

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ BATNA 1 HADJ LAKHDAR – BATNA–
INSTITUT DES SCIENCES VÉTÉRINAIRES ET DES SCIENCES AGRONOMIQUES
DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES
Laboratoire d'amélioration des productions agricoles et protection des ressources en zones arides (LAPAPEZA)



THÈSE

Présentée par

ZEGHICHI Khedidja

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat (L.M.D)

En sciences agronomiques

Spécialité : Sciences Forestières

THÈME

Modélisation de la croissance et de la production, orientée à la gestion et la conservation du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans les Aurès.

Soutenue publiquement le : 25/11/2024

Devant le jury composé de :

Président :	Beghami Yassine	Professeur	Université de Batna 1
Directrice de thèse :	Kherchouche Dalila	Professeur	Université de Batna 1
Co-directeur de thèse :	Sghaier Tahar	Professeur	INRGREF (Tunis)
Examineur :	Aissi Abdeldjalil	Maître de conférences	Université de Batna 1
Examineur :	Bekdouche Farid	Professeur	Université de Batna 2

Année universitaire : 2024/2025

In memoriam

C'est avec une profonde tristesse que je dédie ce travail à la mémoire de deux personnes chères à mon cœur, absentes, mais toujours présentes dans ma mémoire pour toujours ;

À la mémoire de mon père, *Chafâai*, qui m'a transmis la valeur du travail acharné, de la persévérance et de la recherche du savoir.

Malgré ton absence physique, l'amour et le soutien que j'ai reçu en ta présence seront là pour me guider pour le reste de ma vie.

À Mr. *Bentouati Abdallah* qui nous a quittés avant son achèvement, son soutien inestimable, ses précieux conseils ainsi que sa contribution fondamentale ont été déterminants tout au long de mon parcours en foresterie où j'ai bénéficié de sa vaste expérience et de son engagement indéfectible envers la recherche.

Monsieur *Bentouati Abdallah* restera à jamais dans nos mémoires comme un professeur dévoué et un chercheur d'exception, dont l'influence se fera sentir pendant de nombreuses années. Sa gentillesse et sa disponibilité ont marqué tous ceux qui l'ont côtoyé.

Certainement, son héritage marqué par une rigueur scientifique exceptionnelle et une profonde humanité, continuera à inspirer les générations futures de chercheurs.

Dédicace

C'est avec un grand honneur que je dédie ce travail à la plus forte femme que j'ai jamais vue ; à ma *mère* qui a connu les épreuves de la guerre de révolution et a su faire preuve d'une force et d'une résilience extraordinaires. Son courage et sa détermination ont été une source d'inspiration constante dans ma vie et me donnent la force d'affronter les défis. Son amour inconditionnel et son soutien indéfectible ont toujours été mes plus précieux alliés.

À mon cher frère et à mes sœurs bien-aimées ainsi qu'à leurs petites familles qui ont toujours cru en moi et m'ont encouragée à poursuivre mes ambitions ; votre confiance et votre encouragement ont été des moteurs essentiels dans mon cheminement vers la réussite.

À mes neveux et nièces, en grandissant j'espère être un exemple d'amour, de compassion et de bienveillance. J'aimerais qu'ils puissent me voir comme une source d'inspiration pour relever des défis et poursuivre leurs passions.

À mes confidentes, mes chères et fidèles cousines, Meriem et Afifa.

À la meilleure BEZZIH Houda.

Remerciements

Un grand merci à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail même avec une simple parole encourageante.

Je tiens aussi à exprimer ma sincère gratitude à Mme. KHERCHOUCHE Dalila, ma directrice de thèse, pour avoir accepté de prendre la relève de Mr. BENTOUATI Abdallah paix à son âme. Je vous suis profondément reconnaissante pour votre expertise, votre compréhension, votre bienveillance et votre confiance que vous m'avez accordées ainsi que votre engagement à me guider qui m'ont permis de poursuivre mon travail de thèse avec détermination.

Je remercie vivement mon co-directeur de thèse Mr. SGHAIER Tahar pour son soutien indéfectible, sa grande contribution et son expertise précieuse. Votre engagement à transmettre votre savoir et vos conseils avisés m'ont permis d'apprendre et d'approfondir ma compréhension du domaine de la modélisation et de mener à bien mes recherches. Je vous suis particulièrement reconnaissante ainsi qu'à votre aimable famille pour votre générosité, votre accueil chaleureux et votre hospitalité.

Je remercie sincèrement Mr. BEGHAMI Yassine pour l'honneur qu'il m'a fait en présidant mon jury de thèse. Un grand merci de la part de votre étudiante.

Mes remerciements vont également à Mr. BEKDOUCHE Farid professeur à l'université de Batna 2 pour son implication dans l'évaluation de mon manuscrit. Je suis très honorée de votre présence au sein du jury.

Je remercie particulièrement mon collègue Mr. AISSI Abdeldjalil pour son soutien et son encouragement. Je suis également très honorée de votre présence parmi les membres du jury.

Je tiens à remercier tout le personnel de la circonscription de Bouhmama notamment Mr. NOUASRI Saïd de m'avoir facilité le déplacement et le travail sur terrain.

Résumé

Le massif de Beni Imloul, avec sa vaste étendue et ses précieuses valeurs écologiques et économiques, offre un potentiel de production considérable qui demeure largement sous-exploité. En dépit de leur importance, les ressources de ce massif forestier n'ont pas encore été soumises à des études approfondies pour en maximiser la valorisation. Cette recherche, centrée sur la modélisation de la croissance et de la production du pin d'Alep dans ce massif, a pour objectifs d'élaborer des modèles de croissance et des tables de production qui permettent d'optimiser sa gestion et sa valorisation. En effet, la modélisation de la croissance et de la production des peuplements forestiers est essentielle de nos jours pour garantir une gestion optimale et durable des ressources forestières. Cette approche permet de prévoir l'évolution des caractéristiques des peuplements forestiers au fil du temps, en intégrant des facteurs écologiques, climatiques et anthropiques. En utilisant des modèles spécifiques et précis, il est possible d'optimiser les pratiques sylvicoles, de planifier des récoltes durables et de mieux appréhender les impacts des changements environnementaux sur la croissance et la production des massifs forestiers.

Pour répondre aux objectifs de cette recherche qui vise à élaborer (i) des tarifs de cubage globaux et marchands pour la prédiction du bois fort à l'échelle arbre, (ii) un modèle d'indice de site et (iii) des sous-modèles et des tables de production pour la sylviculture observée et celle proposée, basée sur un indice d'espacement entre arbres qui dépend de la hauteur dominante du peuplement, nous avons commencé par la collecte des données selon un protocole d'échantillonnage adéquat élaboré préalablement comme suit :

1° Les données utilisées pour établir les tarifs de cubage globaux et marchands sont issues de 209 arbres représentatifs prélevés dans la zone d'étude. Outre les mesures du diamètre à hauteur de poitrine (DBH) et de la hauteur totale (H), des diamètres ont été mesurés à différentes hauteurs de coupe, allant de la base jusqu'à la section fin-bout correspondant à un diamètre de 7 cm.

2° Pour développer un modèle d'indice de site ou de hauteur dominante en fonction de l'âge et établir les classes de fertilités des peuplements étudiés, un total de 30 arbres ont été échantillonnés dans le même massif forestier et ont fait l'objet des analyses de tiges. Comme les longueurs des sections transversales ne coïncidaient pas avec la croissance en hauteur périodique, les données hauteur/âge issues de l'analyse de tiges ont été corrigées en utilisant la méthode de Carmean (Carmean 1972). Ces corrections éliminent le biais lorsque nous supposons que la hauteur de la section est la hauteur maximale atteinte à un âge donné.

3° L'élaboration des tables de production requiert, en plus des tarifs de cubage individuels et du modèle d'indice de site, l'intégration de sous-modèles complémentaires adaptés, ajustés indépendamment de l'âge et de la productivité de la station. À cette fin, 60 placettes temporaires de forme circulaire, d'une superficie variant entre 19 et 25 ares, ont été échantillonnées dans le massif forestier de Beni Imloul. Des mesures du diamètre à hauteur de poitrine (DBH) de tous les arbres de la placette, ainsi que la hauteur totale d'un échantillon d'arbres sélectionnés de manière systématique, ont été réalisées. L'âge de l'arbre dominant de chaque placette a été établi par un procédé de carottage.

Les résultats de cette recherche peuvent être résumés comme suit :

- Élaboration de deux tarifs de cubage globaux : l'un à une entrée et l'autre à deux entrées, avec des niveaux de précision respectifs de 88% et 94%. Deux tables de cubage ont été établies sur la base de ces tarifs, affichant des coefficients de variation d'environ 22% et 16%, respectivement.

- Développement d'un système d'équations pour le calcul du défilement et des volumes des grumes, en considérant des diamètres et des longueurs variables (volumes marchands), avec une précision allant de 82% à 97%. Grâce à ce système, il est possible de prédire le volume d'une grume jusqu'à un diamètre fin-bout donné ou pour une longueur spécifique de la grume, ainsi que d'estimer le diamètre d'une grume à un niveau de coupe donné ou la longueur d'une grume pour un diamètre fin-bout spécifique. Une table de production des volumes marchands a été élaborée à partir de ce système d'équations, spécifiquement pour un diamètre fin-bout de 20 cm.

- Élaboration d'un modèle d'indice de site exprimé sous forme différentielle, dérivée de la fonction de base de Lundqvist-Korf (Lundqvist, 1957) et ajusté selon l'approche GADA (Generalized Algebraic Differences Approach) avec une précision atteignant 98%. Grâce à ce modèle, et en fixant l'âge de référence à 100 ans, les peuplements de pin d'Alep du massif de Beni Imloul ont été classés en trois catégories ou classes de productivité : 16,5 m ; 14,0 m et 11,5 m, respectivement.

- Élaboration de quatre sous-modèles complémentaires décrivant : (i) la relation entre la hauteur moyenne et la hauteur dominante du peuplement, (ii) le diamètre moyen quadratique en fonction de la densité et de la hauteur dominante, (iii) le volume par hectare du peuplement en fonction de la densité, de la hauteur dominante et du diamètre quadratique moyen, et (iv) la densité du peuplement en fonction de la hauteur dominante et de l'âge. Les précisions de ces sous-modèles sont respectivement de l'ordre de 55%, 78%, 99% et 37%. Grâce à ces sous-modèles et au modèle d'indice de site, deux tables de production ont été élaborées pour chacune des trois classes de productivité identifiées dans le massif forestier de Beni Imloul. La première table présente la sylviculture moyenne observée, tandis que la seconde propose une sylviculture fondée sur l'utilisation d'un indice d'espacement en fonction de la hauteur dominante du peuplement. Pour des volumes totaux de bois sur pied comparables, les diamètres quadratiques moyens obtenus à l'âge de référence de 100 ans pour chacune des trois classes de productivité (16,5 m, 14,0 m et 11,5 m) sont respectivement de 33,49 cm, 26,04 cm et 19,4 cm pour la sylviculture observée, et de 45,67 cm, 38,12 cm et 31,34 cm pour la sylviculture proposée.

Les outils et tables de gestion élaborés à l'issue de cette étude offrent aux gestionnaires forestiers des informations clés pour optimiser l'aménagement et la planification, favorisant ainsi une exploitation durable et une valorisation économique accrue du pin d'Alep dans le massif forestier de Beni Imloul en Algérie.

Mots clés : *Pinus halepensis* Mill., tarifs de cubage, volumes marchands, indice de site, tables de production, sylviculture, Beni Imloul.

Abstract

The Beni Imloul massif, with its vast extent and valuable ecological and economic values, offers considerable production potential that remains largely under-exploited. Despite their importance, the resources of this forest massif have not yet been subjected to in-depth studies to maximize their valorization. This research, focused on modeling the growth and yield of Aleppo pine in this massif, aims to develop growth models and yield tables that allow to optimize its management and valorization. Indeed, modeling the growth and yield of forest stands is essential nowadays to ensure optimal and sustainable management of forest resources. This approach allows to predict the evolution of forest stand characteristics over time, incorporating ecological, climatic, and anthropogenic factors. By using specific and precise models, it is possible to optimize silvicultural practices, plan sustainable harvests, and better understand the impacts of environmental change on the growth and yield of forest massifs.

To meet the objectives of this research, which aims to develop (i) global and merchantable volume equations for the prediction of sound wood at the tree scale, (ii) a site index model and (iii) sub-models and yield tables for observed and proposed silviculture, based on a spacing index between trees which depends on the stand's dominant height, we began by collecting data according to an adequate sampling protocol previously developed as follows:

1° The data used to establish the global and merchantable volume equations are derived from 209 representative trees taken in the study area. In addition to the measurements of diameter at breast height (DBH) and total height (H), diameters were measured at different cutting heights, ranging from the base to the top section corresponding to a diameter of 7 cm.

2° To develop a site index or dominant height versus age model and establish the fertility classes of the studied stands, a total of 30 trees were sampled in the same forest massif and were subjected to stem analysis. As cross transversal sections lengths do not coincide with periodic height growth, the height/age data from the stem analysis were corrected using Carmean's method (Carmean, 1972). These corrections eliminate the bias when we assume that the section height is the maximum height reached at a given age.

3° The development of yield tables requires, in addition to individual volume equations and the site index model, the integration of adapted complementary sub-models, adjusted independently of the age and productivity of the station. To this end, 60 temporary circular plots, with an area ranging in size between 19 and 25 ares, were sampled in the Beni Imloul forest massif. Measurements of diameter at breast height (DBH) of all trees in the plot, as well as the total height of a systematically selected sample of trees, were taken. The age of the dominant tree in each plot was determined by core sampling.

The results of this research can be summarized as follows:

- Development of two global volume equations: one with a single entry and the other with two entries, with respective accuracy levels of 88% and 94%. Two volume tables were established based on these volume equations, displaying coefficients of variation of approximately 22% and 16%, respectively.

- Development of an equations system for calculating taper and logs volumes, considering variable diameters and lengths (merchantable volumes), with an accuracy ranging from 82% to 97%. Thanks to this system, it is possible to predict the volume of a log up to a given top diameter or for a specific length log, as well as to estimate the diameter of a log at a given cutting level or the length of a log for a specific top diameter. A yield table of merchantable volumes was established based on this equations system, specifically for a top diameter of 20 cm.

- Development of a site index model expressed in differential form, derived from the Lundqvist-Korf basis function (Lundqvist, 1957) and fitted using the GADA approach (Generalized Algebraic Differences Approach) with an accuracy reaching 98%. Thanks to this model, and setting the reference age at 100 years, the Aleppo pine stands in the Beni Imloul massif were classified into three categories or productivity classes: 16.5 m; 14.0 m and 11.5 m, respectively.

- Development of four complementary sub-models describing: (i) the relationship between average height and dominant height of the stand, (ii) the quadratic mean diameter as a function of density and dominant height, (iii) stand volume per hectare as a function of density, dominant height, and quadratic mean diameter, and (iv) the stand density as a function of dominant height and age. The accuracies of these sub-models are 55%, 78%, 99% and 37% respectively. Using these sub-models and the site index model, two yield tables were developed for each of the three productivity classes identified in the Beni Imloul forest massif. The first table presents the average observed silviculture, while the second proposes a silviculture founded on the use of a spacing index according to the stand's dominant height. For comparable total standing timber volumes, the mean quadratic diameters obtained at the reference age of 100 years for each of the three productivity classes (16.5 m, 14.0 m, and 11.5 m) are respectively 33.49 cm, 26.04 cm, and 19.4 cm for the observed silviculture, and 45.67 cm, 38.12 cm, and 31.34 cm for the proposed silviculture.

The management tables and tools developed as a result of this study provide forest managers with key information for optimizing management and planning, thus promoting sustainable exploitation and increased economic valorization of Aleppo pine in the Beni Imloul forest massif in Algeria.

Keywords: Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.), volume tables, merchantable volumes, site index, yield tables, silviculture, Beni Imloul.

Table des matières

Liste des abreviations

Liste de tableaux

Liste des figures

Introduction générale 18

Chapitre. I État de connaissance sur le pin d'Alep

I.1 Taxonomie de l'espèce	22
I.2 Aire de répartition de l'espèce	22
I.3 Morphologie de l'espèce.....	25
I.4 Les exigences écologiques.....	25
I.5 Usages du pin d'Alep	26
I.6 Qualité du bois de l'espèce	27

Chapitre. II Description de la zone d'étude

II.1 Localisation géographique de la pinède de Beni Imloul.....	30
II.2 Milieu physique	31
II.3 Climat et synthèse bioclimatique.....	31
II.3.1 Les facteurs climatiques	31
II.3.1.1 Précipitations.....	31
II.3.1.2 Températures.....	32
II.3.2 Synthèse bioclimatique.....	33
II.3.2.1 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen.....	33
II.3.2.2 L'indice d'aridité de De Martonne (1926).....	33
II.3.2.3 Quotient pluviothermique d'Emberger.....	34
II.4 Végétation.....	35

Chapitre. III Ajustement des tarifs de cubage globaux et marchands

Introduction.....	38
III.1 Matériels et méthodes	39
III.2 Acquisition des données.....	39
III.2.1 Méthodes d'ajustement.....	40
III.2.1.1 Tarifs globaux	40
III.2.1.2 Tarifs marchands	40
III.2.1.2.1 Les rapports de volume ($rv_{d_{ij}}$ et $rv_{h_{ij}}$).....	40
III.2.1.2.2 Le système d'équations (S).....	41
III.2.2 Fonctions candidates	41
III.2.2.1 Tarifs globaux	41
III.2.2.2 Tarifs marchands	42
III.2.2.2.1 Les rapports de volume ($rv_{d_{ij}}$ et $rv_{h_{ij}}$).....	42
III.2.2.2.2 Construction d'un système d'équations (S)	43
III.2.3 Pondération.....	44
III.2.4 Critères d'appréciation de la qualité d'ajustement et choix des meilleures fonctions.....	44
III.2.4.1 Capacité d'ajustement	44
III.2.4.2 Capacité de prédiction	46
III.2.5 Précision des tarifs obtenus	47

III.3 Résultats	48
III.3.1 Répartition des données échantillonnées selon le DBH et la hauteur totale	48
III.3.2 Les tarifs globaux.....	49
III.3.2.1 Les tarifs à une entrée.....	49
III.3.2.2 Les tarifs à deux entrées	53
III.3.2.3 Effet de la pondération	56
III.3.2.4 Tables de cubage	61
III.3.3 Tarifs de cubage marchands	63
III.3.3.1 Système d'équations (S).....	63
III.3.3.2 Précision des paramètres des tarifs marchands	63
III.3.3.3 Tables de cubage pour les tarifs marchands	64
III.3.3.4 Utilisation du système d'équation élaboré.....	66
III.4 Discussion	66
Conclusion	72

Chapitre. IV Modélisation de la croissance en hauteur dominante

Introduction.....	75
IV.1 Notions générales	76
IV.1.1 Notion de productivité	76
IV.1.2 Les fonctions de croissance.....	77
IV.1.3 Sources de données pour l'élaboration des courbes d'indice de site.....	78
IV.1.3.1 Les placettes temporaires	78
IV.1.3.2 Les placettes permanentes	79
IV.1.3.3 Analyses des tiges	79
IV.1.3.3.1 Méthodes de correction de la hauteur.....	79
IV.1.4 Fixation de l'âge de référence	81
IV.1.5 Fixation des niveaux de productivité	81
IV.2 Matériels et méthodes.....	82
IV.2.1 Collecte des données.....	82
IV.2.1.1 Analyses de tiges.....	82
IV.2.1.1.1 Méthode de correction de la hauteur	82
IV.2.1.2 Mesures dans les placettes temporaires.....	83
IV.2.2 Ajustement des modèles.....	83
IV.2.3 Modèles de croissance étudiés.....	85
IV.2.4 Critères de comparaison des modèles testés.....	87
IV.2.4.1 Capacité d'ajustement	87
IV.2.4.2 Capacité de prédiction	87
IV.2.4.3 La normalité de la distribution des erreurs (résidus).....	88
IV.2.4.4 Le réalisme biologique	89
IV.2.5 Choix de l'âge de référence	89
IV.2.6 Identification des classes de fertilité.....	90
IV.2.6.1 En fonction de l'indice de site (I_0)	90
IV.2.6.2 En fonction du volume	90
IV.3 Résultats.....	90
IV.3.1 Description des données collectées.....	90
IV.3.2 Reconstitution du faisceau expérimental	90
IV.3.3 Ajustement des modèles de croissance	91
IV.3.4 Fixation de l'âge de référence	95
IV.3.5 L'indice de site	96
IV.3.6 Identification des classes de fertilité.....	97
IV.3.6.1 En fonction de l'indice de site (I_0)	97

IV.3.6.1.1 Caractérisation des classes de fertilité	98
IV.3.6.2 En fonction du bois fort (vbf)	99
IV.3.6.2.1 Caractérisation des classes de volume bois fort (vbf)	101
IV.3.7 Comparaison entre les classes d'indice de site et les classes de volume bois fort	101
IV.4 Discussion	102
Conclusion	105

Chapitre. V Tables de production et sylviculture du pin d'Alep

Introduction	108
V.1 Construction des tables de production	109
V.1.1 Une relation exprimant la productivité de la station	109
V.1.2 Des relations de description des peuplements	110
V.1.3 Des relations exprimant la sylviculture et le choix du régime d'éclaircie	110
V.1.3.1 Sylviculture moyenne observée	111
V.1.3.2 Sylviculture proposée	111
V.1.4 Ajustement et comparaison des modèles	113
V.1.5 Choix de l'âge d'exploitabilité	113
V.2 Résultats	114
V.2.1 Caractéristiques dendrométriques des placettes	114
V.2.2 Courbes d'indices de site et classes de productivité	114
V.2.3 Modèles ajustés indépendants de l'âge et de la productivité de la station	114
V.2.4 Les relations exprimant la sylviculture et le choix du régime d'éclaircie	115
V.2.4.1 Table de production de sylviculture moyenne observée	115
V.2.4.2 Table de production de la sylviculture proposée	117
V.2.5 Effet de la sylviculture sur la productivité du pin d'Alep	119
V.2.6 Densité des peuplements pour les deux types de sylviculture	120
V.2.7 Accroissement et productivité du pin d'Alep	121
V.2.8 Choix de l'âge d'exploitabilité	122
V.3 Discussion	122
Conclusion	127
Conclusion générale	129

Références bibliographiques

Annexes

Liste des abréviations

AHPE : Automne, Hiver, Printemps, Été

BNEF : Bureau national d'études forestières

CRS : coefficient relatif saisonnier

CV : Coefficient de variation en (%).

