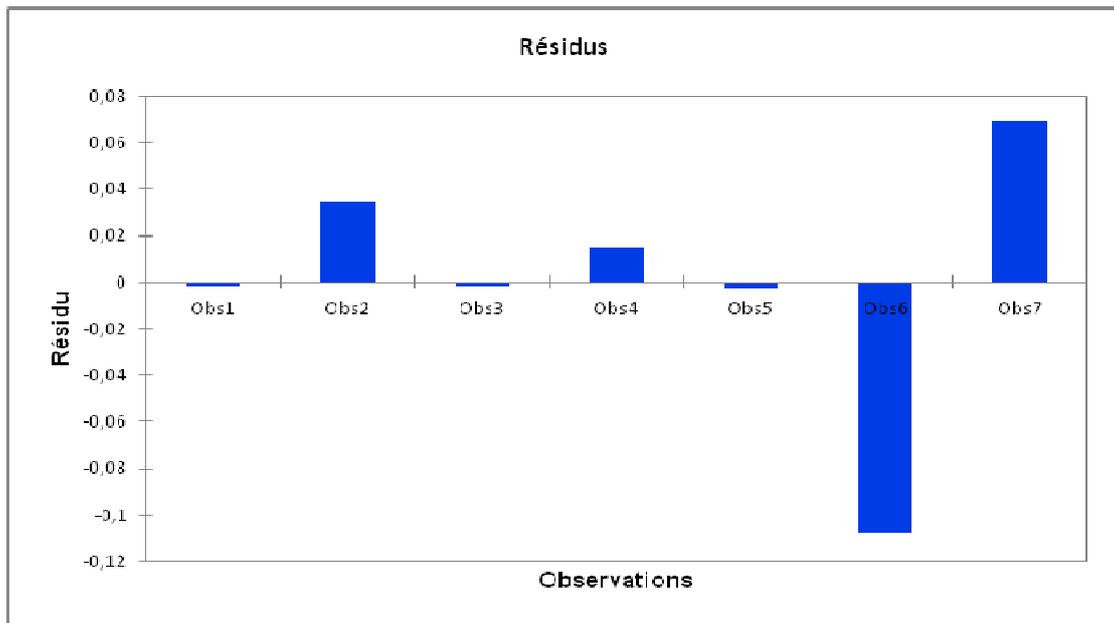


Figure 19: L'historgramme des résidus de la hauteur 13 m.

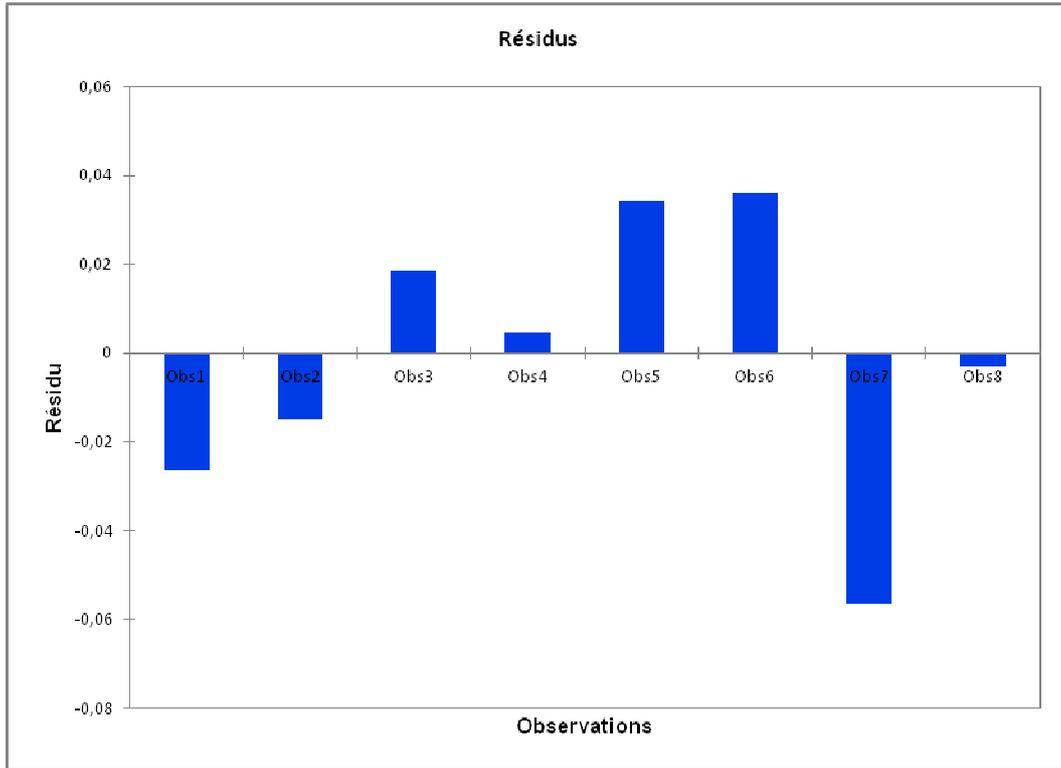


Figure 20: L'histogramme des résidus de la hauteur 14 m.