Di : diamètre à la hauteur de poitrine

d_{ij} : la grosseur à une hauteur déterminée « i »

E.T : Écart type

Eq 1-10 : équation de 1 à 10

F1-F19 : fonction de 1 à 19

Hi : hauteur totale

h_{ij} : la hauteur à un diamètre déterminé « i »

I_m : Indice de De Martonne mensuel.

M1-M6 : Modèle de 1 à 6

Max : Maximum

Mill. : Miller

Min : Minimum

Moy : moyenne

NSUR: Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations

OLS : méthode des moindres carrés ordinaires

Q₂ : Quotient pluviothermique d'Emberger

SAFBV : Service des Études d'Aménagement des Forêts et des Bassins Versants

Vbf : volume du bois fort

V_i: volume de l'arbre (i)

Liste de tableaux

Tableau I.1. Superficies du pin d'Alep dans les pays du pourtour méditerranéen.	23
Tableau II.1. Précipitations mensuelles moyennes (mm) pour la période : 1990-2020.	31
Tableau II.2. Régime saisonnier des précipitations moyennes (mm) et le coefficient relatif saisonnier (CRS) pour la période : 1990-2020.	32
Tableau II.3. Températures mensuelles (°C) couvrant la période 1990-2020.	32
Tableau III.1. Répartition des arbres échantillonnés en fonction de leur DBH (cm) et leur hauteur totale H (m).	48
Tableau III.2. Estimation des paramètres et critères de comparaison pour les tarifs à une entrée.	50
Tableau III.3. Estimation des paramètres et critères de comparaison pour les tarifs à deux entrées.	55
Tableau III.4. Valeurs moyennes par classe de diamètre du volume bois fort des grumes d'arbres et des écarts types conditionnels du volume.	57
Tableau III.5. Valeurs estimées, test de signification des paramètres et précision des tarifs de cubage à une et à deux entrées des grumes d'arbres de pin d'Alep.	59
Tableau III.6. Tables de cubage à une (F3) et à deux entrées (F7) pondérées : volume du bois fort de la grume d'arbre en m ³ en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH, en cm) et de la hauteur totale (H, en m) pour le tarif à deux entrées, et du bois fort de la grume d'arbre en m ³ en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH, en cm) pour le tarif à une entrée.	62
Tableau III.7. Estimation et test de signification des paramètres du système d'équations (F16, F17, F18 et F19) des tarifs marchands.	63
Tableau III.8. Précision des tarifs marchands.	64
Tableau III.9. Table de cubage de volumes marchands bois fort (bf) des grumes d'arbres de pin d'Alep : Diamètre fin-bout $d_{ij} = 20$ cm.	65
Tableau III.10. Table récapitulative de l'utilisation du système d'équations (S) (F16, F17, F18, F19) sur quelques grumes d'arbres de pin d'Alep pour le calcul des différents volumes et dimensions des grumes.	66
Tableau III.11. Tarifs de cubage à une et à deux entrées établis pour le pin d'Alep dans quelques pays du pourtour méditerranéen et analyse des résidus.	68
Tableau III.12. Caractéristiques dendrométriques et volumes des arbres cubés dans le massif de Beni Imloul et Ouled Yaâgoub.	71
Tableau IV.1. Équations de base et formulations (ADA/GADA) utilisés pour la modélisation de la croissance en hauteur dominante. (Sghaier et al., 2012 ; Kherchouche et al., 2024).	86
Tableau IV.2. Statistiques descriptives des caractéristiques des arbres coupés utilisés pour la modélisation de la croissance en hauteur dominante.	90
Tableau IV.3. Estimation des paramètres et statistiques de la qualité d'ajustement et de prédiction des modèles.	92
Tableau IV.4. Distribution des placettes échantillonnées par classes de fertilité et leurs caractéristiques statistiques.	98
Tableau IV.5. Statistiques descriptives des variables mesurées pour les 60 placettes et leur répartition en 3 classes de fertilité.	99
Tableau IV.6. Distribution des placettes échantillonnées par classes de volume bois fort et leurs caractéristiques statistiques.	100
Tableau IV.7. Statistiques descriptives des caractéristiques des peuplements par classe de productivité en volume bois fort.	101
Tableau V.1. Les différentes fonctions (sous modèle) ajustées. Source (Sghaier et Ammari, 2012).	113

Tableau V.2. Statistiques descriptives des variables dendrométriques mesurées et calculées pour les 60 placettes temporaires échantillonnées.	114
Tableau V.3. Les fonctions (sous modèles) ajustées et retenues.	115
Tableau V.4. Table de production pour le pin d'Alep dans la pinède de Beni Imloul : sylviculture observée.	116
Tableau V.5. Table de production pour le pin d'Alep dans la pinède de Beni Imloul : sylviculture proposée.	118
Tableau V.6. Comparaison de la production du pin d'Alep dans la pinède de Beni Imloul avec les résultats obtenus pour la même espèce en Espagne, Tunisie et Ouled Yaâgoub et beni Oudjana (âge de comparaison = 80 ans).....	125

Liste des figures

Figure I.1. Distribution géographique du pin d'Alep dans le monde. (EUROFORGEN, 2009). Source (Elaieb, 2017).	22
Figure I.2. Distribution géographique du pin d'Alep en Algérie. Source (Bentouati, 2006).	24
Figure II.1. Localisation géographique de la pinède de Beni Imloul.	30
Figure II.2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen, pour la pinède de Beni Imloul.	33
Figure II.3. Climagramme d'Emberger pour la zone d'étude.	35
Figure III.1. Volumes des grumes déterminés lors des deux phases d'échantillonnage de 1999 puis 2019 en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH).	48
Figure III.2. Valeurs de la moyenne quadratique des résidus absolus (S_a) et relatifs (S_r) par classe de diamètre pour les tarifs à une entrée.	51
Figure III.3. – QQ-probability plots des résidus et test de normalité de Ryan-Joiner pour les tarifs à une entrée.	52
Figure III.4. Projection des résidus obtenus par les tarifs à une entrée en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) de hauteur.	52
Figure III.5. Valeurs de la moyenne quadratique des résidus absolus (S_a) et relatifs (S_r) par classe de diamètre pour les tarifs à deux entrées.	54
Figure III.6. QQ-probability plots des résidus et test de normalité de Ryan-Joiner pour les tarifs à deux entrées.	54
Figure III.7. Projection des résidus obtenus par les tarifs à deux entrées en fonction du diamètre à 1,30 m de hauteur.	56
Figure III.8. Projection des volumes observés et des volumes estimés par les fonctions F3 et F7 en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) sans et avec pondération.	58
Figure III.9. Diagramme de QQ-probabilité des résidus (m^3) et test de normalité de Ryan-Joiner pour les tarifs de cubage à une et à deux entrées sans et avec pondération.	60
Figure III.10. Projection des résidus des volumes (m^3) issus des fonctions F3 et F7 ajustées sans et avec pondération en fonction du DBH (cm).	61
Figure III.11. Volumes observés pour les arbres échantillonnés dans la forêt de Beni Imloul en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) et courbes simulées à l'aide des tarifs de cubage à une entrée, établis pour le pin d'Alep de trois pays méditerranéens (Algérie, Tunisie et Maroc).	69
Figure III.12. Projection des résidus en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) obtenus par les tarifs à deux entrées établis pour le pin d'Alep de cinq pays méditerranéens (Algérie, Tunisie, Maroc, Espagne et France).	70
Figure III.13. Projection des volumes observés des arbres échantillonnés en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) et courbes simulées à l'aide du tarif de cubage à une entrée pour les pinèdes de Beni Imloul et Ouled Yaâgoub.	72
Figure IV.1. Superposition du faisceau de courbes expérimentales des 30 arbres utilisés en analyse de tiges et des couples âge-hauteur des 60 arbres dominants échantillonnés dans les placettes temporaires.	91
Figure IV.2. Biais et RMSE par classe d'âge pour les trois modèles ajustés retenus.	93
Figure IV.3. Projection des résidus des hauteurs (m) en fonction des hauteurs observées (m), obtenus par les modèles M2, M5 et M6.	94
Figure IV.4. Diagramme de QQ-probability plots des résidus des hauteurs (m) et test de normalité de Ryan-Joiner pour les trois modèles testés M2, M5 et M6.	94
Figure IV.5. Erreur relative de prédiction de la hauteur (RE%) par classes d'âge, calculée par le modèle M6, et le nombre d'observations qui lui correspondent.	96

Figure IV.6. Prédiction de l'indice de site par le modèle M6 en fonction de l'âge pour les arbres utilisés en analyse de tiges.....	97
Figure IV.7. Projection des données des couples âge-hauteur des arbres dominants échantillonnés au niveau de 60 placettes sur le faisceau de courbes de croissance en hauteur dominante obtenues avec le modèle M6 pour des indices de site 11,5 m, 14 m et 16,5 m à un âge de référence de 100 ans.....	98
Figure IV.8. Projection des données de 60 placettes en fonction de leur volume et âge sur les classes de volume.....	100
Figure IV.9. Comparaison des courbes des trois classes de fertilité de la pinède de Beni Imloul (M6) avec celles de l'Algérie (Ouled Yaâgoub (Bentouati et al., 2005) et Beni Imloul (Kherchouche et al. (2024)) (a), de l'Espagne (Rojo-Alboreca et al., 2017) (b) et de la Tunisie (Sghaier et Garchi, 2009) (c).....	105
Figure V.1. Évolution du diamètre moyen quadratique (D_g) et du volume total (V_t) du pin d'Alep dans les trois classes de productivité pour la sylviculture observée (Obs) et la sylviculture proposée (Prop).....	119
Figure V.2. Évolution du nombre d'arbres en fonction de l'âge (avant et après éclaircie) pour les trois classes de productivité selon les deux types de sylviculture (a : observée, b : proposée).....	120
Figure V.3. Accroissement annuel moyen (AAM) et accroissement annuel courant (AAC) des trois classes de productivité du pin d'Alep de Beni Imloul pour la sylviculture moyenne observée, et la sylviculture proposée.....	121

Introduction générale

Introduction générale

Typiquement méditerranéen, le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) qui est une espèce forestière du groupe des halepensis représente les massifs les plus importants en Algérie et en Tunisie (Nahal, 1962). Comme tous les pins appartenant à ce groupe, cette espèce est connue par de modestes exigences écologiques et une plasticité très remarquable qui lui permet une adaptation aux différentes conditions climatiques et édaphiques. Malgré son faible potentiel de production qui est considéré comme acceptable, le pin d'Alep possède un important pouvoir reproducteur qui favorise son expansion dans des zones abandonnées par l'agriculture et augmente sa capacité de peupler ainsi les terrains nus, ce qui a fait de lui une espèce de grande importance en matière de reboisement (Quezel, 1986 ; Bentouati, 2006 ; Teissier Du Cros, 1992).

Les travaux consacrés à l'étude du pin d'Alep sont nombreux dans la littérature, couvrant différents aspects, reflétant ainsi son importance en matière scientifique et forestière. Citons ceux de Nahal (1962), Quezel (1980, 1986), Kadik (1983) en Algérie, au Maroc (Achhal *et al.*, 1980) et en Tunisie (Soulères, 1969, Chakroun, 1986). L'aspect productif du pin d'Alep a été largement étudié dans les pays du pourtour méditerranéen. Sur la rive nord, les principaux travaux réalisés sont ceux de : Bedel (1986), Couhert et Duplat (1993) en France, Montero *et al.* (2000 ; 2001) en Espagne et Ciancio (1986) en Italie. Sur la rive sud nous citons : Belghazi *et al.* (2000) au Maroc, Soulères (1969 ; 1975), Chakroun (1986), Sghaier *et al.* (2008), Sghaier et Ammari (2012) en Tunisie et Franz et Forster (1979), Bentouati (2006), Kherchouche *et al.* (2011), Goubi *et al.* (2019), Rabhi *et al.* (2023) et Kherchouche *et al.* (2024) en Algérie.

Considéré comme la première espèce forestière en Algérie (Algérie du Nord), le pin d'Alep couvre environ 800 000 ha, soit 40% des surfaces boisées (Mezali, 2003 ; Daoui *et al.*, 2007), répartis sous forme de grands massifs. D'après Quezel (1986), le pin d'Alep forme en Algérie des forêts importantes, avec une variabilité écologique très remarquable. Il est présent dans la majorité des variantes du bioclimat méditerranéen, peuplant ainsi des régions assez hostiles en marge du Sahara et de la steppe.

Dans l'Aurès, le pin d'Alep présente les beaux et les plus importants peuplements du pays, occupant de grands massifs, dont le massif de Beni Imloul qui couvre environ 72 000 ha avec une capacité de production en volume de l'ordre de 40 000 m³/an (BNEF, 1984 *in* Bentouati,

2006), et celui de Ouled Yaâgoub et des Beni Oudjana couvrant plus de 40 000 ha avec une production en volume de l'ordre de 8500 m³/an.

Outre leur importance écologique, ces massifs de pin d'Alep possèdent des potentialités de production élevées qui méritent une attention particulière en matière de sylviculture et d'aménagement. Dans ce contexte de productivité et d'aménagement, les travaux sont fragmentaires et insuffisants et ne couvrent pas la totalité des massifs forestiers en Algérie. Au niveau du massif de Ouled Yaâgoub, les premiers travaux ont été entamés par Bentouati (2006), suivis par le travail de Goubi *et al.* (2019) sur l'estimation des volumes du bois fort et celui de Rabhi *et al.* (2023) sur la sylviculture.

Selon Bentouati (2006), le massif de Beni Imloul est formé par des peuplements de pin d'Alep qui sont généralement composés d'adultes et vieilles futaies et qui dépassent parfois l'âge d'exploitabilité, ce qui limite leur durée de survie et nécessite des interventions sylvicoles.

Vu sa superficie importante et sa capacité de production non négligeable ; mis à part les études réalisées dans le cadre des aménagements forestiers où les premières tables de production ont été élaborées par (Franz et Forster, 1979), et les études sur la dynamique de la croissance et l'écologie du pin d'Alep (Kherchouche *et al.*, 2011, 2024), ce massif n'a pas fait l'objet d'autres travaux pour le valoriser ou mettre au point une sylviculture récente et appropriée.

La planification de la gestion forestière nécessite une connaissance et une évaluation du potentiel productif des peuplements, ainsi qu'une prédiction de l'évolution de ces potentiels dans le temps.

Grâce à la modélisation de la croissance et la production des peuplements forestiers, il est possible d'intégrer et de résumer les données concernant la réponse à la croissance, de repérer les lacunes en matière de connaissances et de donner aux gestionnaires forestiers des capacités de prévision (Burkhart et Tomé, 2012).

C'est dans cette optique d'évaluation et de prévision que nous menons cette étude, qui vise à valoriser les peuplements forestiers et de suggérer des actions sylvicoles pour optimiser la production et assurer leur équilibre.

L'objectif de notre étude est d'élaborer un plan de gestion et de sylviculture adéquat pour les peuplements de Beni Imloul, par le biais de la modélisation. Pour atteindre cet objectif, nous avons adopté les démarches suivantes :

- L'élaboration de deux types de tables de cubage pour les peuplements étudiés; les tarifs de cubage globaux à une (DBH ou diamètre à hauteur de poitrine) et à deux entrées (DBH et

hauteur totale) qui servent à l'estimation des volumes du bois fort des grumes d'arbres sur pied et les tarifs de cubage marchands élaborés à partir de l'ajustement d'un système d'équations qui permet de prédire à partir des mesures individuelles des billons issus des analyses de tiges : le volume de la grume jusqu'à une découpe donnée ou jusqu'à une hauteur donnée, la hauteur de la grume jusqu'à une découpe donnée et le diamètre de la grume jusqu'à une hauteur donnée. Ce dernier type de tarifs de cubage qui est considéré comme plus flexible est utilisé essentiellement pour répondre aux besoins de l'industrie du bois et de s'ajuster à la demande en produits forestiers ligneux variés. Considérés comme des modèles statiques ; les tarifs de cubages constituent des outils indispensables pour la gestion et l'aménagement des peuplements forestiers.

- L'ajustement d'un modèle de croissance en hauteur dominante afin de caractériser la dynamique de la croissance en hauteur dominante à partir des analyses de tiges, et déterminer les classes de productivité des différents peuplements étudiés.

- La détermination du potentiel productif et la proposition d'une sylviculture pour les peuplements étudiés ; en établissant des tables de production pour la sylviculture observée et celle proposée qui servent comme un outil important pour les interventions sylvicoles à réaliser au cours d'une rotation, à savoir l'intensité et le type des éclaircies, l'âge adéquat pour l'exploitation des peuplements et la production totale ainsi que les accroissements résultants de ces interventions.

Ce travail s'articule autour de cinq chapitres, offrant une étude du pin d'Alep dans le massif de Beni Imloul, intégrant l'analyse de son milieu et présentant des outils de gestion et d'aménagement développés.

- Le premier chapitre aborde la présentation de l'espèce étudiée en se basant sur les informations déjà disponibles dans la littérature scientifique.

- Le second chapitre est consacré à la description de la zone d'étude, incluant sa localisation géographique, son climat caractéristique et sa végétation.

- Le troisième chapitre présente deux types de tarifs de cubage : les tarifs de cubage globaux pour estimer le volume total du bois fort, et les tarifs de cubage marchands pour l'estimation du volume du bois à différentes découpes.

- Le quatrième chapitre consiste à développer un modèle dynamique de croissance en hauteur dominante, et de tracer des courbes de productivité pour les peuplements étudiés.

- Enfin, le cinquième chapitre est consacré à l'établissement de tables de production pour deux types de sylviculture, l'une observée et l'autre proposée.

Chapitre. I État de connaissance sur le pin d'Alep

I.1 Taxonomie de l'espèce

Le pin d'Alep appartient à la famille des pinacées (Abiétacées), au genre *Pinus* et sous genre *Pinus* (*Eupinus*), groupe des *halepensis* et au sous- groupe (*halepensis*). Le pin d'Alep et le pin brutia sont deux sous-groupes différents appartenant à celui des *halepensis* ; ce dernier se caractérise par deux feuilles et des cônes caducs. Ces deux pins ont été confondus, ou considérées comme une seule espèce par différents auteurs. Dans une étude sur la taxonomie des pins du groupe *halepensis* menée par (Nahal, 1962), basée sur l'étude biochimique, phénologique, palynologique, anatomique et morphologique, les résultats ont montré que le pin d'Alep et le pin brutia sont deux espèces distinctes et que l'espèce *Pinus halepensis* Mill., est très hétérogène au niveau de son aire de répartition.

I.2 Aire de répartition de l'espèce

Le pin d'Alep est une espèce du circumméditerranéen, occupant une superficie qui dépasse 3,5 millions d'hectares. A l'état spontané, il se répartit sur tout le pourtour du bassin méditerranéen, à l'exception de l'Égypte. Il se concentre principalement dans le bassin méditerranéen occidental, en particulier dans l'Afrique du Nord, et c'est en Algérie et en Tunisie qu'il forme les peuplements de grande importance (Nahal, 1962 ; Quezel, 1986). La répartition du pin d'Alep dans le monde est donnée par la figure I.1 et le tableau I.1.

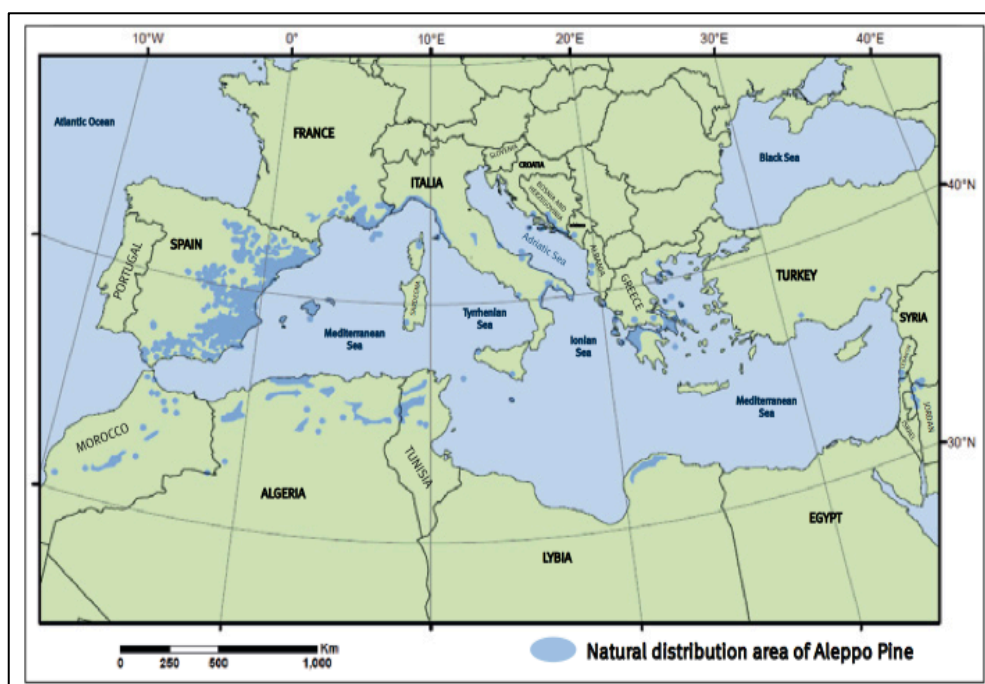


Figure I.1. Distribution géographique du pin d'Alep dans le monde. (EUROFORGEN, 2009).
Source (Elaieb, 2017).

Tableau I.1. Superficies du pin d'Alep dans les pays du pourtour méditerranéen.

Pays	Superficie (ha)	Source
Espagne	1 046 978	Montero <i>et al.</i> (2001)
France	244 000	Vennetier et Ripert (2010)
Italie	20 000	Nahal, 1962 ; Seigue, 1985 <i>in</i> Bentouati, 2006 ; Quezel, 1986).
Grèce	330 0000	Nahal, 1962 ; Seigue, 1985 <i>in</i> Bentouati, 2006 ; Quezel, 1986).
Maroc	65 000	Nahal, 1962
Tunisie	361 221	Khoudja (1997) <i>in</i> Fkiri <i>et al.</i> (2020)
Algérie	852 000 800 000	Boudy (1950) Mezali (2003) ; Daoui <i>et al.</i> (2007)

- Europe

En Espagne, le pin d'Alep est assez fréquent et s'étale presque sur toute la côte méditerranéenne, en pénétrant à l'intérieur du pays près de la côte. Il se présente à l'état spontané ou sous forme de reboisements, à l'état pur avec une superficie de 1 046 978 hectares ou en mélange avec différentes autres espèces forestières, couvrant ainsi 497 709 hectares (Nahal, 1962 ; Montero *et al.*, 2001).

En France le pin d'Alep se limite à la région méditerranéenne, il est abondant en Provence et peuple également certains secteurs du Languedoc-Roussillon. Selon les chiffres de l'inventaire forestier de 2003, il couvre une superficie de 244 000 ha dans tout le pays (Nahal, 1962 ; Brochiero, 1999 ; Vennetier et Ripert, 2010).

En Grèce sa superficie est de 330 000 ha. Il est présent également en Albanie, en Italie avec 20 000 ha, et en Yougoslavie où il occupe les parties les plus chaudes de la côte Adriatique. Il existe au Portugal mais pas à l'état spontané.

- Proche Orient

Au proche orient, le pin d'Alep est présent en Turquie, en Jordanie, sur le littoral libanais et en Palestine (Nahal, 1962 ; Seigue, 1985 *in* Bentouati, 2006 ; Quezel, 1986).

- Afrique du Nord

En Tunisie le pin d'Alep est l'espèce dominante, il se trouve sur les montagnes de la dorsale tunisienne couvrant une superficie de 361 221 ha entre forêts naturelles et reboisements, présentant ainsi un taux de 53% de la surface forestière totale du pays (Khoudja, 1997 *in* Fkiri *et al.*, 2020).

Au Maroc, la présence du pin d'Alep est peu fréquente, sa superficie est de 65 000 hectares repartis en îlots disjoints. Les peuplements les plus importants se situent au Maroc oriental, sur le versant méditerranéen du pays. En Lybie il existe mais peu abondant, en Égypte il est cultivé dans les jardins et les parcs (Nahal, 1962).

En Algérie ; le pin d'Alep est considéré comme la première espèce forestière, constituant d'importants massifs forestiers avec une superficie de 852 000 ha selon Boudy (1950) et 800 000 ha selon Mezali (2003) et Daoui *et al.* (2007), couvrant 40 % de la surface forestière totale. C'est une espèce de reboisement de premier rang qui est largement utilisée depuis 1968 avec un taux de 86% des programmes de reboisement (Bensaid, 1995). En effet le pin d'Alep se rencontre dans tous les étages bioclimatiques, mais c'est dans l'étage semi-aride qu'il présente une prédominance (Bentouati, 2006). La figure I.2 présente l'aire de répartition du pin d'Alep en Algérie.

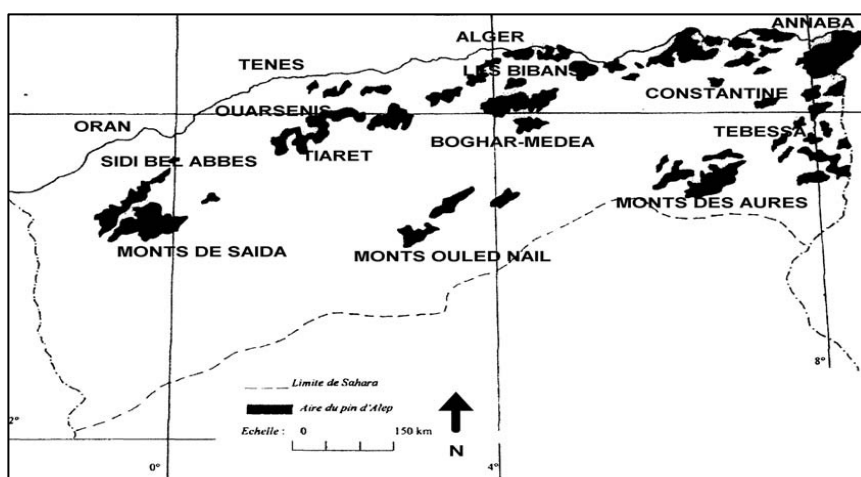


Figure I.2. Distribution géographique du pin d'Alep en Algérie. Source (Bentouati, 2006).

D'après l'étude de (Nahal, 1962), la répartition géographique du pin d'Alep en Algérie est la suivante :

- A l'Est, le pin d'Alep forme des forêts assez importantes, dans la région de Tebessa (Région algéro-tunisienne) avec une superficie totale de 116 000 ha.
- Vers l'Ouest, il se trouve dans la région des plateaux constantinois et de l'Aurès, constitué par le secteur de l'Aurès et celui de Biban. Le massif des Aurès s'étendant sur une superficie de 80 000 ha, est constitué de deux peuplements, Beni Imloul, et le massif de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana.
- Dans la région algéro-ouarsenienne (région d'Alger), on trouve les peuplements purs ou en mélange d'une superficie plus au moins importante, à savoir les forêts de Cherchell, Milina, Tenès, Médéa et Aumale.
- De l'Ouest à l'Est se trouve le massif de Boghar avec 52 000 ha, et celui de Theniet el Had, le massif de l'Ouarsenis proprement dit, considéré comme le domaine exclusif de cette espèce, couvrant une superficie de 35 000 ha.

C'est en Oranie que le pin d'Alep est en plein développement, constituant des massifs importants, de presque 200 000 ha.

La dernière région présentant le pin d'Alep est l'Atlas Saharien ; dans la région de Djelfa avec 108 000 ha, et Ouled Nail où les peuplements sont constitués de vieilles futaies.

I.3 Morphologie de l'espèce

D'après Nahal (1962), Rameau *et al.* (2008) et Prévosto (2013), l'arbre du pin d'Alep peut atteindre jusqu'à 24 à 25 m de hauteur, avec les principaux caractères morphologiques suivants :

- Les épines (aiguilles) sont molles et très fines (inférieures à 1 mm de diamètre), d'une longueur de 5 à 10 cm, groupées souvent par 2 et assez rarement par 3 dans une même gaine, généralement elles se groupent en pinceaux à l'extrémité des rameaux. Leur couleur est vert-jaunâtre donnant un aspect clairsemé à la couronne d'arbre.

- Les fleurs sont unisexuées ; les chatons mâles sont de forme ovoïde et de couleur roussâtre, se trouvent à la base des rameaux de l'année, les fleurs femelles, quant à elles, sont de petits cônes violacés situés au sommet des pousses de l'année.

- Les cônes sont sérotineux très pédonculés et orientés vers le bas du rameau ; disposés d'une manière isolée ou par paire, de forme conique allongée et d'une taille variable mesurant entre 5 à 12 cm de longueur, et environ 4 cm de largeur. Après maturation, ils persistent sur l'arbre pendant plusieurs années.

- Le tronc, présentant des écailles minces et aplaties pendant une longue période, est presque lisse. A l'état adulte il présente des gerçures.

I.4 Les exigences écologiques

Le pin d'Alep est connu par sa plasticité écologique et sa capacité d'expansion, possédant une amplitude écologique la plus importante par rapport aux autres espèces forestières de la méditerranée. D'après les travaux de Nahal (1962) et Quezel (1986), les principales caractéristiques écologiques du pin d'Alep sont :

- l'altitude : D'un point de vue altitudinal, le pin d'Alep est fréquent dans le supra méditerranéen, et atteignant des altitudes plus élevées localement. Au Maroc, dans le Haut Atlas central il peut atteindre 2600 m, et il culmine jusqu'à 2000 m environ dans l'Aurès algérien.

- le substrat : Cette espèce semble supporter des substrats variés, avec quelques préférences surtout pour les substrats marneux et calcaro-marneux, pour étendre son système racinaire dans les sols profonds, et peut se trouver sur les calcaires compacts et plus

spécialement les calcaires diaclasés à terra rossa, c'est le cas de Provence en France et l'Oranie en Algérie. Sur les substrats non calcaires, il est présent essentiellement sur les schistes et les micaschistes.

En effet, le pin d'Alep préfère les substrats meubles et friables, et fuit les substrats sableux ou ceux contenant des nappes aquifères qui peuvent provoquer un dessèchement ou une asphyxie du système racinaire.

- les précipitations : Le pin d'Alep peut se développer dans une tranche pluviométrique annuelle entre 200 mm et 1500 mm, son optimum se situe entre 350 et 700 mm.

- les températures : Pour les températures, selon Emberger cité par Quezel (1986), l'un des facteurs limitant la croissance du pin d'Alep est la moyenne des minima du mois le plus froid (m). Le pin d'Alep apparait pour des valeurs moyennes oscillant entre -3 à plus de 10°C. L'étude de Bedel (1986) a montré une résistance aux périodes courtes de froids exceptionnels, où la température peut baisser jusqu'à -15 à -18°C.

En Afrique du nord il est présent principalement dans l'étage bioclimatique semi-aride et subhumide à variante froide, fraîche, tempérée et chaude et dans l'aride (froid, frais et tempéré) d'une manière fragmentaire. En Europe il se situe dans l'humide frais et tempéré.

D'après Bentouati (2006), c'est dans les zones semi-arides avec des tranches de pluviométrie entre 300-400 allant jusqu'à 700 mm par année, que se développent les futaies les plus belles de cette espèce.

I.5 Usages du pin d'Alep

Le pin d'Alep est un arbre à usages multiples :

- Ses graines, appelées également (zgougou), sont destinées à la consommation humaine. En Tunisie elles représentent le principal produit forestier non ligneux, et constituent une véritable richesse nationale. Consommées par la population pendant la fête du Mould, elles occupent une part importante de l'alimentation locale. D'après Giz (2014) *in* Jaouadi (2019), la consommation nationale des graines de pin d'Alep était estimée entre 300 et 320 tonnes, avec une tendance à la hausse.

- Son bois est considéré comme un excellent combustible, il était utilisé également pour les petites charpentes, les pilotis et la fabrication des caisses et d'emballages.

- L'écorce, les aiguilles et les cônes peuvent être utilisés pour obtenir des teintures de différentes couleurs, allant du jaune au noir. Son écorce est riche en tannin et servait autrefois au tannage des peaux.

- Il est également exploité pour sa résine, son gemmage sert à la production d'une essence de térébenthine abondante et appréciée.

I.6 Qualité du bois de l'espèce

Le bois du pin d'Alep est caractérisé par un aubier blanc jaunâtre avec un cœur brun rougeâtre clair, assez léger d'une densité qui varie entre 0,532 et 0,866. Les gros canaux de résine, bien apparents et assez espacés sécrétant la résine en abondance, peuvent affecter le bois pour l'utilisation en sciage, et augmentent au contraire la puissance calorifique du bois. Après l'élimination de la résine, le bois du pin d'Alep peut être utilisé dans l'industrie papetière (Nahal, 1962).

Dans son aire de répartition, le pin d'Alep n'a pas une bonne réputation en ce qui concerne la qualité du bois. D'après Langbour *et al.* (2011), le bois du pin d'Alep n'est pas apprécié à cause de sa forme flexueuse. Les études sur la valorisation de cette source importante de bois, bien que peu nombreuses, ont permis de mettre en lumière ses caractéristiques et ses possibilités d'utilisation dans l'industrie.

En France selon Langbour *et al.* (2011), le pin d'Alep est utilisé principalement pour la fabrication de la pâte à papier. Cependant les résultats de son travail montrent que les caractéristiques physiques et mécaniques de son bois sont satisfaisantes pour l'utilisation en menuiserie ou en charpente, envisageant ainsi sa valorisation pour son utilisation en caissiers ou autres, tout en signalant que ce bois nécessite des traitements de préservation une fois les arbres abattus.

Le travail de Montibus (2016) s'est orienté vers l'étude de la durabilité du bois de pin d'Alep face aux champignons et l'imprégnabilité. Les résultats obtenus montrent que le bois du pin d'Alep n'est pas suffisamment durable face aux champignons lignivores, mais l'aubier est assez imprégnable, ce qui permet l'utilisation de ce bois à condition qu'il soit disposé à un traitement biocide pour le protéger.

En Algérie, bien que le pin d'Alep soit abondant, son exploitation reste marginale et son utilisation dans l'industrie du bois se limite principalement à l'ameublement et la construction. L'industrie du bois se base essentiellement sur la transformation des bois d'importation, au détriment du bois local, et cela revient à différentes considérations telles que ; l'outil industriel adapté pour ces bois, ou à la politique forestière suivie ; soit de conservation ou de protection (Daoui *et al.*, 2007).

La recherche dans le domaine du bois en Algérie est rare, citons l'étude de Daoui *et al.* (2007) qui a pour objectif de valoriser le bois de pin d'Alep par déroulage, en optimisant l'étuvage et

celle réalisée par Lakreb *et al.* (2022), sur les propriétés physicomécaniques et thermiques du bois de pin d'Alep, où les résultats ont montré que le bois de cette espèce peut être exploité à l'échelle commerciale ; pour des usages de construction et d'isolation.

Chapitre. II Description de la zone d'étude

II.1 Localisation géographique de la pinède de Beni Imloul

La pinède de Beni Imloul, zone de la présente étude, fait partie du massif de l'Aurès. D'après Abdessemed (1981), ce dernier constitue un ensemble montagneux situé à l'Est de l'Algérie, entre 35° de latitude Nord et 6 à 7° de longitude Est.

Le massif de l'Aurès appartient au système de l'Atlas Saharien et sépare les hautes plaines constantinoises du Sahara. A l'ouest, le couloir synclinal de Batna le sépare du massif de Belezma. Du côté du Nord, il est limité par la plaine néogène de Timgad, s'étendant jusqu'à Khenchela. Du côté Est, il est séparé des Monts de Nememcha par la vallée de l'Oued- El-Erab et la plaine des Amamra. Ce massif est constitué par une série de plis parallèles, s'étendant sur une soixantaine de kilomètres avec des orientations Sud-Ouest/Nord-Est.

Le massif de Beni Imloul, se situe au Nord-Ouest de la wilaya de Khenchela, sur le territoire de la commune de m'sara ; entre 35°2' et 35°20' de latitude Nord, et entre 6°18' et 6°53' de longitude Est. Il s'étend au Sud jusqu'à les limites d'Oued Alarab, son altitude est comprise entre 1000 et 1700 m, à Ras Begnoune (Kherchouche *et al.*, 2011 ; Bouzekri, 2015).

Administrativement ce massif est géré par deux conservations de forêts, celles de la Wilaya de Khenchela et de la Wilaya de Batna.

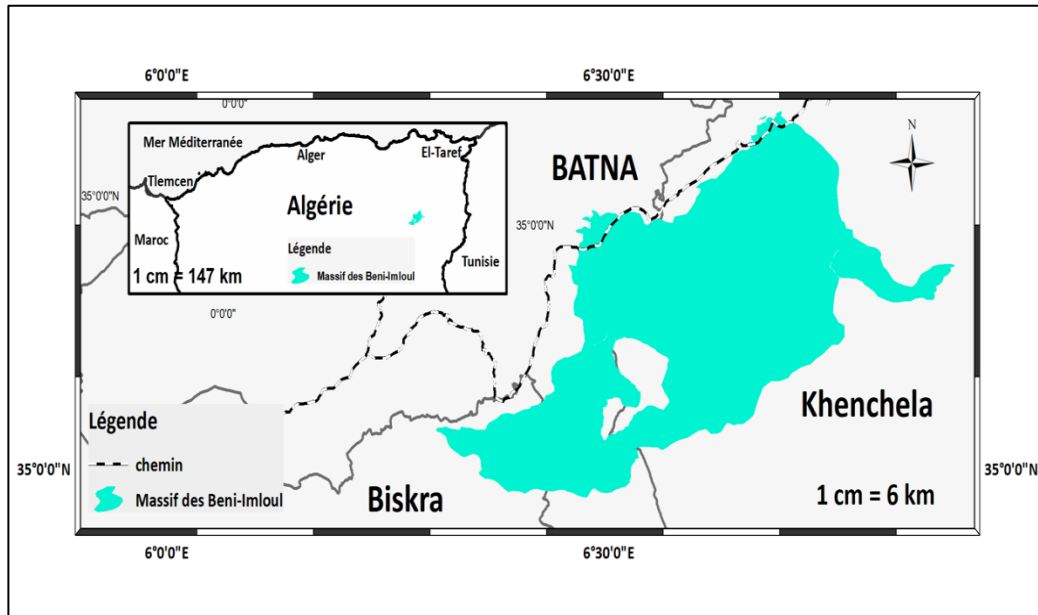


Figure II.1. Localisation géographique de la pinède de Beni Imloul.

II.2 Milieu physique

Du point de vue édaphique, la majorité du massif de Beni Imloul se trouve sur le Crétacé supérieur (le Turonien), les principaux substrats sont constitués de marnes et de calcaires, les sols les plus fréquents sont les rendzines et les sols bruns calcaires (Beghami, 2011 ; Kherchouche *et al.*, 2011).

II.3 Climat et synthèse bioclimatique

Globalement, le climat de la région de l'Aurès n'est pas homogène, présentant une variabilité très remarquable liée à la structure morphologique hétérogène du massif montagneux (Schoenenberger, 1972 ; Côte, 1993 *in* Aissi, 2019).