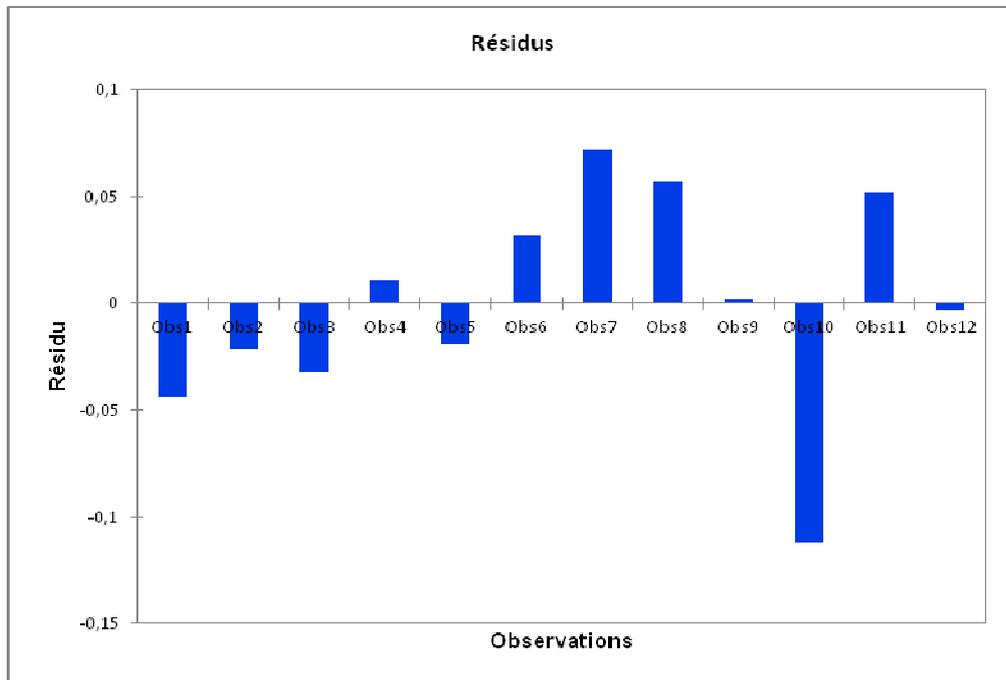


Figure 21: L'histogramme des résidus de la hauteur 15 m.

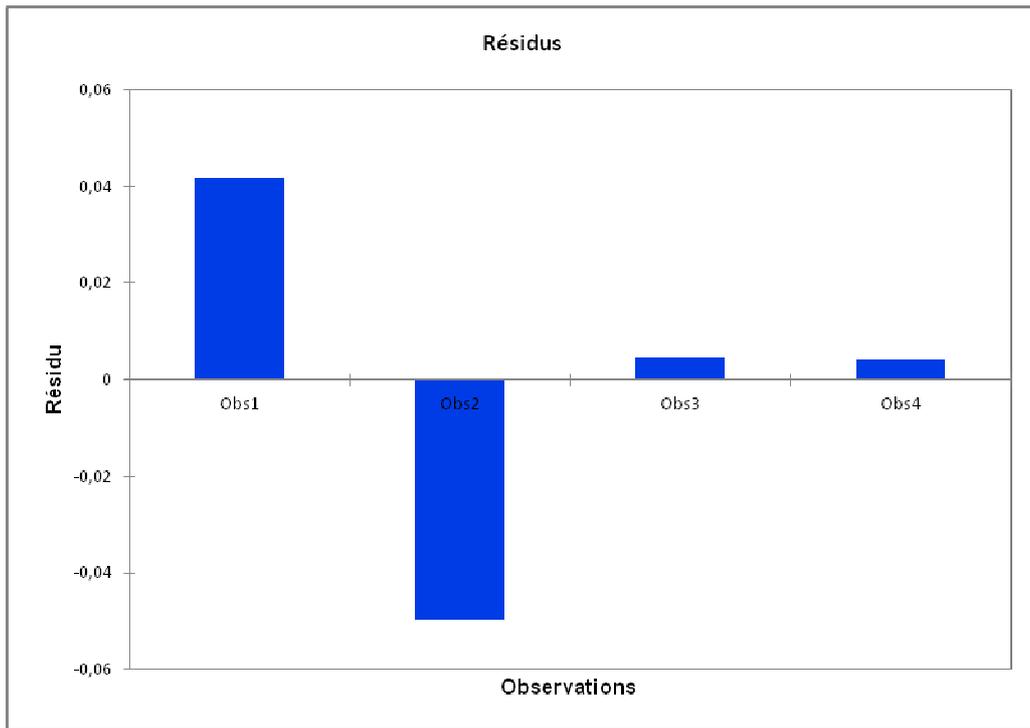


Figure 22: L'histogramme des résidus de la hauteur 16 m.