Dans le but de caractériser le climat de la zone d'étude, « massif de Beni Imloul », et de bien comprendre la position bioclimatique du pin d'Alep de ce massif, nous avons effectué une synthèse climatique sur la base des données climatiques qui sont essentiellement les précipitations et les températures.

II.3.1 Les facteurs climatiques

Les données climatiques utilisées qui couvrent une période de 31 ans de (1990 à 2020), ont été acquises à partir de la base de données mondiales (site web : <https://climatetoolbox.org/>).

II.3.1.1 Précipitations

Le tableau ci-dessous présente les précipitations mensuelles moyennes PPT en (mm) pour la période de 1990 à 2020. La pluviométrie moyenne annuelle totale (PMA) pour cette période est de 417,06 mm.

Tableau II.1. Précipitations mensuelles moyennes (mm) pour la période : 1990-2020.

Mois	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
PPT (mm)	42,68	31,64	48,46	33,84	39,48	15,03	12,18	20,24	41,89	36,16	46,92	48,54

La répartition mensuelle de la pluviométrie dans la zone d'étude a mis en évidence une certaine irrégularité. A partir du tableau (II.1), on peut distinguer une période pluvieuse de septembre (S) jusqu'à mai, avec un maximum de 48,54 mm pour le mois de décembre (D). Les trois mois de l'été sont les moins pluvieux, avec un minimum de 12,18 mm pendant le mois de juillet (Jl).

Afin de classer les saisons en sèche ou humide, et de déterminer le régime pluviométrique saisonnier de la pinède, nous avons eu recours au calcul du coefficient relatif saisonnier (CRS) qui a été développé par Musset (1935), il est de la forme suivante :

$$CRS = \frac{PMS \times 4}{PMA}$$

Avec : PMS : total des précipitations moyennes de chaque saison, PMA présente le total des précipitations moyenne annuelles.

Si ce coefficient est supérieur à 1 ; la saison est considérée comme humide, dans le cas où il est inférieur à 1, la saison est considérée comme étant sèche.

La répartition saisonnière de la pluviométrie est du type AHPE (Automne, Hiver, Printemps, Été) ; la saison automnale est la plus pluvieuse suivie par la période hivernale puis printanière, avec respectivement des valeurs de CRS de 1,20 ; 1,18 et 1,17. Finalement la saison estivale est considérée comme sèche où le coefficient relatif saisonnier est de 0,46, présentant ainsi 11% seulement des précipitations annuelles (Tableau II.2).

Tableau II.2. Régime saisonnier des précipitations moyennes (mm) et le coefficient relatif saisonnier (CRS) pour la période : 1990-2020.

	Automne	Hiver	Printemps	Été
PMS (mm)	124,97	122,85	121,78	47,45
%	30	29	29	11
CRS	1,20	1,18	1,17	0,46

II.3.1.2 Températures

En ce qui concerne l'étude des données des températures, couvrant la même période des précipitations (1990– 2020), on constate ce qui suit :

Les mois les plus froids sont janvier (J), février, décembre et mars (M), cependant juillet, juin (J) et août (A) représentent les mois les plus chauds. On remarque ainsi que les fortes chaleurs coïncident avec les faibles précipitations.

Les températures minimales (m) et maximales (M) ainsi que leur moyenne et écart type sont illustrés dans le tableau II.3.

Tableau II.3. Températures mensuelles (°C) couvrant la période 1990-2020.

Mois	J	F	M	A	M	J	Jl	A	S	O	N	D
Min (m)	-1,90	-1,36	1,12	4,04	6,93	12,52	14,47	14,02	11,15	7,45	2,65	-1,15
Max (M)	8,08	9,69	13,6	18,48	21,84	28,90	32,58	31,19	25,87	20,07	13,49	8,79
Moy	3,09	4,17	7,36	11,26	14,39	20,71	23,53	22,60	18,51	13,76	8,07	3,82
E.T	4,99	5,52	6,24	7,22	7,45	8,19	9,05	8,59	7,36	6,31	5,42	4,97

II.3.2 Synthèse bioclimatique

Pour déterminer le bioclimat de la zone d'étude nous avons utilisé des formules synthétiques combinant les températures et les précipitations, à savoir ; le diagramme ombrothermique de Gaussen et Bagnouls, l'indice d'aridité de De Martonne et le climagramme d'Emberger.

II.3.2.1 Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen

D'après la définition de Bagnouls et Gaussen (1953), le mois sec est celui où le total mensuel des précipitations (mm), est égal ou inférieur au double de la température moyenne mensuelle (°C) ; $PPT \leq 2T$.

Avec : PPT : total mensuel des précipitations en mm ; T : température moyenne mensuelle en °C.

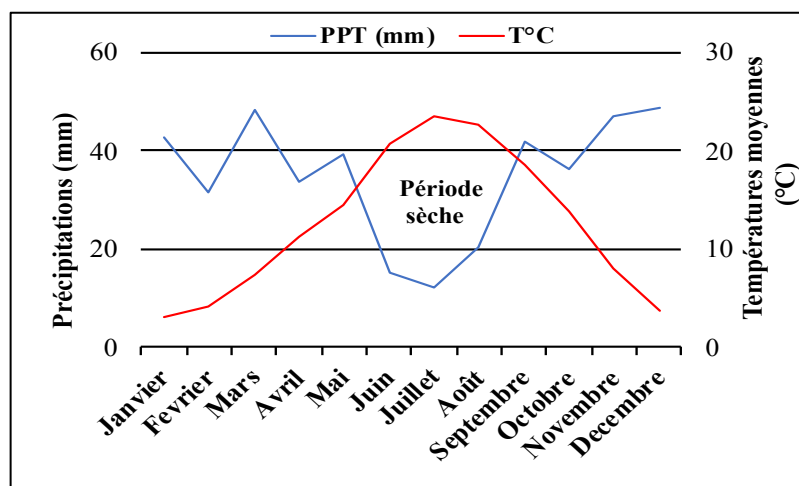


Figure II.2. Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen, pour la pinède de Beni Imloul.

D'après la figure (II.2) présentant le diagramme ombrothermique, on constate que la saison sèche dans la pinède de Beni Imloul s'étale sur presque 4 mois, allant du mois de juin jusqu'à septembre.

II.3.2.2 L'indice d'aridité de De Martonne (1926)

L'indice d'aridité de De Martonne peut être calculé pour le mois ou pour l'année, il est exprimé comme suit :

$$I = P / (T + 10) : \text{Indice de De Martonne annuel.}$$

Où : P et T = précipitations et températures moyennes annuelles respectivement.

Selon la valeur de cet indice, la classification du climat est la suivante :

0 < I < 5 : hyperaride	20 < I < 30 : subhumide
5 < I < 10 : aride	30 < I < 55 : humide
10 < I < 20 : semi-aride	I > 55 : hyper humide

L'indice d'aridité de De Martonne annuel est de l'ordre de 12,76 reflétant un climat semi-aride.

II.3.2.3 Quotient pluviothermique d'Emberger

Le quotient pluviothermique d'Emberger est spécifique pour le climat de la région méditerranéenne, il est largement utilisé en Afrique du Nord (Bentouati, 2006).

Pour l'Algérie et le Maroc, la forme appliquée est celle proposée par Stewart en 1968 et parue en 1969, elle se présente comme suit :

$$Q_2 = 3,43 \times P / (M - m)$$

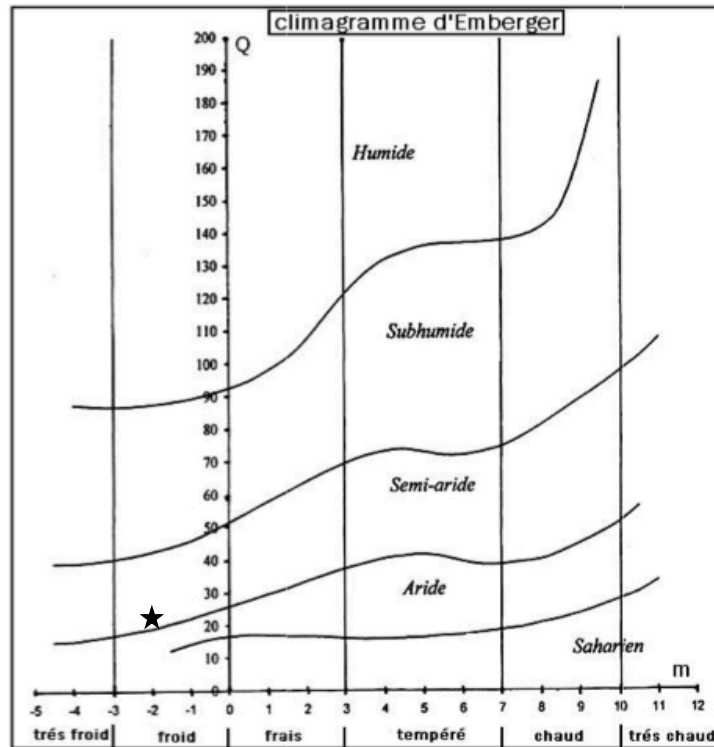
Avec : P : pluviométrie annuelle en mm, M : température maximale moyenne du mois le plus chaud et m : température minimale moyenne du mois le plus froid, en °C.

Pour la pinède de Beni Imloul, les valeurs sont les suivantes :

P = 417,06 mm, M= 32,58 °C, m= -1,9 °C, le quotient résultant ainsi est :

$$Q_2 = 41,49.$$

Ce qui lui donne une place dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver froid (Figure II.3).



★ : zone d'étude

Figure II.3. Climagramme d'Emberger pour la zone d'étude.

II.4 Végétation

Selon la description de Schoenenberger (1970), la répartition de la végétation du massif de Beni Imloul, selon les étages bioclimatiques, est la suivante :

Étage de végétation subhumide à hiver froid

Dans le massif des Beni Imloul, les peuplements de pin d'Alep se retrouvent jusqu'au sommet de Djebel Taourirt à 1734 m d'altitude. Le chêne vert se retrouve dans la plaine de M'sara sous forme arborescente, pénétrant dans les limites Nord du massif jusqu'à une altitude d'environ 1500 à 1600 m en fonction des expositions. Seulement quelques pieds de cèdre de l'Atlas sont présents dans ce massif, à une altitude similaire à celle de Chélia, leur vitalité est réduite, avec une cime desséchée et des classes de fertilité faibles, ce qui confirme que son introduction dans le massif des Beni Imloul ne donnerait pas de produits de valeur.

Étage de végétation subhumide inférieur à hiver frais

Se localisant sur les versants Nord, cet étage est bien représenté dans le massif des Beni Imloul ; sous la pinède se trouve le chêne vert, sous forme d'arbustes, atteignant 4 à 5 mètres de hauteur. Sa limite inférieure se situe dans le nord du massif vers 1350 m d'altitude, vers le Sud elle peut remonter jusqu'à 1450 m. C'est dans cet étage que le romarin, la globulaire et

l'alfa commencent à devenir abondants notamment dans les stations chaudes et dégradées. Au niveau des parcelles incendiées se forment de petites colonies de *Cistus villosus*.

Étage de végétation semi-aride à hiver frais

Cet étage est le plus important du massif de Beni Imloul. Il est caractérisé par le groupement climacique du pin d'Alep. Le chêne vert y est toujours présent, sous une forme buissonnante mais avec un taux de recouvrement plus faible. De plus, le genévrier oxycèdre est présent sous la pinède. Les espèces héliophiles remplacent ces deux espèces en formant une strate suffrutescente, homogène dont le dynamisme est conditionné par la densité du couvert du pin d'Alep.

Étage de végétation semi-aride à hiver tempéré

Cet étage se localise uniquement sur la dernière crête rocheuse surplombant le versant sud descendant vers Kheirane. De ce fait il est très peu représenté dans le massif des Beni Imloul. Sur les versants sud de cet étage, il y'a une disparition totale du pin d'Alep et du chêne vert ainsi que les espèces accompagnatrices habituelles.

Étage de végétation aride supérieur à hiver frais

Cet étage bioclimatique recouvre les derniers versants sud du massif des Beni Imloul jusqu'à sa limite inférieure et il est caractérisé par une junipéraie claire.

Chapitre. III Ajustement des tarifs de cubage globaux et marchands

Introduction

Les informations quantitatives sur les arbres et les peuplements sont nécessaires pour l'évaluation et la gestion des forêts (Burkhart et Tomé, 2012). Dans le contexte quantitatif lorsqu'on s'intéresse à la matière ligneuse, le volume d'un arbre est considéré comme une caractéristique dendrométrique fondamentale, souvent utilisé pour estimer la valeur et faciliter les différentes opérations de commercialisation du bois (Rondeux, 1993).

La méthode directe pour estimer les volumes d'un peuplement consiste à la mesure du volume de chaque arbre, et faire une somme de tous ces volumes. Ce procédé est quasiment impossible à appliquer sur le terrain, de ce fait, les gestionnaires forestiers ont eu recours aux tarifs de cubage ; qui sont considérés comme des outils d'estimation indirecte du volume des arbres sur pied. Ces tarifs se présentent sous forme de tableaux chiffrés, « tables de cubage », de graphiques ou d'équations qui fournissent le volume d'un arbre ou d'un peuplement en fonction d'une ou de plusieurs caractéristiques dendrométriques mesurables relatives à celui-ci, tels que le diamètre à la hauteur de poitrine (DBH) et la hauteur totale, ou au peuplement comme la surface terrière par hectare ou la hauteur moyenne (Cailliez, 1980 ; Rondeux, 1993 ; Burkhart et Tomé, 2012).

Selon Cailliez (1980), les tarifs de cubage sont classés en tarifs individuels, tarifs peuplements et tarifs de type intermédiaire. Un tarif individuel donne le volume d'un arbre en utilisant les entrées relatives à l'arbre et peut être un tarif à une, à deux ou à trois entrées, tandis que le tarif peuplement donne le volume d'un peuplement à partir des entrées relatives au peuplement lui-même, il peut être à deux ou à trois entrées. Il existe également des tarifs intermédiaires qui permettent d'estimer le volume d'un arbre en combinant les caractéristiques relatives à l'arbre et les caractéristiques relatives au peuplement.

Cependant, en se basant sur le nombre de caractéristiques qui sont appelées des entrées du tarif, les tarifs de cubage peuvent être classés comme suit ; les tarifs de cubage à une, à deux et à plus de deux entrées (Rondeux, 1993) :

Les tarifs de cubage à une entrée : Ces tarifs nécessitent une seule mesure par arbre pour estimer son volume (v) qui est la grosseur (diamètre) de la tige ou du tronc à hauteur d'homme et s'écrivent sous la forme : $v = f(\text{DBH})$.

Les tarifs de cubage à deux entrées : Outre la grosseur, le volume (v) de l'arbre est estimé en utilisant une caractéristique supplémentaire qui est sa hauteur totale (H). Ces tarifs s'écrivent sous la forme : $v = f(\text{DBH}, H)$.

Les tarifs de cubage à plus de deux entrées : En plus de la grosseur à hauteur d'homme (DBH), et la hauteur totale (H) de l'arbre, ces tarifs introduisent une troisième variable dendrométrique qui est la grosseur à une hauteur déterminée « i » et s'écrivent sous la forme : $v = f(\text{DBH}, d_i, H)$.

Ces différents tarifs présentent différents degrés de précision et de facilité d'élaboration et d'utilisation. Quoique le tarif à une entrée soit facile à réaliser et à utiliser, il est le moins précis et le domaine de son application est limité. Il dépend du nombre d'arbres utilisé dans sa construction et il est souvent utilisé comme un tarif d'aménagement. Les tarifs de cubage à deux entrées, utilisant deux caractéristiques dendrométriques de l'arbre pour calculer son volume, sont plus précis que les tarifs à une entrée. Finalement, les tarifs à plus de deux entrées offrent plus de précision, cependant sur le plan pratique leur utilisation est plus laborieuse (Rondeux, 1993 ; Prigent *et al.*, 2001).

Les équations de volume standards sont généralement utilisées pour l'estimation du volume total d'un arbre. Étant donné que des estimations du volume des tiges pour une variété de produits sont nécessaires, chacun avec des exigences de taille différentes et des normes de qualité marchande changeantes, il est préférable d'obtenir des estimations de volume pour divers niveaux de diamètre et de hauteur. Le tarif de cubage à diamètre et hauteur variables est un outil performant pour estimer n'importe quel volume intermédiaire de la grume ou la tige principale d'un arbre. Il peut aussi être employé pour estimer soit le diamètre à une découpe de hauteur donnée, soit la hauteur à une découpe de diamètre donné (Cao et Burkhart, 1980 *in* Fonweban, 1997 ; Prigent *et al.*, 2001 ; Burkhart et Tomé, 2012 ; Sghaier et Ammari, 2022 ; Essoussi et Sghaier, 2024).

A travers ce chapitre, nous visons d'établir des tarifs de cubage globaux à une et à deux entrées et d'ajuster un système d'équations pour les tarifs de cubage marchands pour les grumes de pin d'Alep dans la pinède de Beni Imloul, tout en testant plusieurs équations citées dans la littérature.

III.1 Matériels et méthodes

III.2 Acquisition des données

Les données utilisées pour l'élaboration des tarifs de cubage globaux et marchands sont issues des arbres de pin d'Alep qui proviennent des coupes d'exploitation finale (coupe rase). Au total 209 arbres abattus représentatifs des différentes classes de grosseurs et de hauteurs (DBH, H) de la pinède de Beni Imloul ont été considérés dans cette étude.

La hauteur totale H et le DBH de chaque arbre abattu ont été systématiquement mesurés. Après le prélèvement des branches, le diamètre à la base de la grume (0,30 m) a été mesuré, par la suite les mesures ont été faites par pas de 50 cm sur les deux premiers mètres, puis par pas de un mètre jusqu'à la découpe 7 cm de diamètre (diamètre fin-bout). Le volume du bois fort (vbf) de la grume a été calculé pour chaque arbre selon la méthode des billons successifs (Rondeux, 1993). Le volume total du bois fort (vbf) de la grume d'un arbre résulte de la sommation des volumes des billons constituant cet arbre, calculés selon la formule de Newton/Simpson. Pour l'élaboration des tarifs marchands, les volumes cumulés vd_{ij} et vh_{ij} , correspondant aux volumes de l'arbre i jusqu'à différentes découpes j ont été calculés par la sommation des volumes des billons successifs en commençant par la base.

III.2.1 Méthodes d'ajustement

III.2.1.1 Tarifs globaux

L'ajustement des différentes fonctions des tarifs de cubage globaux étudiées a été effectué selon la méthode des moindres carrés ordinaires (MCO) à l'aide de la procédure REG de SAS/STAT (SAS, 2004 a) pour les fonctions linéaires (F1, F2, F4, F5, F6) et la procédure MODEL de SAS/ETS (SAS, 2004 b) pour les fonctions non linéaires (F3, F7, F8, F9).

III.2.1.2 Tarifs marchands

III.2.1.2.1 Les rapports de volume ($r_{vd_{ij}}$ et $r_{vh_{ij}}$)

Les équations de rapports de volumes à différentes découpes ($r_{vd_{ij}}$ et $r_{vh_{ij}}$) ont été ajustées à l'ensemble des données par régression non linéaire.

D'après Prégnet *et al.* (2001) et Sghaier et Ammari (2022), l'utilisation des volumes qui proviennent d'un même arbre (mesures longitudinales) pose un problème des autocorrélations entre les résidus successifs qui en résultent (le volume évalué à un certain diamètre est fortement corrélé au volume précédent évalué à un diamètre inférieur). De ce fait, un modèle autorégressif de correction de l'auto-corrélation des résidus $CAR(x)$: "*Continuous-time Autoregressive Residual (error) structure*" a été incorporé au modèle d'ajustement des paramètres des différentes fonctions étudiées ; afin de contrôler cette autocorrélation et augmenter leur précision (Sghaier et Ammari, 2022).

Le modèle CAR(x) à incorporer est donné par la formule suivante :

$$e_{ij} = \sum_{n=1}^x d_n \rho_n^{h_{ij} - h_{i(j-n)}} e_{i(j-n)} + \varepsilon_{ij}$$

Où :

e_{ij} : est la différence entre le rapport de volume observé et celui estimé de l'arbre i jusqu'à la découpe j.

d_n : est une variable « binaire » qui prend 1 si les mesures correspondent à des découpes différentes pour un même arbre et 0 sinon.

ρ_n : est le paramètre du n^{ième} ordre autorégressif à estimer.

$h_{ij} - h_{i(j-n)}$: est la longueur du billon (en m) qui sépare la j^{ième} de la j^{ième} - n découpe de l'arbre (i).

III.2.1.2.2 Le système d'équations (S)

La méthode d'ajustement utilisée pour le système d'équations (S) est celle de régressions non linéaires sans corrélations apparentes NSUR (*Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations*). Contrairement à la méthode OLS d'estimation des paramètres, cette méthode permet de résoudre le problème des corrélations ou des dépendances entre les termes d'erreurs des différentes équations du système qui utilisent les mêmes variables dépendantes (Sghaier et Ammari, 2022).