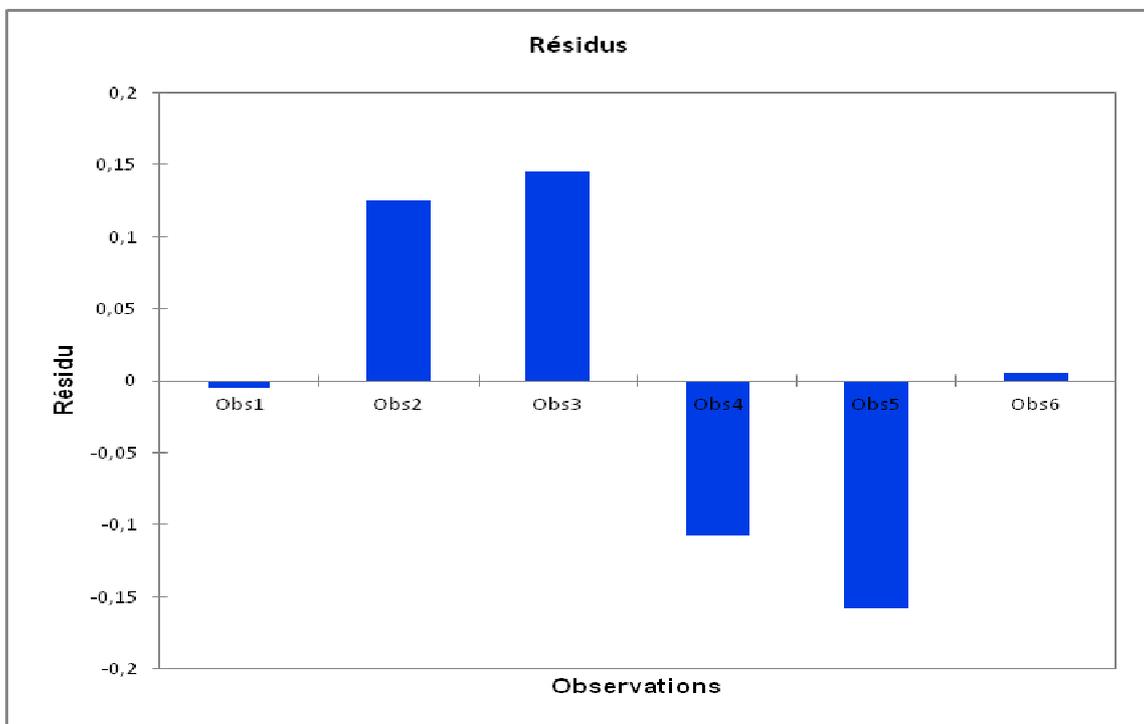


Figure 23: L'histogramme des résidus de la hauteur 17 m.

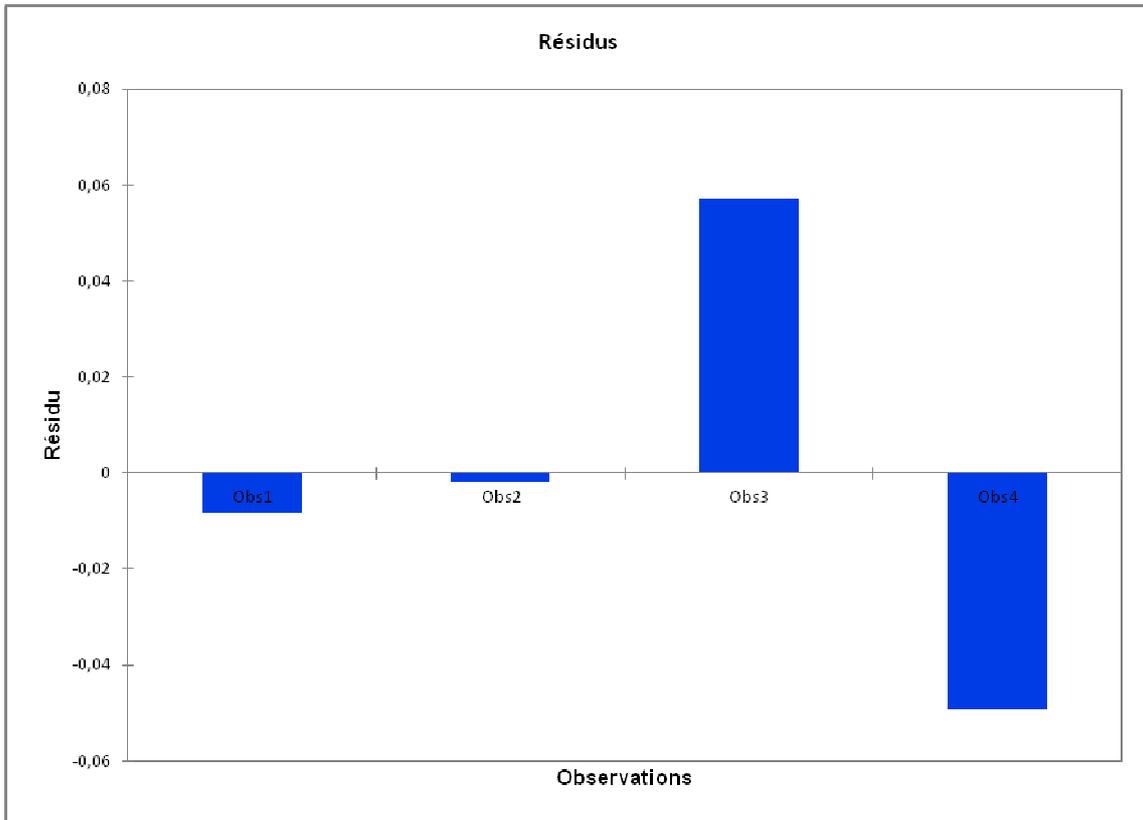


Figure 24: L'histogramme des résidus de la hauteur 18 m.

Conclusion Générale

Dans notre étude, nous avons effectué un travail qui nous a permis de dégager les principales caractéristiques dendrométriques et d'estimer les potentialités productives d'Eucalyptus dans le reboisement industriel de « Sidi-Khlifa », lors de son exploitation. Cette estimation de la production de l'Eucalyptus dans cette zone présente un intérêt indéniable dans la pratique sylvicole.

Un tarif de cubage permet de prédire le volume d'un arbre en fonction de diamètre et la hauteur. En plus de ces paramètres, les modèles mis au point dans cette étude permettent de prédire le volume des tiges allant de 11 m à 18 m avec six classes de diamètre

Par l'étude de la structure, nous avons réussi à montrer que le peuplement de cette zone est plus ou moins équilibré avec un léger déséquilibre en faveur de bois moyen.

De plus, l'approche analytique des variables dendrométriques révèle une moyenne de 14,06 m et de 25,06 cm pour la hauteur et le diamètre respectivement. Cette moyenne nous renseigne sur la bonne fertilité de cette zone et la bonne conduite des tiges.

Le tarif tabulaire élaboré pour le reboisement de « Sidi-Khlifa » contient des valeurs calculées et d'autres valeurs estimées par les modèles ajustés.

Le volume est prédit par le tarif tabulaire à deux entrées, en fonction de DHP et la hauteur totale. En absence de l'un de ces deux paramètres, (la hauteur et/ou le diamètre), une estimation peut être faite à partir du modèle disponible.

Le tarif est valable pour les tiges dont le DHP est inférieur ou égale à 38 cm et dont la hauteur est inférieur ou égale 18 m.

Les modèles d'ajustements établis par la mise en évidence des variables dendrométriques (Diamètre- Volume), ont donné des coefficients de détermination élevés qui sont compris entre 0,63 et 0,97 pour les différentes catégories de hauteur ainsi que les tests arithmétiques appliqués ont montré des résultats satisfaisants.

Enfin ce travail constitue une base pour d'autres études approfondies pour mieux cerner la problématique.

Il serait nécessaire de recommander d'augmenter le nombre de tiges inventoriées ainsi qu'une technique d'échantillonnage plus efficace avec un nombre conséquente d'arbres échantillonné à abattre pour cerner tous les hauteurs et tous les diamètres existants.

Ultérieurement il serait intéressant d'élargir cette étude aux autres noyaux de reboisement et d'essayer de cerner les facteurs limitant la production afin de dégager une politique globale de gestion en matière sylvicole pour une meilleure production dans les années à venir.

Il serait aussi judicieux de vérifier l'efficacité et la fiabilité de ces tarifs de cubage que nous avons élaboré sur le terrain en faisant quelque placettes d'échantillonnages et de comparer les volumes observés à ceux estimés par nos tarifs de cubage.

Bibliographie

Bibliographie

- ABADIE, J., & AYRAL, P. (1956). Méthode de calcul du volume des peuplements sur pied dans les places d'essais de sylviculture. Ann. Ec. Natl. Eaux Forêts 15, 1-135.
- ALDEK, D. (1980). Estimation des volumes et des accroissements des peuplements forestiers. Vol. 2 : Etude et prévision de la production. Forêt 22/2, Rome, FAO, 229 P.
- Anonyme, 2. (1981). Dictionnaire. Ed. librairie AROUSSE, 487 p.
- ASSAD, A., & SIDOTMANE, M. (1994). Contribution à l'établissement des tarifs de cubage des Eucalyptus dans le reboisement industriel de Tigrine (Azeffoun). Thèse d'ing. UMMTO, 37 p.
- EVERY, T. E., & BURKHART, H. E. (1983). Forest measurements. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 331 p.
- EVERY, T. K. (1975). Natural resources measurements. 2nd ed. New York, McGraw-Hill, 339 p.
- BAGNOULS, F., & GAUSSEN, H. (1993). Saison sèche et indice xéothermique. Bull. Soc. Hist. Nat. de Toulouse, 88 : 193-240.
- BASKERVILLE, G. L. (1972). Use of logarithmic expression in the estimation of plant biomass. Can: J. Forest Res. 2, 49-53.
- BEAL, D. J. (2005). SAS Code to Select the Best Multiple Linear Regression Model for Multivariate Data Using Information Criteria. Science Applications International Corporation (SAIC), Tennessee, USA, 6 p.
- BECHKOK, L. (1978). Etude de la productivité de l'Eucalyptus cladocalyx F.V.M dans la forêt de Bainem. Thèse d'ing INA, 50 p.
- BOUCHON, J. (1974). les tarifs de cubage . Nancy: Institut National de Recherches Forestières et Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, 135 p.
- BOUDRU, M. (1989). Forêt et sylviculture: Sylviculture appliquée. Ed. Les presses agronomiques de Gembloux (Belgique), 248 p.