III.2.2 Fonctions candidates

III.2.2.1 Tarifs globaux

De nombreuses fonctions utilisées pour l'ajustement des tarifs de cubage à une et à deux entrées sont disponibles dans la littérature (Palm, 1983 ; Rondeux, 1993 ; Fonweban et Houllier, 1997 ; Sghaier *et al.*, 2008, 2013). Les neuf fonctions suivantes ont été ajustées et comparées dans le cadre de cette étude :

$$v_i = a_0 + a_1 Di + a_2 Di^2 + \varepsilon_i \quad \text{(F1)}$$

$$v_i = a_0 + a_1 Di + a_2 Di^2 + a_3 Di^3 + \varepsilon_i \quad \text{(F2)}$$

$$v_i = a_0 d_i^{a_1} + \varepsilon_i \quad \text{(F3)}$$

$$v_i = a_0 + a_1 Di + a_2 Di^2 + a_3 Di^3 Hi + \varepsilon_i \quad \text{(F4)}$$

$$v_i = a_0 + a_1 Di + a_2 Di^2 + a_3 Di^3 + a_4 Di^3 Hi + \varepsilon_i \quad \text{(F5)}$$

$$v_i = a_0 + a_1 Di + a_2 Di^2 + a_3 Di^3 + a_4 Hi + a_5 Di^2 Hi + \varepsilon_i \quad \text{(F6)}$$

$$v_i = a_0 Di^{a_1} Hi^{a_1} + \varepsilon_i \quad \text{(F7)}$$

$$v_i = Di^{(a+a_1 Hi)} + \varepsilon_i \quad \text{(F8)}$$

$$v_i = a_1 D_i^{a_2} e^{(a_3 H_i)} + \varepsilon_i \quad (\text{F9})$$

où v_i , D_i et H_i désignent le volume bois fort, le diamètre à hauteur d'homme et la hauteur totale de l'arbre i , respectivement, ε_i est un résidu, variable aléatoire de moyenne nulle et de variance σ^2 .

III.2.2.2 Tarifs marchands

III.2.2.2.1 Les rapports de volume (rvd_{ij} et rvh_{ij})

Les équations des rapports de volume pour un arbre (i) aux différentes découpes j , ont les formes suivantes :

$$Rvd_{ij} = \frac{vd_{ij}}{v_i} = f(d_{ij}, D_i) \text{ et } Rvh_{ij} = \frac{vh_{ij}}{v_i} = f(h_{ij}, H_i)$$

Dans le but de choisir les fonctions les plus adéquates pour le rapport des volumes, des fonctions citées dans la littérature (Burkhart, 1977 ; Fonweban et Houllier, 1997 ; Prigent *et al.*, 2001 ; Burkhart et Tomé, 2012 ; Sghaier et Ammari, 2022) ont été ajustées et comparées à savoir :

- Les fonctions exprimant le rapport de volume (Rvd_{ij}) de la grume d'un arbre (i) jusqu'à un diamètre donné d_{ij} , en fonction de D_i et de d_{ij} .

$$Rvd_{ij} = 1 + b_0 \left(\frac{d_{ij}}{D_i} \right)^{b_1} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{F 10})$$

$$Rvd_{ij} = \exp \left(\frac{b_0 d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{F 11})$$

$$Rvd_{ij} = 1 + b_0 \left(\frac{d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{F 12})$$

- Les fonctions exprimant le rapport de volume (Rvh_{ij}) de la grume d'un arbre (i) jusqu'à une hauteur donnée h_{ij} , en fonction de la hauteur totale de l'arbre H_i et de h_{ij} .

$$Rvh_{ij} = 1 + b_0 \left(\frac{(H_i - h_{ij})^{b_1}}{H_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{F 13})$$

$$Rvh_{ij} = 1 + b_0 \left(\frac{H_i - h_{ij}}{H_i} \right)^{b_1} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{F 14})$$

$$Rvh_{ij} = \exp \left(\frac{b_0 (H_i - h_{ij})^{b_1}}{H_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{F 15})$$

Où :

Rvd_{ij} et Rvh_{ij} sont les rapports des volumes cumulés des billons de la grume i jusqu'à la découpe j divisés par le volume total de la grume i .

D_i et H_i représentant le DBH et la hauteur totale de l'arbre (i).

d_{ij} et h_{ij} représentant le diamètre et la hauteur à une coupe donnée j .

Après ajustement et comparaison des fonctions des rapports de volume (F10 à F15), les deux fonctions F11 et F15 ont été retenues.

III.2.2.2.2 Construction d'un système d'équations (S)

Pour un niveau de découpe donné j de la grume (d_{ij}, h_{ij}) , les deux rapports Rvd_{ij} et Rvh_{ij} sont les mêmes. En se basant sur cette égalité, on peut calculer les deux variables $(d_{ij}$ ou $h_{ij})$, l'une en fonction de l'autre et des deux caractéristiques dendrométriques de l'arbre en question, Di ou Hi (Sghaier et Ammari, 2022).

A partir des deux fonctions F11 et F15 retenues, on peut déduire d_{ij} et h_{ij} , obtenant ainsi les deux fonctions suivantes :

$$d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} Di^{b_2/b_1} \left((Hi - h_{ij})^{b_4/b_1} / Hi^{b_5/b_1} \right) \quad \text{(F16)}$$

$$h_{ij} = Hi - (b_0/b_3)^{1/b_4} (Hi)^{b_5/b_4} (d_{ij}^{b_1/b_4} / Di^{b_2/b_4}) \quad \text{(F17)}$$

Les deux fonctions qui permettent de prédire le volume de la grume jusqu'à une découpe d_{ij} ou une hauteur h_{ij} peuvent être obtenues en remplaçant le volume v_i de l'arbre i dans les équations F11 et F15 par l'équation F7 relative au tarif à deux entrées, utilisée pour l'estimation du volume bois fort de la grume. Ils en résultent ces deux équations :

- Volume de la grume jusqu'à une découpe d_{ij} :

$$vd_{ij} = (v_i \times Rvd_{ij}) = (a_0 Di^{a_1} Hi^{a_2}) \times \exp(b_0 d_{ij}^{b_1} / Di^{b_2}) \quad \text{(F18)}$$

- Volume de la grume jusqu'à une hauteur h_{ij} :

$$vh_{ij} = (v_i \times Rvh_{ij}) = (a_0 Di^{a_1} Hi^{a_2}) \times \exp\left(b_3 (Hi - h_{ij})^{b_4} / Hi^{b_5}\right) \quad \text{(F19)}$$

Les deux équations F18 et F19 montrent que lorsqu'on considère toute la grume, c'est-à-dire $d_{ij} = 0$ ou $h_{ij} = Hi$, les deux volumes vh_{ij} ou vd_{ij} correspondent au volume total de la grume, puisque la deuxième partie de chacune des deux équations est égale à l'unité (exponentielle de la valeur zéro).

A la fin, le système d'équations (S) à ajuster sur les données issues des analyses de tiges (volumes des différents billons) effectuées sur les arbres cubés est le suivant :

$$(S) \begin{cases} d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} Di^{b_2/b_1} \left((Hi - h_{ij})^{b_4/b_1} / Hi^{b_5/b_1} \right) & \text{(F16)} \\ h_{ij} = Hi - (b_0/b_3)^{1/b_4} (Hi)^{b_5/b_4} (d_{ij}^{b_1/b_4} / Di^{b_2/b_4}) & \text{(F17)} \\ vd_{ij} = (a_0 Di^{a_1} Hi^{a_2}) \times \exp(b_0 d_{ij}^{b_1} / Di^{b_2}) & \text{(F18)} \\ vh_{ij} = (a_0 Di^{a_1} Hi^{a_2}) \times \exp\left(b_3 (Hi - h_{ij})^{b_4} / Hi^{b_5}\right) & \text{(F19)} \end{cases}$$

Avec :

a_0 , a_1 et a_2 représentant les paramètres fixes et égaux aux valeurs estimées pour le tarif global à deux entrées de la grume ; D_i et H_i représentent le DBH et la hauteur totale de l'arbre i .

III.2.3 Pondération

Il est connu que pour un échantillon déterminé d'arbres, la variance des volumes tend à augmenter avec les grosseurs, et souvent d'une façon proportionnelle à la quantité $(D^2 H)^2$, soit au carré du produit du carré du diamètre D par la hauteur H (Rondeux, 1993). Pour résoudre le problème d'inégalité des variances résiduelles ou d'hétéroscédasticité observée au niveau des classes de diamètre et améliorer l'estimation des paramètres, différents auteurs ont eu recours à la méthode des moindres carrés pondérés. Cette méthode consiste à déterminer les paramètres de l'équation de régression, en accordant aux résidus des poids, w_i , inversement proportionnels à leur variance σ_i^2 . Le calcul des paramètres se fait en minimisant la somme pondérée des carrés des écarts :

$$\sum_{i=1}^n w_i (v_i - \hat{v}_i)^2$$

Avec :

$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$ Correspondant aux poids accordés aux résidus (Sghaier *et al.*, 2008).

Pour déterminer le poids de pondération à utiliser, nous avons fait appel à la méthode des variances conditionnelles où l'échantillon de données est réparti par classes de diamètres de telle manière qu'on puisse calculer une variance du volume σ_i^2 pour chaque classe. On calcule par la suite, par régression, la relation existante entre la variance du volume et les dimensions des arbres (par exemple le diamètre, le carré du diamètre ou toute autre puissance du diamètre) (Sghaier *et al.*, 2008).

III.2.4 Critères d'appréciation de la qualité d'ajustement et choix des meilleures fonctions

Le choix du tarif de cubage adéquat est basé sur la comparaison des critères de mesure des capacités d'ajustement et de prédiction ainsi que la normalité de la distribution des résidus issus de chaque fonction testée.

III.2.4.1 Capacité d'ajustement

- **Le coefficient de détermination ajusté R_{aj}^2** : Il représente la part de variabilité de la variable dépendante qui est expliquée par la régression. Contrairement au coefficient de

détermination ordinaire R^2 , le coefficient de détermination ajusté tient compte du nombre de paramètres (p) introduits dans le modèle, et il est utilisé pour comparer des modèles présentant un nombre différent de paramètres. Il est donné par la formule suivante (Palm, 1988 ; Sghaier *et al.*, 2008) :

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(n - 1) \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)^2}{(n - p) \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}$$

- **Le biais** : le biais est la moyenne des résidus et se calcule comme suit :

$$biais = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_i)$$

Plus le biais est faible (proche de 0), meilleur est l'ajustement.

- **La moyenne quadratique des résidus absolus (S_a)** : Elle donne l'ordre de grandeur de l'écart absolu existant en moyenne entre la valeur observée v_i et la valeur estimée \hat{v}_i (n : le nombre d'observations), elle est essentiellement fonction des erreurs commises sur les gros arbres, elle s'exprime par :

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

- **La moyenne quadratique des résidus relatifs (S_r)** : Elle est liée davantage aux erreurs commises sur les petits arbres, elle s'exprime comme suit :

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

L'ajustement est d'autant meilleur que les valeurs de ces deux paramètres sont faibles (Palm, 1981, 1986 ; Rondeux, 1993).

- **La normalité de la distribution des résidus** : La violation possible de la normalité de la distribution des erreurs a été examinée à l'aide du test de normalité de Ryan-Joiner (Ryan et Joiner, 1976) et de la représentation graphique des quantiles normaux (QQ-probability plots). Le principe de ce test repose sur le calcul du coefficient de corrélation (ρ_{obs}) entre les résidus ($e_i = v_i - \hat{v}_i$) classés par ordre décroissant et les scores normaux ou quantiles normaux (De Smith, 2015). Une valeur de ρ_{obs} proche de l'unité indique que la distribution des résidus peut être considérée comme normale. La normalité des résidus doit être rejetée au niveau de confiance $(1 - \alpha)$ lorsque $\hat{\rho}_{obs} < \rho_\alpha$, les valeurs ρ_α étant reprises dans une table qui est fonction du nombre d'observations n (Looney et Gullledge, 1985).

- **Test d'indépendance des résidus** : Il s'agit d'un test qui permet de vérifier l'hypothèse d'indépendance des résidus lorsque ceux-ci sont classés selon un ordre logique, par exemple en fonction des valeurs croissantes ou décroissantes de la grosseur des tiges (Palm, 1986). Cette vérification peut se faire par le test de DURBIN-WATSON. La méthode consiste à calculer la quantité suivante :

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2}$$

avec : $e_i = v_i - \hat{v}_i$

Cette caractéristique est comprise entre 0 et 4 ; une valeur très inférieure à 2 indique une corrélation positive entre les résidus successifs et une valeur très supérieure à 2 correspond à une corrélation négative entre ces résidus. Par contre, une valeur voisine de 2 permet d'accepter l'hypothèse d'indépendance des résidus. Des tables permettant de tester de façon rigoureuse l'hypothèse d'indépendance sont données notamment par Drapper et Smith (1981). Un test approché a été proposé par VON NEUMANN (Morice et Chartier, 1954). Ce test est basé sur le caractère asymptotiquement normal du quotient :

$$q = \frac{DW}{2},$$

Il consiste à comparer la valeur :

$$Z_{obs} = \frac{|q - 1|}{\sqrt{\frac{n-2}{n^2-1}}},$$

à la valeur théorique $Z_{1-\alpha/2}$ (distribution normale réduite) et à rejeter l'hypothèse d'indépendance des résidus si la valeur Z_{obs} est supérieure ou égale à $Z_{1-\alpha/2}$. Pour un degré de confiance de 95%, $Z_{1-\alpha/2} = 1,96$.

III.2.4.2 Capacité de prédiction

La capacité de prédiction des différentes fonctions étudiées est basée sur le calcul des résidus *PRESS* (*Prediction Sum of Squares*) ou erreurs de prédiction (Sánchez-González *et al.*, 2005, 2007 ; Sghaier *et al.*, 2019, 2020). Ces résidus sont équivalents aux résidus obtenus en omettant chaque fois une observation de la liste des données, en ajustant les paramètres de l'équation avec les autres observations restantes, en estimant la réponse de l'observation omise et en comparant la valeur prédite avec celle observée : $e_i = v_i - \hat{v}_{i,-i}$, ($i=1,2,\dots, n$) où v_i est le volume observé, $\hat{v}_{i,-i}$ est la valeur estimée de l'observation i (lorsque cette dernière

est absente des données utilisées pour l'ajustement des paramètres de l'équation de régression) et n est le nombre d'observations. Chaque équation ou fonction possède dans ce cas n résidus PRESS et la quantité PRESS est définie comme suit :

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_{i,-i})^2$$

Plus la valeur de *PRESS* est proche de la somme des carrés des écarts résiduels, meilleure est la capacité de prédiction de l'équation de régression en termes de précision. Les résidus *PRESS* ont été également utilisés pour calculer les critères de comparaison suivants :

- **Biais de prédiction :**

$$biaisp = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_{i,-i})$$

- **La moyenne quadratique des résidus absolus de prédiction**

$$S_{ap} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_{i,-i})^2}$$

- **La moyenne quadratique des résidus relatifs de prédiction**

$$S_{rp} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{v_i - \hat{v}_{i,-i}}{\hat{v}_{i,-i}} \right)^2}$$

- **Coefficient de détermination de prédiction (*press R-square*)**

$$R_{press}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \hat{v}_{i,-i})^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}$$

III.2.5 Précision des tarifs obtenus

Afin de vérifier la précision des estimations des tarifs retenus (un tarif à une entrée et un tarif à deux entrées), le coefficient de variation qui est le rapport en pourcent entre l'écart-type résiduel et le volume moyen exprimé en (%) a été calculé pour chacun.

III.3 Résultats

III.3.1 Répartition des données échantillonnées selon le DBH et la hauteur totale

Le tableau III.1 présente la répartition des 209 grumes d'arbres échantillonnés selon leur DBH et leur hauteur totale. Il en ressort que la majorité des arbres appartiennent aux classes de diamètre entre 25 et 55 cm, pour des hauteurs dépassant 12 m.

Tableau III.1. Répartition des arbres échantillonnés en fonction de leur DBH (cm) et leur hauteur totale H (m).

DBH (cm)	Hauteur totale (m)						Total	%
	8-9,9	10-11,9	12-13,9	14-15,9	16-17,9	18 et plus		
15-24,9	1	3	11	2			17	8,13
25-34,9		9	32	21	6	2	70	33,49
35-44,9			13	28	17	11	69	33,01
45-54,9			3	5	9	20	37	17,70
55 et plus				1	2	13	16	7,66
Total	1	12	59	57	34	46	209	100
%	0,48	5,74	28,23	27,27	16,27	22,01	100	

Selon la figure III.1 sur laquelle sont projetés les volumes des fûts déterminés lors des deux phases d'échantillonnage de 1999 et 2019 sous forme de nuage de points, une grande partie des points se superposent entre 20 et 55 cm. Cependant, l'inventaire de 1999 couvre les classes de diamètre dépassant 55 cm, tandis que l'inventaire de 2019 couvre en partie les diamètres de moins de 20 cm.

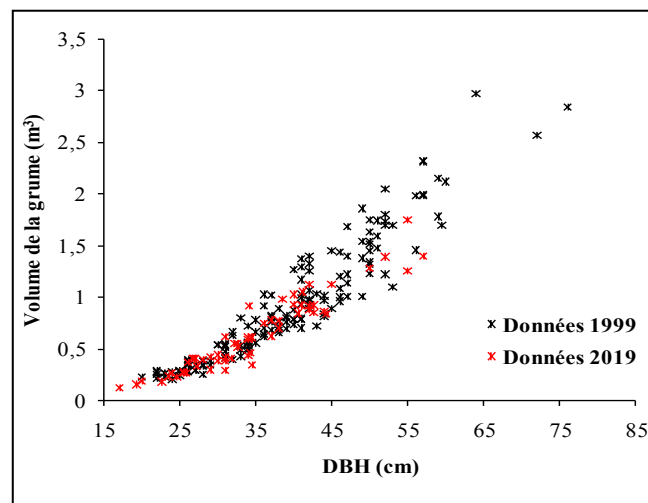


Figure III.1. Volumes des grumes déterminés lors des deux phases d'échantillonnage de 1999 puis 2019 en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH).

III.3.2 Les tarifs globaux

Dans le but de choisir la meilleure fonction pour les tarifs de cubage à une et à deux entrées nous avons procédé à une comparaison basée sur les critères d'ajustement et de prédiction ainsi que la comparaison des différents graphiques des résidus.

III.3.2.1 Les tarifs à une entrée

D'après le tableau III.2 présentant les valeurs estimées des paramètres (coefficients de régression) et leur test de signification ainsi que les critères de comparaison des trois fonctions ; F1 et F2 (linéaires) et F3 (non linéaire), il ressort que :

Les deux premières fonctions présentent chacune un coefficient non significatif au seuil de 5 % (a_1 pour F1 et a_0 pour F2). Seule la fonction F3 présente des coefficients très hautement significatifs.

Les deux moyennes quadratiques des résidus relatifs d'ajustement (S_r) et de prédiction (S_{rp}) pour la fonction F1 sont supérieures à celles des autres fonctions, ce qui signifie des erreurs importantes commises sur les petits arbres, que ce soit pour l'ajustement ou la prédiction.

Les valeurs des critères de comparaison pour les fonctions F2 et F3 sont proches, et sont en faveur de la fonction F2, sachant que cette dernière présente un paramètre non significatif au seuil 5%, contrairement à la fonction F3, où tous les paramètres sont très hautement significatifs.

L'hypothèse d'indépendance des résidus est acceptée pour les trois fonctions avec une supériorité remarquable de la fonction F3.

Tableau III.2. Estimation des paramètres et critères de comparaison pour les tarifs à une entrée.