Bibliographie

- BOUDY, P. (1952). Guide du forestier en Afrique du nord. Ed. Maison rustique paris, 505 p.
- BRUCE, D. (1920). A proposed standardization of the checking of the volume tables. J. For 18, 544-548.
- CAILLIEZ, F. (1980). Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers (avec référence particulière aux forêts tropicales). Vol. 1: Estimation des volumes. Forêts 22/1. Rome, FAO 229 P.
- CALTECHNICA. (1972). Rapport de présentation de l'unité forestière, unité de reboisement industriel d'Azeffoun. Vol 1 de 2. pp 60-125, vol 2 de 2. pp 245-257.
- CARPENTIER, J. P. (1996). Modilisation de rendement de la production des bétulaies jaunes à résineux .Mémoire de recherche forestière .N° 121. Gouvernement du Québec .Ed cap-saint-ignac et Sainte Marie (Beauce) 235p.
- DAGNELIE, P. (1973). Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. Vol. 2. 2e éd Gembloux, Presses agronomiques de Gembloux, 378 p.
- DAGNELIE, P. (1975c). Analyse statistique à plusieurs variables . Gembloux: Presses agronomiques de Gembloux, 492 p.
- DAGNELIE, P., & al. (1976; 1985). tables dendrométriques. Gembloux, Presses agronomiques de Gembloux, 128 p.
- DAJOZ, R. (2000). Insects and forests. The role and diversity of insects in forest environment. Paris: Intercept Ltd / Edition Technique et Documentation/Lavoisier Publishing, 668 p.
- DECOURT, N. (1971). comparaison des équations de régression. Application au cubage des peuplements d'épicéa commun. Ann. Sci. for. 29, 51-58.
- DRAPER, N., & SMITH, H. (1966). Applied regression analysis. New York: Wiley, 407 p.
- DUPLAT, P., & TRAN-HA, M. (1974). Tarifs de cubage pour l'estimation des sapins et des épicéas dans les Alpes du Nord. . Bull. Tech. Off. Natl Forêts 6, 3-18.
- F.A.O. (1982). Les Eucalyptus dans les reboisements. Collection F.A.O forêt, N° 11, 753 p.

Bibliographie

- FAO. (2000). Rapport de la direction générale des forêts, forêts et reboisement en Algérie.
- FONWEBAN, J. N., & HOULLIER, F. (1995). Modèle de croissance en hauteur à partir de placettes temporaires pour l'eucalyptus saligna au Cameroun. *Ann. sci. forest.*, 52 (3), pp. 263-281.
- FREESE, F. (1978b). Elementary statistical methods for foresters. Agriculture Handbook n° 317. USDA Forest Service, 87 p.
- GEVORKIANTZ, S. R., & OLSEN, L. P. (1995). Composite volume tables for timber and their application in the lake states. Technical Bulletin no 1104. USDA Forest Service. Cité par Husch et al (1982).
- HUSCH, B., & al. (1982). Forest mensuration. 3rd ed. New York: Wiley, 402 p.
- KOZAK, A. (1970). A simple method to test parallelism and coincidence for curvilinear regressions. In: IUFRO 3rd Conference Advisory Group of Forest statisticians, Section 25. Publication 1972-3. Jouy-en-Josas, INRA, 133-145.
- LAMONT, R. H., TROCHLIL, R. C., & MEYER, M. P. (1996). A test of a composite local aerial stand volume table outside the locality of origin. *Minnesota Forestry Research Notes* 168, 2 p.
- LETREUCH, N. (1980). Les reboisements industriels en Algérie et leurs perspectives. Thèse de doctorat d'état en sciences agronomiques. Ed. OPU. Vol 1 et 2, 648 p.
- LOETSH, F., ZOHRER, F., & HALLER, K. E. (1973). Forest inventory. Vol. 2. München; BLV Verlagsgesellschaft, 469 p. .
- METRO, A. (1970). Les Eucalyptus dans le monde méditerranéen, revue forestier française N° 3, class Oxford 174 Eucalyptus (4-015) pp 339-354).
- MEZIANE, H. (1996). Les Eucalyptus en Algérie - Revue. La forêt Algérienne. Magasine d'information sur la protection et la conservation de a forêt Mars. 1996 n° 1. Ed I.N.R.F - Bainem - Alger, pp 5-10.
- MUTIN, G. (1977). La Mitidja, décolonisation et aspect géographique. Ed. Office Presse Universitaire, Alger, 606 p.

Bibliographie

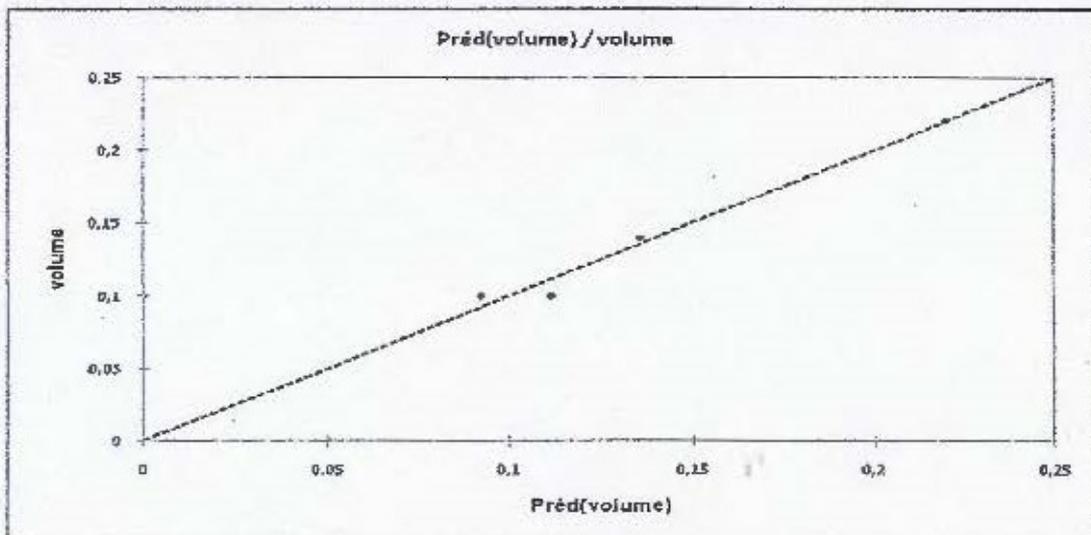
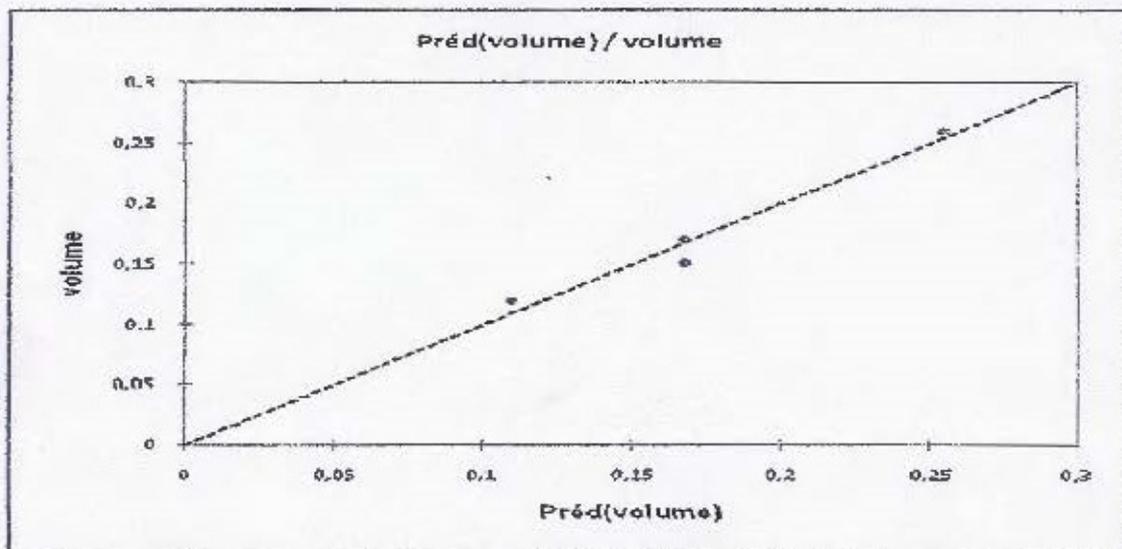
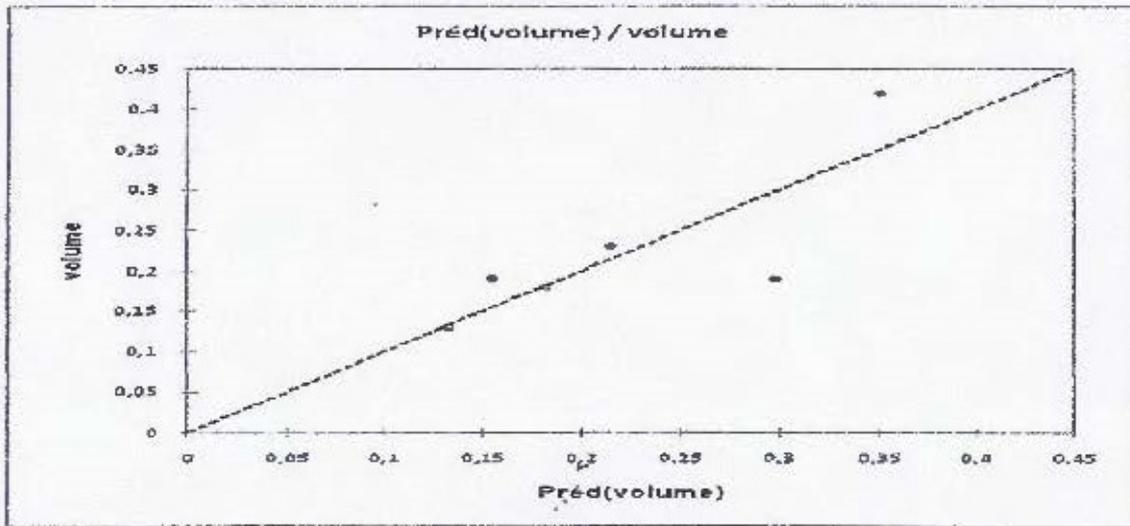
- MUTIN, G. (1977). La Mitidja, décolonisation et aspect géographique. Ed. Office.
- NEDJAH, A. (1988). Sylviculture et production des Eucalyptus. . Bulletin technique forestier N°26. pp 43-50.
- OTOUL, C., & RONDEUX, J. (1988). Construction d'un tarif de cubage à l'aide d'un micro-ordinateur. Rev. For. Fr. 40, 41-48.
- PALM, R. (1981). Contribution méthodologique au cubage des arbres et à la construction des tables de cubage et d'assortiments. Thèse de doctorat,. Gembloux: Faculté des sciences agronomiques de Gembloux, 247 p. + 47 ann.
- PALM, R., & RENDOUX, J. (1976). A propos de deux problèmes rencontrés dans la construction de tarifs de cubage: le choix des équations de regressions et l'échantillonnage des arbres. Bull. Rech. Agron. Gembloux, 11 243-258.
- PAUWELS, D., THIBAUT, A., LEJEUNE, P., & RONDEUX, J. (1999). Elaboration de courbes de croissance en hauteur dominante pour les mélèzes (*Larix decidua* Mill. et *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) en Belgique méridionale. Ann. Sci. Forest, 56 (1), pp. 27-34.
- PITA CARPENTER, P. A. (1967). Tablas de cubicacion por diametros normales y alturas totales. madrid: Instituto Forestale Investigaciones y Experiencias, 73 p.
- POLLANSCHUTZ, J. (1965). Eine neue Methode der Formzahl-und .Massenbestimmung stehender Stamme. Mitt. Forstl. Bundesversuchsanst. Wien, 68, 186 p.
- RABHI, K. (2011). Ajustement de modèles hauteur – circonférence – âge pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans la forêt d'Akfadou (Tizi ouzou); effet de la densité et de la station. diplôme de Magister. Faculté des sciences de la nature et de la vie, des sciences de la terre et de l'univers. Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen
- RENIER, H. J. (1953). Les Eucalyptus en Australie et en Tasmanie, eur écologie et leur utilisation en rapport avec les possibilités d'introduction et de multiplication au congo belge et au Roanda, publications de la DAFE de Belgique- Bruxelles, 8 p.
- RONDEUX, J. (1993). La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Presses Agro. de Gembloux. (B), 521 p.