Fonction	Par.	Esti.	P> t	Capacité d'ajustement						Capacité de prédiction					
				Biais	RMSE	S _a	S _r	Z _{obs}	R _{aj} ²	Biais _p	RMSE _p	S _{ap}	S _{rp}	Z _{pobs}	R _{pred} ²
F1	a ₀	-0,336	0,0139	1,368E-16	0,1798	0,179	0,450	1,869	0,893	7,469E-04	0,1853	0,184	0,734	1,940	0,887
	a ₁	0,013	0,0519												
	a ₂	4,33E-04	<0,0001												
F2	a ₀	0,666	0,0675	1,786E-17	0,1765	0,175	0,183	0,687	0,897	6,058E-04	0,1806	0,179	0,186	0,729	0,894
	a ₁	-0,064	0,0179												
	a ₂	0,002	0,0004												
	a ₃	-1,402E-05	0,0033												
F3	a ₀	3,81E-04	<0,0001	-0,008	0,1833	0,182	0,191	0,203	0,889	-0,0088	0,1891	0,188	0,193	0,466	0,882
	a ₁	2,096	<0,0001												

Par. : paramètre ; **Esti.** : valeur estimée, **Biais** : moyenne des résidus, **RMSE** : écart-type des résidus, **S_a** : moyenne quadratique des résidus absolus, **S_r** : moyenne quadratique des résidus relatifs, **Z_{obs}** : valeur observée du test d'indépendance des résidus, **R_{aj}²** : coefficient de détermination ajusté, **Biais_p** : biais de prédiction ; **RMSE_p** : écart-type des résidus de prédiction ; **S_{ap}** : moyenne quadratique des résidus absolus de prédiction; **S_{rp}** : moyenne quadratique des résidus relatifs de prédiction ; **Z_{pobs}** : valeur observée du test d'indépendance des résidus de prédiction, **R_{pred}²** : coefficient de détermination de prédiction.

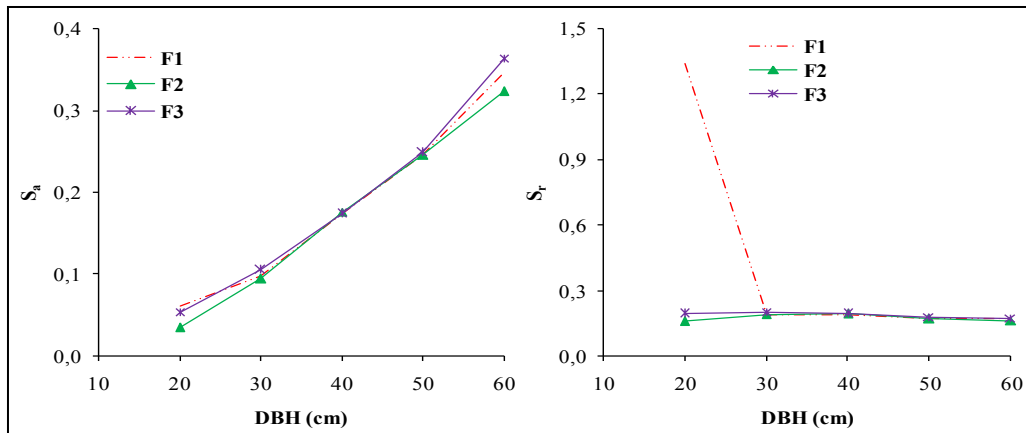


Figure III.2. Valeurs de la moyenne quadratique des résidus absolus (S_a) et relatifs (S_r) par classe de diamètre pour les tarifs à une entrée.

D'après les graphiques de la figure III.2, il ressort que les erreurs les plus faibles commises sur les gros arbres (S_a) et les petits arbres (S_r) pour la classe de diamètre 15 - 25 cm de diamètre (centre de classe = 20 cm) sont obtenues par la fonction F2, suivie par la fonction F3 puis F1. Cette dernière fonction (F3) présente des valeurs très élevées de la moyenne quadratique des résidus relatifs (S_r) au niveau des petites tiges (< 25 cm de diamètre).

Pour les diamètres entre 25 et 55 cm, on remarque que les valeurs de ces deux critères (S_a et S_r) pour les trois fonctions sont très proches, puis à partir de 55 cm la fonction F3 présente des valeurs de la moyenne quadratique des résidus absolus (S_a) un peu plus élevée suivie par F1 et F2.

Cependant pour la moyenne quadratique des résidus relatifs (S_r), un grand écart est constaté pour la fonction F1 sur l'extrémité inférieure, entre 15 et 25 cm de diamètre. Cela explique la grande erreur d'estimation commise sur les petits arbres par cette fonction. Au-delà de cette classe de diamètre, les trois fonctions donnent des valeurs très proches.

Les quantiles normaux (QQ-probability plots) des résidus et le test de normalité de Ryan-Joiner pour chaque fonction, donnés par la figure III.3, montrent que les trois fonctions donnent des résidus qui s'écartent légèrement de la distribution normale dans les deux extrémités, avec des valeurs de ρ_{obs} de l'ordre de 0,9822, 0,9758 et 0,9706 pour les fonctions F1, F2 et F3 respectivement, et qui sont inférieurs à la valeur théorique qui est $\rho_{0,05} = 0,9934$, tout en précisant que c'est la fonction F1 qui s'écarte le moins de la distribution normale.

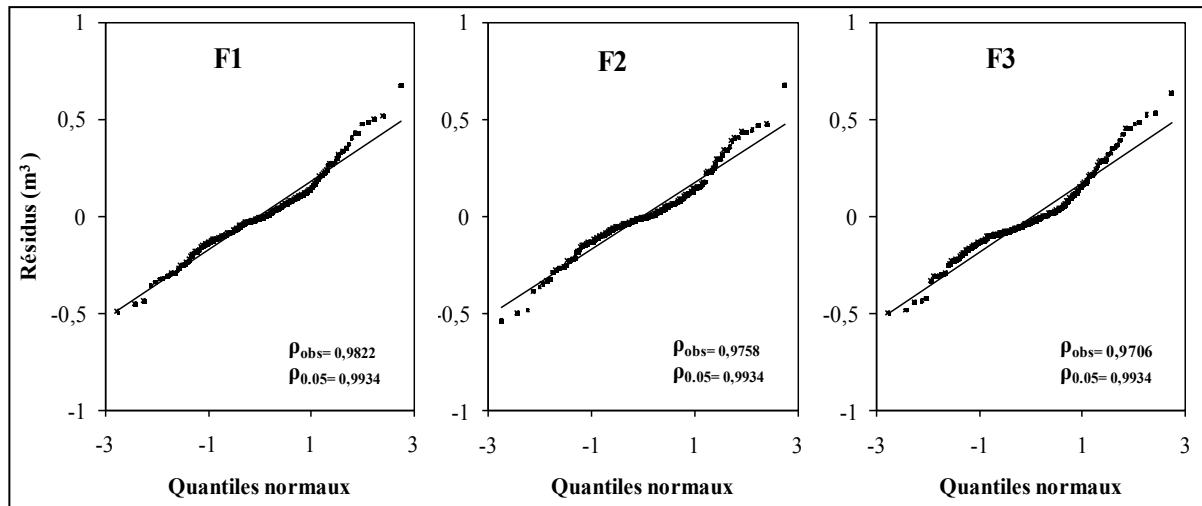


Figure III.3. – QQ-probability plots des résidus et test de normalité de Ryan-Joiner pour les tarifs à une entrée.

A partir de la figure III.4 qui présente la projection des résidus des volumes en fonction du diamètre à 1,30 m de hauteur (DBH) pour les tarifs à une entrée, on remarque que pour les diamètres inférieurs à 30 cm les volumes estimés par la fonction F1 sont inférieurs aux volumes observés, il y'a donc une sous-estimation des volumes, cependant les résidus obtenus par les fonctions F2 et F3 sont négatifs ; volumes estimés supérieurs aux volumes observés, il y a donc surestimation des volumes. Pour les diamètres supérieurs, les résidus sont distribués d'une manière plus ou moins homogène.

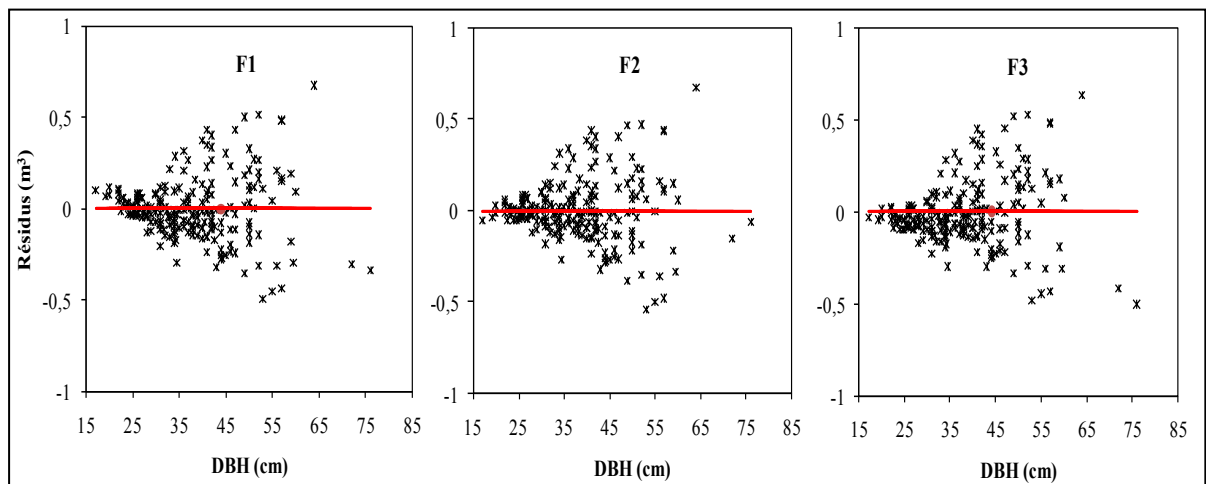


Figure III.4. Projection des résidus obtenus par les tarifs à une entrée en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) de hauteur.

En tenant compte de l'ensemble des résultats comparés ci-dessus, c'est la fonction **F3** dont tous les paramètres sont significatifs et qui montre une performance comparable à la fonction F2 et dépasse celle de la fonction F1 pour certains critères sera retenue pour le cubage des grumes d'arbres individuels du pin d'Alep de la forêt des Beni Imloul.

III.3.2.2 Les tarifs à deux entrées

Le tableau III.3 présente les résultats statistiques de l'ajustement des tarifs à deux entrées.

En se basant sur les valeurs des critères de mesure des capacités d'ajustement et de prédiction des différentes fonctions à deux entrées testées, nous constatons que les deux fonctions F5 et F6 présentent chacune un seul paramètre significatif. Quant au coefficient de détermination ajusté, à l'exception de la fonction F8 qui possède un R_{aj}^2 faible (0,615), toutes les autres fonctions possèdent un R_{aj}^2 élevé de l'ordre de 0,94.

Quoique tous les paramètres sont significatifs pour la fonction F8, cette dernière présente les valeurs de RMSE, S_a , S_r , S_{ap} et S_{rp} les plus élevées et R_{aj}^2 et R_{press}^2 les plus faibles.

En ce qui concerne les fonctions F7 et F9 où tous les paramètres sont significatifs également, ces dernières possèdent des valeurs proches des différents critères de comparaison considérés sauf pour la valeur de Z_{obs} qui est en faveur de la fonction F7 pour la capacité d'ajustement ainsi que de prédiction.

L'hypothèse d'indépendance des résidus est acceptée pour toutes les fonctions sauf pour la fonction F8.

Les erreurs commises sur les gros arbres et les petits arbres, sont présentées dans la figure III.5 qui montre que c'est la fonction F8 qui présente les valeurs les plus élevées de (S_a) pour toutes les classes de diamètre. Pour les autres fonctions, les valeurs de (S_a) sont très rapprochées.

Pour les erreurs commises sur les petits arbres (S_r), les deux fonctions F4 et F8 ont les valeurs les plus élevées jusqu'à 25 cm de diamètre, au-delà on constate une diminution importante de cette valeur pour la fonction F4, et c'est la fonction F8 qui présente les valeurs les plus élevées pour les classes de diamètre supérieures. Les valeurs des fonctions F5, F6, F7 et F9 restent proches avec de légères différences pour les diamètres inférieurs à 25 cm.

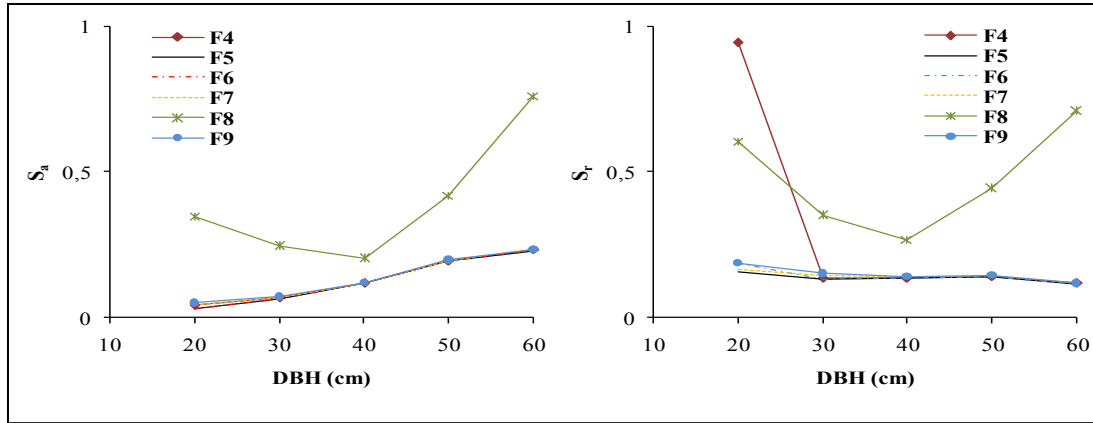


Figure III.5. Valeurs de la moyenne quadratique des résidus absolus (S_a) et relatifs (S_r) par classe de diamètre pour les tarifs à deux entrées.

En comparant la normalité de la distribution des résidus, avec le test de normalité de Ryan-Joiner, on constate que toutes les fonctions donnent des résidus qui s'écartent légèrement de la distribution normale dans les deux extrémités avec des valeurs de ρ_{obs} de l'ordre de 0,95 et qui sont inférieures à la valeur théorique $\rho_{0.05} = 0,99$ (Figure III.6).

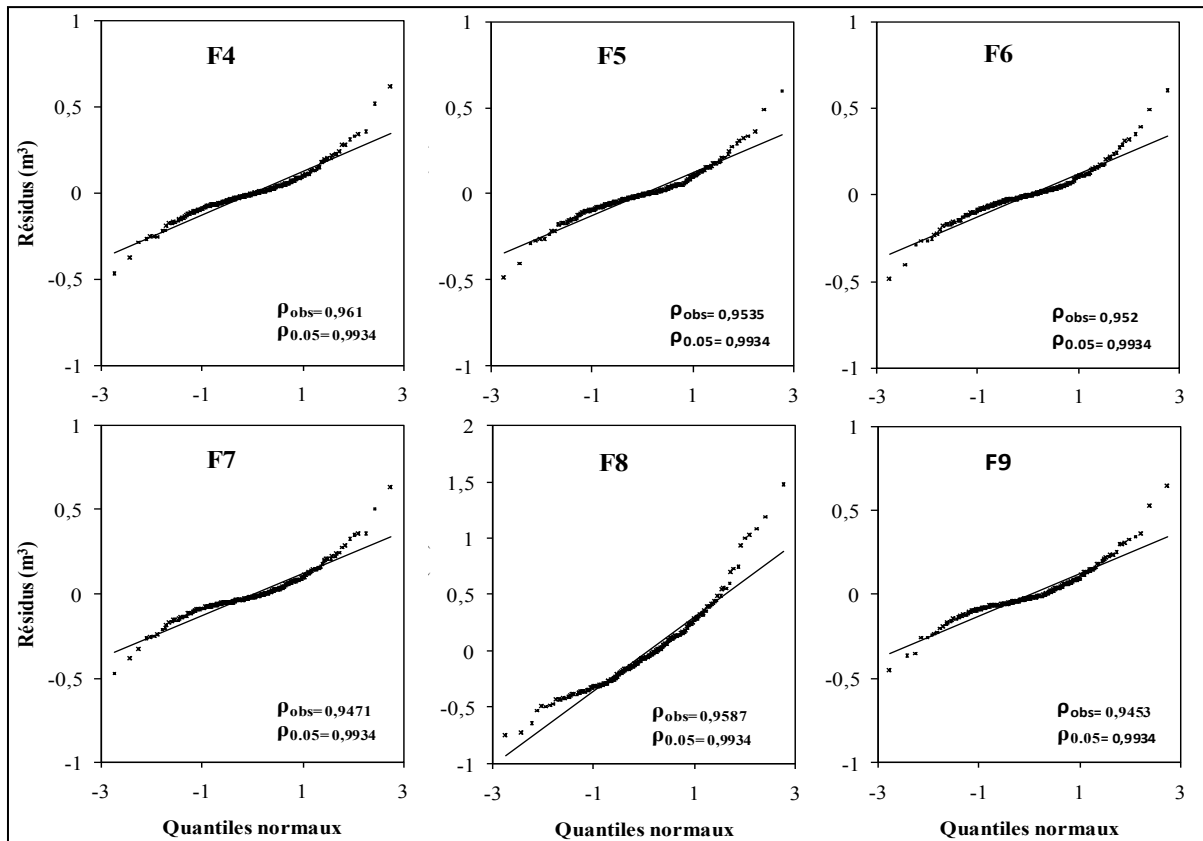


Figure III.6. QQ-probability plots des résidus et test de normalité de Ryan-Joiner pour les tarifs à deux entrées.

Tableau III.3. Estimation des paramètres et critères de comparaison pour les tarifs à deux entrées.

Fonction	Par.	Esti.	P> t	Capacité d'ajustement						Capacité de prédiction					
				Biais	RMSE	S _a	S _r	Z _{obs}	R _{aj} ²	Biais _p	RMSE _p	S _{ap}	S _{rp}	Z _{pobs}	R _{pred} ²
F4	a ₀	-0,439	<0,0001	4,172E-16	0,1306	0,129	0,320	0,515	0,944	-1,3E-04	0,1351	0,134	0,452	0,691	0,940
	a ₁	0,028	<0,0001												
	a ₂	-3,892E-04	<0,0001												
	a ₃	3,188 E-05	<0,0001												
F5	a ₀	-0,046	0,8672	6,106E-16	0,1301	0,129	0,138	0,470	0,944	-6,2E-04	0,1366	0,135	0,143	0,657	0,939
	a ₁	-2,35 E-03	0,9085												
	a ₂	3,559E-04	0,4674												
	a ₃	-5,47E-06	0,1233												
	a ₄	3,121E-05	<0,0001												
F6	a ₀	-0,098	0,7237	5,466E-16	0,13	0,128	0,142	0,323	0,9441	-3,91E-04	0,1368	0,135	0,150	0,578	0,940
	a ₁	-0,011	0,6213												
	a ₂	5,674E-04	0,2731												
	a ₃	-5,68E-06	0,1099												
	a ₄	0,014	0,2099												
	a ₅	2,476E-05	<0,0001												
F7	a ₀	1,07E-04	<0,0001	-0,004	0,1316	0,131	0,144	0,799	0,943	-0,0047	0,1357	0,135	0,146	0,969	0,940
	a ₁	1,6729	<0,0001												
	a ₂	1,0203	<0,0001												
F8	a ₀	-0,7024	<0,0001	-0,024	0,3409	0,339	0,410	8,169	0,615	-0,0243	0,3462	0,345	0,414	8,117	0,605
	a ₁	0,0412	<0,0001												
F9	a ₀	6,56E-04	<0,0001	-0,005	0,1323	0,131	0,149	1,100	0,942	-0,00585	0,1364	0,135	0,151	1,263	0,939
	a ₁	1,6931	<0,0001												
	a ₂	0,058	<0,0001												

La projection des résidus obtenus par les fonctions des tarifs à deux entrées en fonction du diamètre à 1,30 m présentée dans la figure III.7 montre que ces résidus sont distribués aléatoirement autour de l'axe horizontal d'ordonnée zéro, à l'exception de la fonction F8 qui présente des résidus croissants en fonction du diamètre.