Bibliographie

- RONDEUX, J. (1999). la mesure des arbres et des peuplements forestiers. 2nde édition - Les presses agronomiques de Gembloux.
- SCHMID, P., & al. (1971). The optimal determination of the volume standing trees. Forstl. Bundesversuchsanst. Osterreichs 91, 33-35.
- SCHMITT, R., & SCHNEIDER, B. (1959). Die Aufstellung von Massentafeln nach der Methode der kleinsten Quadrate. Mitt. Hess. Landesforstverwalt. 2, 56 p.
- SCHUTZ, J. P. (1990). Sylviculture 1. Principes d'éducation des forêts Presses polytechniques et universitaires Romandes, 243 p.
- SEIGUE, A. (1985). Les forêts circumméditerranéenne et ses problèmes. Ed. maison neuve et larousse, 502 p.
- SELTZER, P. (1946). Les climats de l'Algérie. Trav. Inst. Mét. Phys. Glo., Algérie, hors-série.
- SPURR, S. H. (1952). Forest inventory. New York: The Ronald Press Company, 476 p.
- Statistics from FAO, F. (2010). Les eucalyptus dans le monde. Conférence : « L'eucalyptus une essence majeure pour le reboisement à Madagascar » (pp. 3-4). Antananarivo-Madagascar: Ankatso – Université d'Antananarivo.
- TABTI, M., & SEDAOU, Y. (1991). Contribution à l'étude de la productivité d'un taillis d'Eucalyptus dans le reboisement de Tigrine. Th.Ing UMMTO, 75 P.
- TABTI, S., & CHERFI, O. (2001). Evaluation des potentialités de régénération par rejets de souche de l'Eucalyptus cladocalyx F.V.M cas du reboisement industriel de M'latha. Thèse d'ing. UMMTO, 77 p.

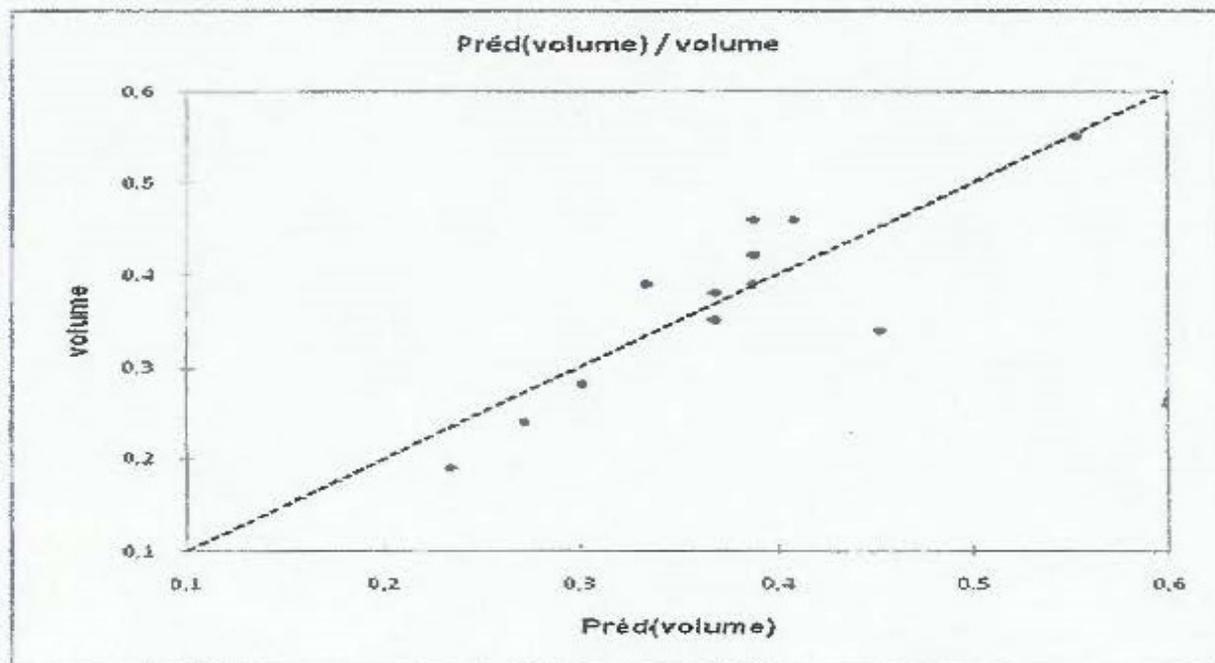
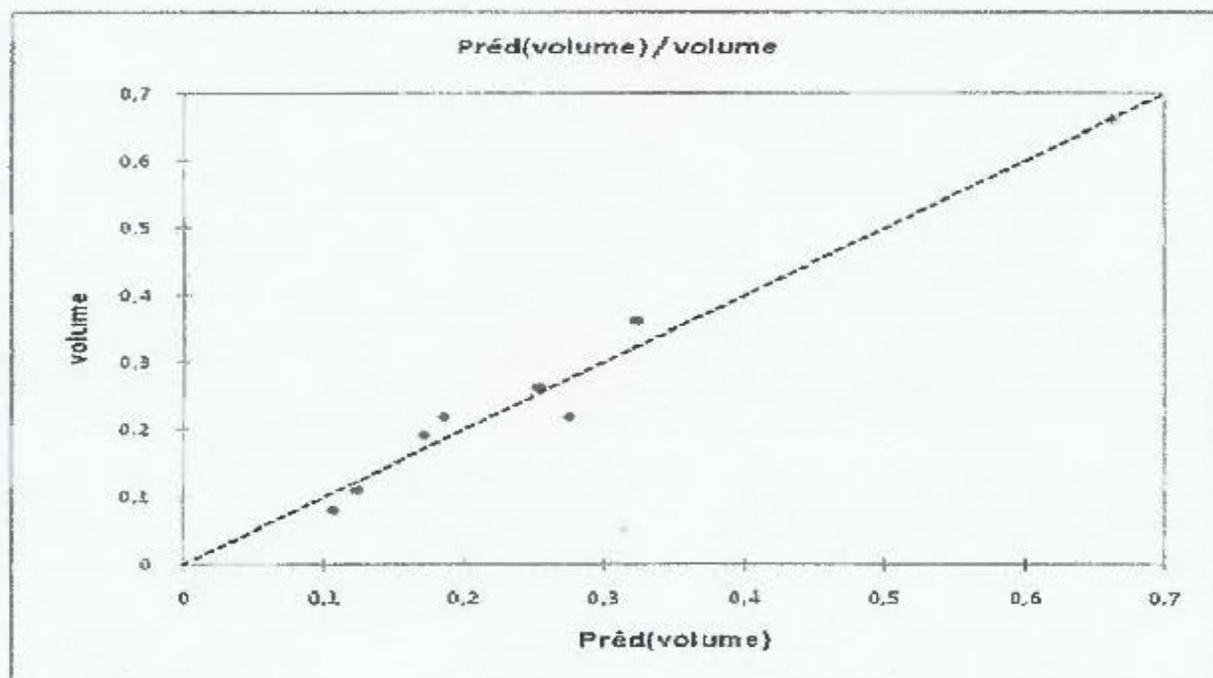
Annexe 01

Prédiction volume- volume pour les arbres de hauteurs (11, 12, 13 m)



Annexe 02

Prédiction volume- volume pour les arbres de hauteurs (14, 15 m)



Annexe 03

Prédiction volume- volume pour les arbres de hauteurs (16, 17, 18 m)