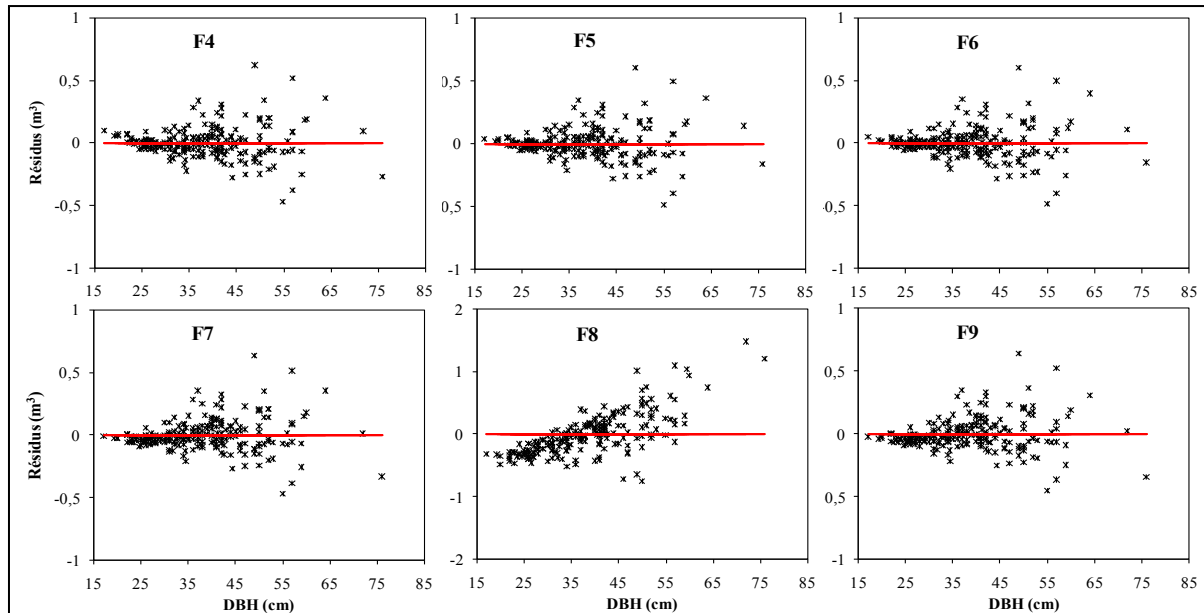


Figure III.7. Projection des résidus obtenus par les tarifs à deux entrées en fonction du diamètre à 1,30 m de hauteur.

En se basant sur la signification des paramètres, les valeurs des critères de la capacité d'ajustement et de prédiction ainsi que les graphiques des résidus issus des différentes fonctions testées, c'est la fonction **F7** qui est la plus appropriée pour être utilisée comme tarif à deux entrées pour le cubage d'arbres individuels de pin d'Alep dans la forêt de Beni Imloul.

III.3.2.3 Effet de la pondération

- Poids de pondération

Pour déterminer le poids de pondération à utiliser en cas de besoin, nous avons regroupé les arbres en cinq classes d'intervalles identiques de 10 centimètres de diamètre. Le tableau III.4 présente, par classe de diamètre, les valeurs moyennes du diamètre et du volume bois fort des arbres cubés ainsi que les écart-types du volume.

Tableau III.4. Valeurs moyennes par classe de diamètre du volume bois fort des grumes d'arbres et des écarts types conditionnels du volume.

Classes DBH	Effectif	\bar{d} (cm)	\bar{v} (m ³)	$\hat{\sigma}_{v/d}$ (m ³)
15-24,9	17	22,118	0,217	0,0449
25-34,9	70	29,839	0,426	0,1349
35-44,9	69	39,793	0,874	0,1902
45-54,9	37	49,108	1,394	0,2868
55 et +	16	59,781	2,027	0,49
Total/ Moyenne	209	40,13	0,99	0,2294

Les résultats du tableau III.4 montrent que l'écart-type des volumes augmente avec l'augmentation du diamètre des arbres. Ainsi, pour calculer le poids de pondération à utiliser afin d'homogénéiser les variances conditionnelles, la régression linéaire suivante exprimant les logarithmes des variances conditionnelles en fonction des logarithmes des carrés des diamètres moyens des cinq classes de diamètre établies a été ajustée :

$$\log(\hat{\sigma}_{v/d}^2) = -19,739 + 2,2366X\log(\bar{d}^2) \text{ avec } R^2 = 0,9666$$

Après retour aux variables initiales, cette fonction peut se mettre sous la forme :

$$\hat{\sigma}_{v/d}^2 = 3E - 09X(\bar{d}^2)^{2,2366}$$

D'après les valeurs des paramètres de cette équation, la valeur de la pondération doit être égale à 4,48. Toutefois, sachant que le volume est lié au carré du diamètre, le poids de pondération w_i à utiliser est le suivant :

$$(1/Di^2)^{2,2366} \approx 1/Di^4$$

Pour choisir les deux meilleures fonctions à utiliser pour les tarifs à une et à deux entrées pour le pin d'Alep de la forêt de Beni Imloul, les deux fonctions préalablement retenues (F3 pour le tarif à une entrée et F7 pour le tarif à deux entrées) ont été ajustées sur les données issues des arbres cubés, sans et avec pondération en considérant $w=1/Di^4$ comme poids de pondération. Les résultats de ces ajustements figurent au tableau III.5. D'après les résultats obtenus, on constate que la pondération n'a pas amélioré significativement la précision des estimations sauf pour l'estimation des erreurs commises sur les petits arbres et ceci pour la capacité d'ajustement (S_r) comme pour la capacité de prédiction (S_{rp}), et ceci pour les deux tarifs à une et à deux entrées. L'indépendance des résidus est acceptée pour les deux modèles retenus sous leurs deux formes, pondérée et non pondérée, sauf pour la capacité de prédiction de la fonction F7 pondérée où la valeur de $Z_{p_{obs}}$ dépasse la valeur critique de 1,96.

En se basant sur les graphiques présentés par les figures III.8 et III.9, la pondération n'a pas amélioré globalement la précision des estimations ni la normalité de la distribution des résidus.

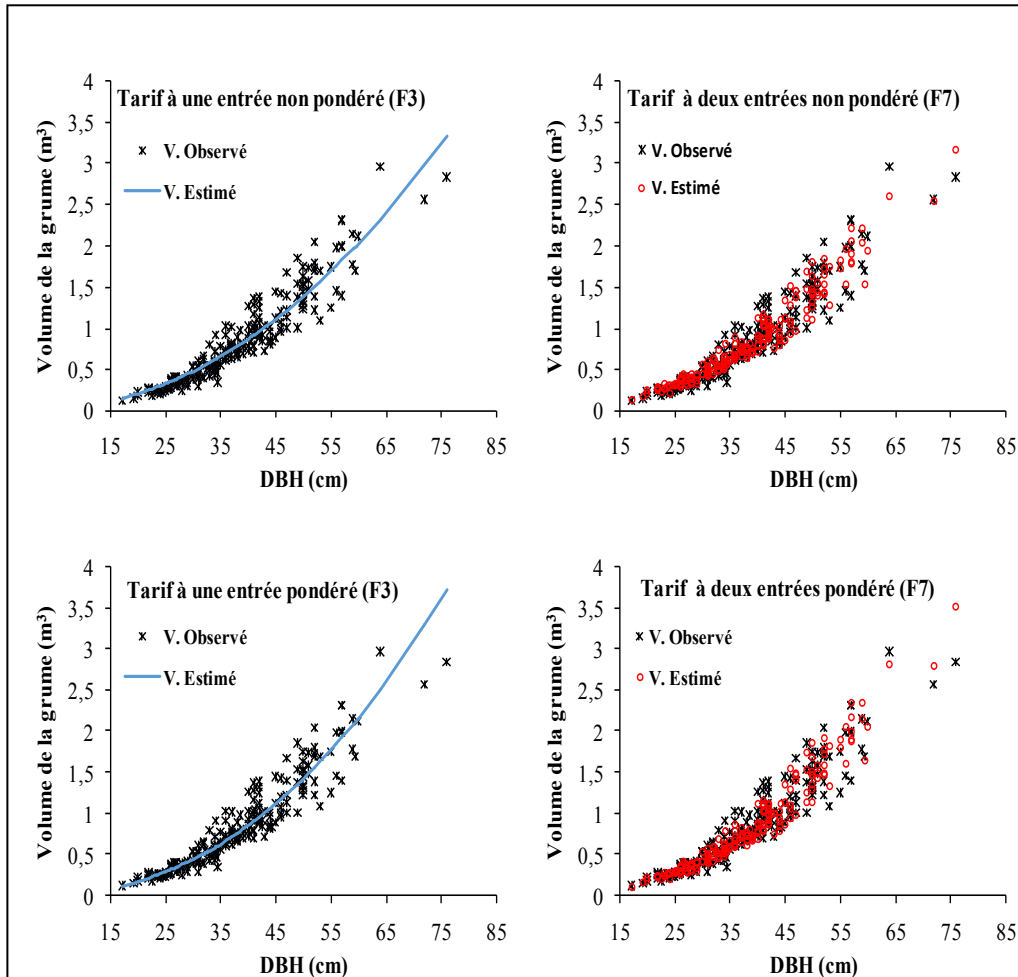


Figure III.8. Projection des volumes observés et des volumes estimés par les fonctions F3 et F7 en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) sans et avec pondération.

Tableau III.5. Valeurs estimées, test de signification des paramètres et précision des tarifs de cubage à une et à deux entrées des grumes d'arbres de pin d'Alep.

Type de tarif	Fonction	Par.	Esti.	p> t	Capacité d'ajustement						Capacité de prédiction					
					Biais	RMSE	S _a	S _r	Z _{obs}	R ² _{aj}	Biais _p	RMSE _p	S _{ap}	S _{rp}	Z _{pobs}	R ² _{pred}
Une entrée	$v_i = b_0 D_i^{b_1}$ Non pondéré	a ₀	3,81E-4	<0,0001	-0,008	0,1833	0,1824	0,1914	0,2026	0,8888	-0,009	0,1891	0,1882	0,1932	0,4668	0,8823
		a ₁	2,0961	<0,0001												
	$v_i = b_0 D_i^{b_1}$ Pondéré	a ₀	1,79E-04	<0,0001	-0,003	0,1915	0,1901	0,1852	1,4193	0,8787	0,003	0,1949	0,1935	0,1747	1,2424	0,8798
		a ₁	2,296	<0,0001												
Deux entrées	$v_i = b_0 D_i^{b_1} H_i^{b_2}$ Non pondéré	a ₀	1,07E-4	<0,0001	-0,004	0,1316	0,1307	0,1442	0,7966	0,9426	-0,005	0,1357	0,1347	0,1459	0,9666	0,9397
		a ₁	1,6729	<0,0001												
		a ₂	1,0203	<0,0001												
	$v_i = b_0 D_i^{b_1} H_i^{b_2}$ Pondéré	a ₀	6,10E-05	<0,0001	-0,003	0,1374	0,1364	0,1377	1,723	0,9375	0,003	0,1400	0,1390	0,1287	1,9854	0,9357
		a ₁	1,8214	<0,0001												
		a ₂	1,023	<0,0001												

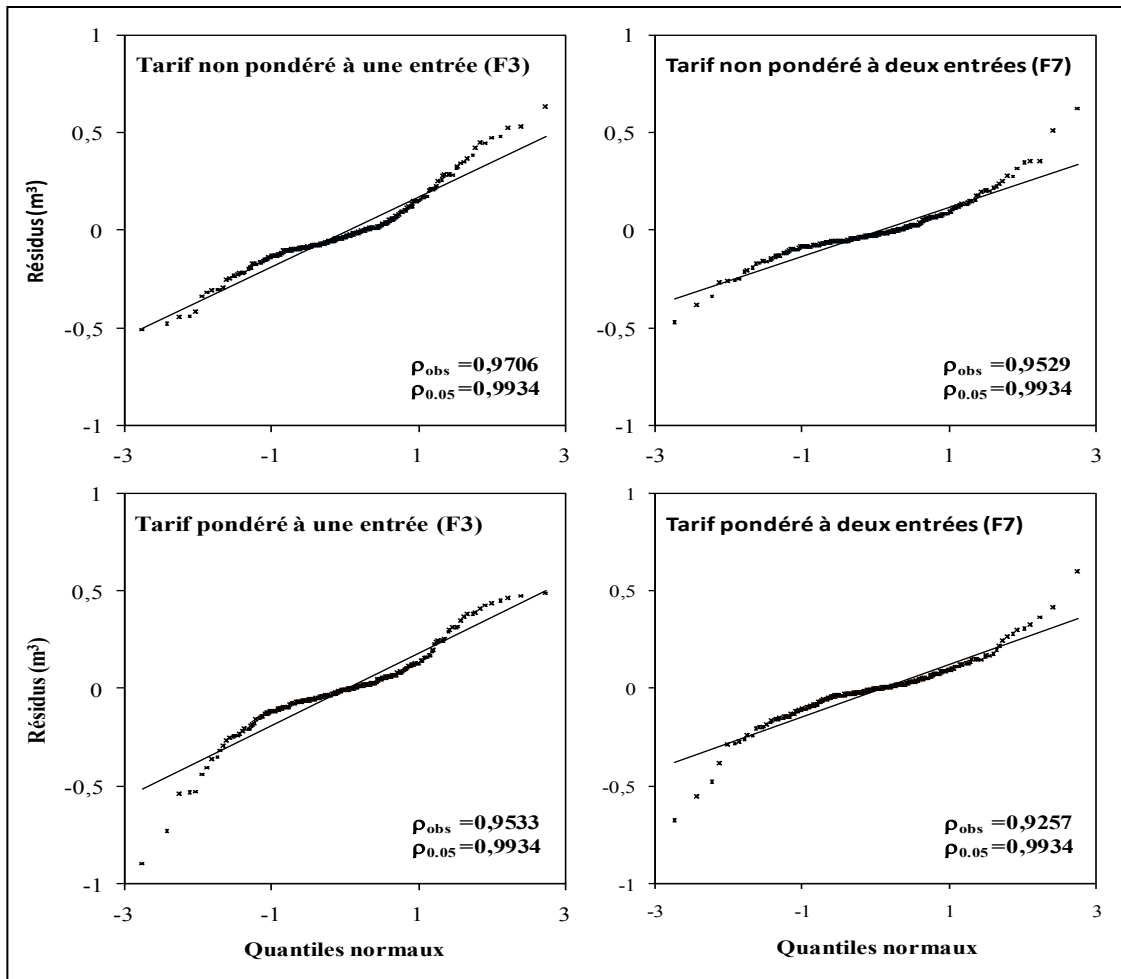


Figure III.9. Diagramme de QQ-probabilité des résidus (m^3) et test de normalité de Ryan-Joiner pour les tarifs de cubage à une et à deux entrées sans et avec pondération.

Toutefois, d'après les graphiques de projection des résidus en fonction du DBH (cm) pour les fonctions pondérées et non pondérées (Figure III.10), on constate que les volumes estimés par les équations non pondérées sont systématiquement supérieurs aux volumes observés pour les arbres de petites dimensions dont le DBH est inférieur ou égal à 30 cm (surestimation), tandis que les tarifs pondérés permettent de corriger cette surestimation et donnent une répartition aléatoire des résidus au tour de la valeur zéro tout au long de l'étendu des dimensions des arbres cubés. Étant donné que la pondération a permis de corriger le caractère aléatoire de la distribution des résidus sans diminuer d'une façon significative la précision des estimations, nous avons retenu les deux tarifs pondérés à une et à deux entrées pour le cubage des arbres de pin d'Alep de la forêt de Beni Imloul.

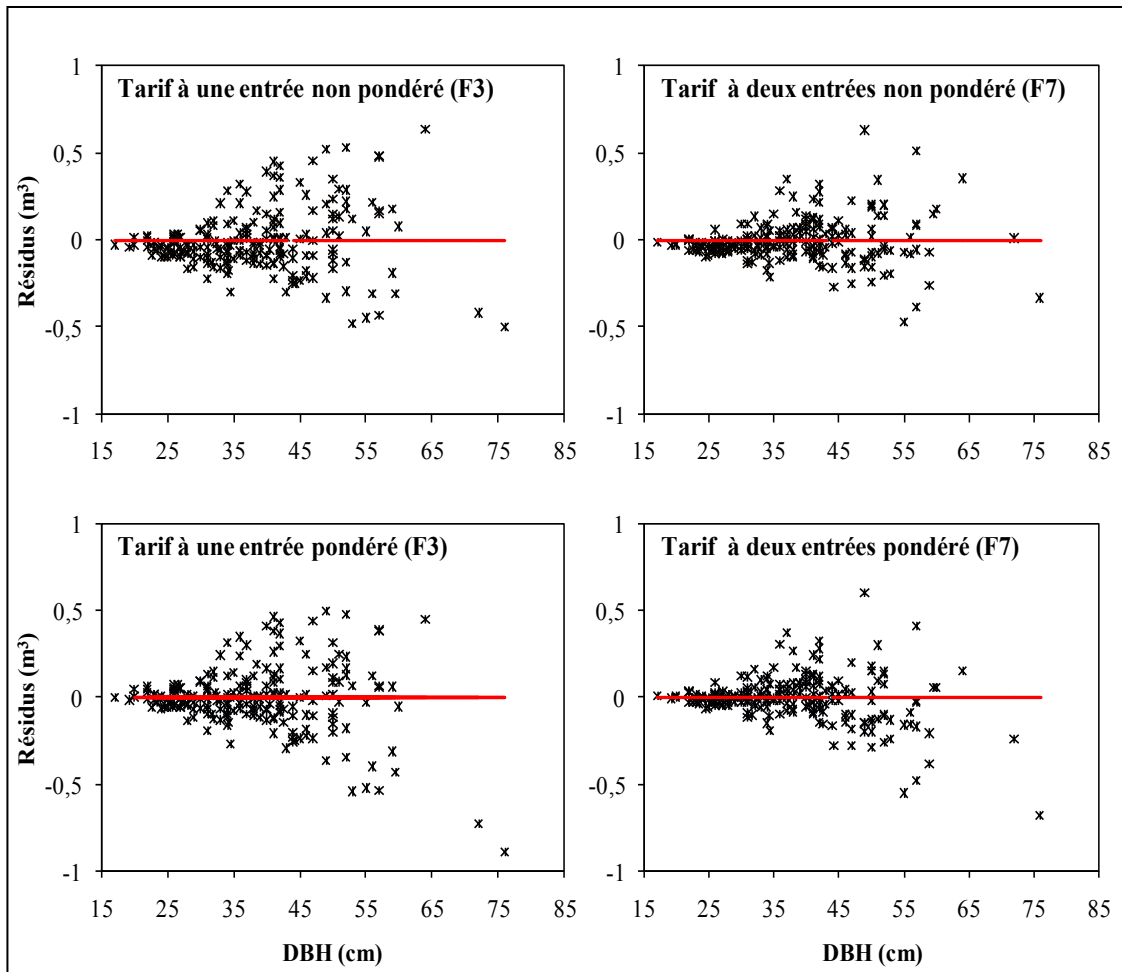


Figure III.10. Projection des résidus des volumes (m^3) issus des fonctions F3 et F7 ajustées sans et avec pondération en fonction du DBH (cm).

III.3.2.4 Tables de cubage

Le tableau III.6 représente les tables de cubage pour les volumes (m^3) par classe de diamètre (cm) et de hauteur (m), simulés à l'aide des équations pondérées à une et à deux entrées suivantes :

$$v_i = 1,97 \times 10^{-4} D_i^{2,296} \text{ avec } R^2 = 0,8787 \quad (\text{F3})$$

$$v_i = 6,10 \times 10^{-5} D_i^{1,8214} H_i^{1,023} \text{ avec } R^2 = 0,9375 \quad (\text{F7})$$

Où v_i est le volume exprimé en m^3 , D_i le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) en cm et H_i la hauteur totale en m.

Ces tables de cubage sont des outils de gestion qui peuvent être utilisés directement par les gestionnaires forestiers pour avoir des volumes plus ou moins proches de la réalité. Toutefois, on peut calculer des volumes plus précis pour différentes dimensions d'arbres en appliquant directement les équations des tarifs retenus.

Tableau III.6. Tables de cubage à une (F3) et à deux entrées (F7) pondérées : volume du bois fort de la grume d'arbre en m³ en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH, en cm) et de la hauteur totale (H, en m) pour le tarif à deux entrées, et du bois fort de la grume d'arbre en m³ en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH, en cm) pour le tarif à une entrée.

Classes de DBH (cm)	DBH (cm)	Tarif à deux entrées CV = 16,15 %										Tarif à une entrée CV = 22,43 %
		Hauteur totale (m)										
		4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
		<= 5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	15-17	17-19	19-21	21-23	
10-20	15	0,035	0,053	0,071	0,089	0,108	0,126	0,144	0,163	0,181	0,200	0,090
20-30	25	0,089	0,134	0,180	0,226	0,273	0,319	0,366	0,413	0,460	0,507	0,290
30-40	35	0,164	0,248	0,332	0,418	0,503	0,589	0,675	0,762	0,848	0,935	0,628
40-50	45	0,258	0,391	0,525	0,660	0,795	0,931	1,067	1,204	1,341	1,478	1,118
50-60	55	0,373	0,564	0,757	0,951	1,146	1,342	1,538	1,735	1,933	2,131	1,773
60-70	65	0,505	0,765	1,026	1,289	1,554	1,819	2,085	2,352	2,620	2,888	2,602
70-80	75	0,655	0,992	1,332	1,673	2,016	2,361	2,706	3,053	3,400	3,749	3,614
80-90	85	0,823	1,246	1,673	2,102	2,533	2,965	3,399	3,835	4,271	4,708	4,817
90-100	95	1,008	1,526	2,048	2,574	3,101	3,631	4,163	4,696	5,230	5,766	6,219

CV : Coefficient de variation en % (rapport en pourcent entre l'écart-type résiduel et le volume moyen).

III.3.3 Tarifs de cubage marchands

III.3.3.1 Système d'équations (S)

Après avoir établi des tarifs globaux pour estimer le volume total des grumes d'arbres de pin d'Alep, des modèles permettant de prédire le volume marchand ont été élaborés. Le tableau III.7 donne les résultats d'ajustement du système d'équation (F16, F17, F18 et F19), où tous les paramètres sont significatifs et l'ajustement a été fait avec l'incorporation d'un modèle autorégressif d'ordre 3 sur les résidus.

Tableau III.7. Estimation et test de signification des paramètres du système d'équations (F16, F17, F18 et F19) des tarifs marchands.

Paramètre	Estimation	E.S.	t	P > t
b ₀	-0,22952	0,0176	-13,05	<0,0001
b ₁	1,85793	0,0384	48,44	<0,0001
b ₂	1,331218	0,0322	41,37	<0,0001
b ₃	-0,52612	0,0434	-12,13	<0,0001
b ₄	1,774552	0,0371	47,83	<0,0001
b ₅	1,278117	0,0383	33,36	<0,0001

E.S. : erreur standard

III.3.3.2 Précision des paramètres des tarifs marchands

Les résultats de précision des paramètres estimés pour les quatre fonctions constituant le système d'équations (S) sont récapitulés dans le tableau III.8. Il ressort de ce tableau que les fonctions d'estimation du volume cumulé de la grume jusqu'à un diamètre donné vd_{ij} et le volume cumulé de la grume jusqu'à une hauteur donnée vh_{ij} , sont moins précis que celles d'estimation du diamètre de la grume jusqu'à une hauteur h_{ij} donnée et la hauteur de la grume jusqu'à un diamètre fin-bout donné d_{ij} .

La fonction de défilement qui estime la hauteur (h_{ij}) en fonction de d_{ij} est légèrement meilleure que celle à diamètre variable (d_{ij} pour une hauteur variable h_{ij}). Les mêmes résultats ont été obtenus pour l'*Eucalyptus saligna* au Cameroun (Fonweban et Houllier, 1997), le Pin gris au Québec (Pregnet *et al.*, 2001) et le chêne zéen en Tunisie (Sghaier et Ammari, 2022). Cette différence de précision dans les estimations de ces deux variables dendrométriques peut être expliquée par la plus grande variabilité de la forme de la tige dans la portion située entre la hauteur de souche et la hauteur de poitrine (Pregnet *et al.*, 2001).

Tableau III.8. Précision des tarifs marchands.

Fonction	Variable	Paramètres	Biais	RMSE	R_{aj}²
F16	d _{ij}	b ₀ , b ₁ , b ₂ , b ₃ , b ₄ , b ₅	-0,005	2,2196	0,9698
F17	h _{ij}	b ₀ , b ₁ , b ₂ , b ₃ , b ₄ , b ₅	-0,015	0,7775	0,9703
F18	vd _{ij}	b ₀ , b ₁ , b ₂	0,057	0,1288	0,8161
F19	vh _{ij}	b ₃ , b ₄ , b ₅	0,053	0,1146	0,8543

III.3.3.3 Tables de cubage pour les tarifs marchands

Les tables de cubage pour les volumes marchands sont construites à partir du système des fonctions ajustées (F16, F17, F18, F19). Ces fonctions permettent deux cas de simulation ; soit on fixe le diamètre fin-bout de la grume d_{ij} et on calcule la hauteur h_{ij} et le volume vh_{ij} correspondant, soit on fixe la hauteur h_{ij} et on calcule le diamètre fin-bout d_{ij} et le volume vd_{ij} correspondant. En pratique, c'est la méthode qui consiste à fixer un diamètre marchand spécifique et calculer la longueur ou la hauteur jusqu'à ce diamètre ainsi que le volume du bois de cette partie de la grume qui est utilisée (Sghaier et Ammari, 2022).

En utilisant les deux équations suivantes, le tableau III.9 présentant le volume marchand pour des grumes d'arbres de pin d'Alep à un diamètre fin-bout (d_{ij}) de 20 cm a été dressé :

$$h_{ij} = Hi - 0,6266(Hi)^{0,7202} (d_{ij}^{1,0470} / Di^{0,7502})$$

$$vh_{ij} = 6,10 \times 10^{-5} Di^{1,821} Hi^{1,023} \times \exp(-0,526(Hi - h_{ij})^{1,775} / Hi^{1,278})$$

Des tables de cubage des volumes marchands des grumes ont été dressées également pour des diamètres fin-bout d_{ij}=30, 40 et 50 cm et ajoutées en annexes.

Tableau III.9. Table de cubage de volumes marchands bois fort (bf) des grumes d'arbres de pin d'Alep : Diamètre fin-bout $d_{ij} = 20$ cm.

Classe DBH	DBH (cm)	h_{ij} (m)	Hauteur totale des arbres (m)									
		vh_{ij} (m ³)	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
10-20	15	h_{ij}	*	*	*	*	0,67	1,34	2,06	2,83	3,63	4,47
		Vh_{ij}	*	*	*	*	0,021	0,025	0,028	0,032	0,035	0,039
20-30	25	h_{ij}	0,50	1,31	2,23	3,23	4,28	5,37	6,50	7,66	8,84	10,05
		Vh_{ij}	0,039	0,059	0,079	0,099	0,119	0,140	0,160	0,181	0,201	0,222
30-40	35	h_{ij}	1,28	2,36	3,52	4,74	6,00	7,30	8,62	9,97	11,33	12,72
		vh_{ij}	0,096	0,146	0,196	0,246	0,297	0,347	0,398	0,449	0,500	0,552
40-50	45	h_{ij}	1,75	2,98	4,29	5,64	7,03	8,45	9,89	11,35	12,82	14,31
		vh_{ij}	0,177	0,268	0,360	0,452	0,545	0,638	0,732	0,825	0,919	1,013
50-60	55	h_{ij}	2,06	3,41	4,81	6,25	7,73	9,22	10,74	12,28	13,83	15,39
		vh_{ij}	0,279	0,422	0,567	0,712	0,858	1,005	1,152	1,299	1,447	1,596
60-70	65	h_{ij}	2,29	3,71	5,18	6,69	8,23	9,79	11,36	12,95	14,55	16,17
		vh_{ij}	0,401	0,607	0,814	1,023	1,233	1,443	1,654	1,866	2,079	2,291
70-80	75	h_{ij}	2,46	3,94	5,47	7,03	8,61	10,22	11,83	13,46	15,11	16,76
		Vh_{ij}	0,541	0,819	1,100	1,382	1,665	1,950	2,235	2,521	2,808	3,096
80-90	85	h_{ij}	2,60	4,13	5,70	7,30	8,92	10,55	12,21	13,87	15,55	17,23
		vh_{ij}	0,700	1,060	1,423	1,787	2,154	2,522	2,891	3,261	3,632	4,004
90-100	95	h_{ij}	2,71	4,28	5,88	7,51	9,16	10,83	12,51	14,20	15,90	17,61
		vh_{ij}	0,877	1,327	1,781	2,238	2,697	3,158	3,620	4,083	4,548	5,014

III.3.3.4 Utilisation du système d'équation élaboré

Le tableau III.10 illustre un exemple d'application du système d'équations ajustées sur six grumes d'arbres représentatifs de pin d'Alep échantillonnés (1, 5, 51, 78, 143 et 181), pour la prédiction des différents types de volumes :

- La fonction F18 a été utilisée pour estimer les volumes jusqu'à la découpe de 10 cm et 25 cm de diamètre,
- La fonction F19 a été utilisée pour estimer les volumes jusqu'à 5 m et 10 m de hauteur de la grume à partir de la base,
- Le diamètre fin-bout pour une longueur de tige de 5 m à partir de la base et la longueur de la tige à partir de la base pour un diamètre fin bout de 10 cm sont estimés par les fonctions F16 et F17,
- Le volume du billon compris entre les deux niveaux de 10 et 25 cm de diamètre, ainsi que celui des deux niveaux compris entre 5 et 10 m de hauteur a été obtenu par différence.

Tableau III.10. Table récapitulative de l'utilisation du système d'équations (S) (F16, F17, F18, F19) sur quelques grumes d'arbres de pin d'Alep pour le calcul des différents volumes et dimensions des grumes.

N° arbre	DBH (cm)	H (m)	V _{obs} (m ³)	V _{est} (m ³)	V _{d10} (m ³)	V _{d25} (m ³)	V _{d10-25} (m ³)	V _{h5} (m ³)	V _{h10} (m ³)	V _{h5-10} (m ³)	D _{h5} (cm)	H _{d10} (m)
78	27	13	0,285	0,338	0,277	0,110	0,167	0,154	0,296	0,142	20,69	8,96
181	34,1	19,5	0,905	0,620	0,678	0,345	0,333	0,203	0,415	0,212	32,65	14,11
143	37	15,6	0,748	0,748	0,636	0,347	0,289	0,258	0,521	0,263	29,93	11,02
1	44	14	0,955	1,086	0,803	0,496	0,307	0,367	0,724	0,357	31,22	9,77
5	50	16	1,33	1,41	1,181	0,787	0,395	0,443	0,897	0,454	37,80	11,35
51	76	19,8	2,833	3,173	3,273	2,594	0,680	0,866	1,773	0,907	58,51	14,40

III.4 Discussion

Les études sur la production du pin d'Alep dans les pays du pourtour méditerranéen sont nombreuses : Montero *et al.* (2001), Bentouati (2006), Sghaier *et al.* (2008), Alaoui *et al.* (2011) et Goubi *et al.* (2019). Pour situer et comparer les deux tarifs élaborés dans le cadre de cette étude par rapport à d'autres tarifs ajustés pour la même espèce en Algérie et dans les pays voisins, ces derniers ont été utilisés pour prédire le volume des arbres cubés de la forêt de Beni Imloul, objet de cette étude. Les comparaisons ont essentiellement concerné les valeurs prédites par ces tarifs et le calcul du biais et des moyennes quadratiques des résidus absolus et relatifs (Tableau III.11).

Pour l'Algérie, la comparaison a été faite avec les tarifs élaborés pour le massif de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana (un peuplement naturel) où deux tarifs de cubage à une et à deux entrées ont été ajustés sur les données issues de 350 arbres abattus (Bentouati, 2006). Dans le cas de la Tunisie, nous avons considéré les équations polynomiales à une et à deux entrées pondérées qui ont été ajustées sur 348 arbres cubés de peuplements naturels et de plantations (Sghaier *et al.*, 2008). Il faut préciser que, pour les tarifs de cubage tunisiens, les volumes estimés regroupent le volume de la grume et celui des branches. Pour le Maroc, parmi plusieurs tarifs, à une et à deux entrées, élaborés pour des peuplements naturels et artificiels dans différentes zones cités par Alaoui *et al.* (2011), nous avons retenu des équations à une entrée établies pour les peuplements naturels du pin d'Alep au sein du Haut Atlas par Belghazi (1980) et Assahnan (1993) *in* Alaoui *et al.* (2011) et le SAFBV du Haut Atlas à Marrakech (1998). Il s'agit des peuplements naturels de Zerkten et Amezmiz, situés dans l'étage semi-aride (Eq. 3), et de la forêt de Tamga qui se trouve dans le semi-aride supérieur (Eq. 5). Pour les reboisements, nous avons retenu les tarifs à une et à deux entrées établis au niveau de l'Oriental Oujda situé à l'étage bioclimatique semi-aride (Eq. 4 et Eq. 9). Pour la France, nous avons utilisé la formule approchée EMERGE par essence ; qui est un modèle simplifié à l'extrême, développé à partir des données de volume total pour 28 essences (feuillus et résineux) sur tout le territoire français (Deleuze *et al.*, 2014). Cette formule peut être utilisée pour calculer le volume d'un cylindre, où le facteur 0,496 est une constante pour toutes les espèces. Quant à l'Espagne, la comparaison a été faite avec un tarif à deux entrées, utilisé par Montero *et al.* (2001) et précédemment élaboré par Martínez-Millán *et al.* (1993). Selon le tableau III.11, les tarifs à une entrée, de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana (Eq.11), tunisien (Eq. 2) et marocains (Eq. 3, Eq. 4 et Eq. 5), donnent globalement les erreurs les plus élevées. Le tarif de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana (Eq. 11) donne la valeur la plus élevée des erreurs commises sur les gros arbres (S_a), tandis que celui du Maroc (Eq. 4) donne la valeur la plus élevée des erreurs commises sur les petits arbres (S_r).

Pour les tarifs à deux entrées, le tableau III.11 montre que les deux tarifs, français (Eq. 7) et tunisien (Eq. 10), donnent les erreurs les plus élevées. En effet, le tarif tunisien (Eq. 10) présente la valeur de S_a la plus élevée et le tarif français (Eq. 7) la valeur de S_r la plus élevée. Le tarif de l'Espagne développé par Martínez-Millán *et al.* (1993) et mentionné par Montero *et al.* (2001) présente les erreurs les plus faibles.

Tableau III.11. Tarifs de cubage à une et à deux entrées établis pour le pin d'Alep dans quelques pays du pourtour méditerranéen et analyse des résidus.

Eq. N°	Équation	Pays	Région	Biais	S _a	S _r
1	$V = 1,79 \times 10^{-4} Di^{2,296}$	Algérie (F3)	Beni Imloul	-0,003	0,190	0,185
2	$V = -47,820 + 3,287C + 6,078.10^{-2}C^2 + 9,193.10^{-4}C^3$	Tunisie (Sghaier <i>et al.</i> , 2008)	/	-0,522	0,980	0,329
3	$V = 0,00334 - 7.10^{-4}C + 4.10^{-5}C^2$	Maroc (Alaoui <i>et al.</i> , 2011)	Haut Atlas Zekren et Amez Miz	0,312	0,410	0,624
4	$V = -2,36.10^{-3} + 3,134.10^{-5}C^2$	Maroc (Alaoui <i>et al.</i> , 2011)	Oriental Oujda	0,368	0,478	0,776
5	$V = 0,0678 + 47,49.10^{-6}C^2$	Maroc (Alaoui <i>et al.</i> , 2011)	Haut Atlas (Tamga)	0,048	0,215	0,235
6	$V = 6,10 \times 10^{-5} Di^{1,8214} Hi^{1,023}$	Algérie (F7)	Beni Imloul	-0,003	0,136	0,138
7	$V = 0,496 \frac{hc^2}{4\pi \left(1 - \frac{1,30}{h}\right)^2}$	France (Deleuze <i>et al.</i> , 2014)	/	-0,334	0,454	0,290
8	$V = 0,077186d^{1,84818}h^{0,88012}$	Espagne (Martínez-Millán <i>et al.</i> , 1993 in Montero <i>et al.</i> , 2001)	/	0,049	0,144	0,157
9	$V = 0,011 + 3,07.10^{-6}c^2h$	Maroc (Alaoui <i>et al.</i> , 2011)	Oriental Oujda	0,059	0,152	0,184
10	$V = -36,220 + 2,663c - 5,666.10^{-2}c^2 + 5,023.10^{-4}c^3 + 3.10^{-3}c^2h$	Tunisie (Sghaier <i>et al.</i> , 2008)	/	-0,393	0,697	0,275
11	$V = -0,025 + 5,58d^{2,174950}$	Bentouati (2006)	Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana	-0,840	1,003	0,513
12	$V = 0,053 + 0,282d^2H$	Bentouati (2006)	Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana	0,123	0,186	0,270

Pour les tarifs à une entrée, la projection des volumes observés des arbres cubés dans les Beni Imloul avec les courbes simulées par les fonctions à une entrée du tableau III.11, la figure III.11 montre que le tarif de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana (Eq.11) surestime les volumes jusqu'à 55 cm de diamètre, au-delà c'est le tarif tunisien (Eq. 2), qui donne des volumes surestimés.

A l'exception de ces deux tarifs (Eq. 11 et Eq. 2), qui surestiment les volumes, l'ensemble des tarifs marocains (Eq. 3, Eq. 4 et Eq. 5) représentant les peuplements naturels du Haut Atlas (Zerkten, Amez Miz et Tamga) et le reboisement (Oriental Oujda) sous-estime ce paramètre.

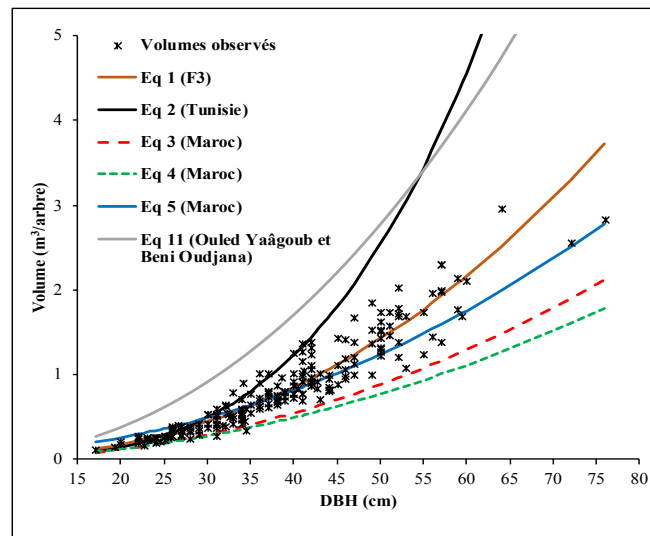


Figure III.11. Volumes observés pour les arbres échantillonnés dans la forêt de Beni Imloul en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) et courbes simulées à l'aide des tarifs de cubage à une entrée, établis pour le pin d'Alep de trois pays méditerranéens (Algérie, Tunisie et Maroc).

La projection des résidus issus des différents tarifs à deux entrées, illustrée dans la figure III.12 montre que les tarifs de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana (Eq.12), tunisien (Eq. 10) et français (Eq. 7), surestiment en général les volumes des arbres cubés de la forêt de Beni Imloul, objet de cette étude. Ces trois derniers tarifs présentent les mêmes estimations jusqu'à environ 45 cm de diamètre ; au-delà, le tarif tunisien donne des valeurs estimées plus élevées. Outre les caractéristiques dendrométriques qui dépendent des conditions édaphiques et climatiques et qui diffèrent d'un pays à l'autre, cette surestimation des volumes peut être due aux tarifs utilisés. Les tarifs tunisien et français donnent les volumes totaux (grume plus les branches).

Les résidus issus du tarif établi en Espagne (Eq. 8) et de celui développé au Maroc (Eq. 9) se confondent avec ceux du tarif de Beni Imloul et peuvent être considérés comme les plus proches.

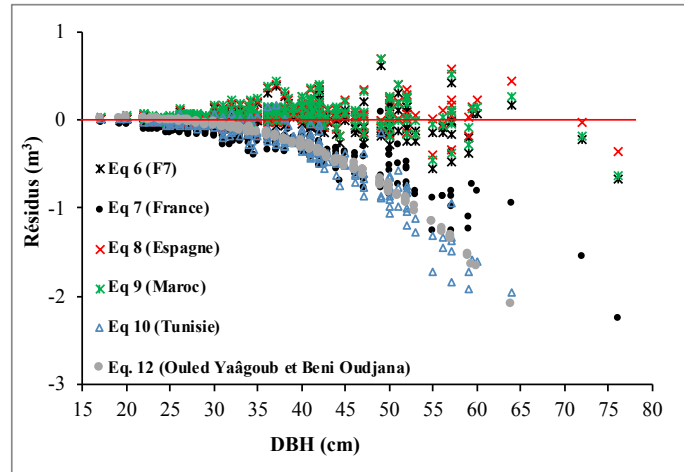


Figure III.12. Projection des résidus en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) obtenus par les tarifs à deux entrées établis pour le pin d'Alep de cinq pays méditerranéens (Algérie, Tunisie, Maroc, Espagne et France).

Au niveau des Aurès, nous avons jugé utile de faire une comparaison de nos tarifs, à une et à deux entrées, établis pour la pinède des Beni Imloul, avec ceux élaborés pour le peuplement de Ouled Yaâgoub (Goubi *et al.*, 2019) dont les données de base nous ont été accessibles.

Les statistiques descriptives des diamètres, des hauteurs et des volumes des arbres échantillonnés dans les peuplements de Beni Imloul et de Ouled Yaâgoub sont données dans le tableau III.12. Ce tableau montre des écarts importants entre les caractéristiques dendrométriques des deux forêts surtout en ce qui concerne les valeurs minimales ; la classe d'arbres de diamètre inférieur à 15 cm est absente dans la forêt de Beni Imloul. Pour cette dernière, les volumes sont plus importants que ceux de la forêt de Ouled Yaâgoub ; le volume moyen des arbres de Beni Imloul dépasse celui des arbres de Ouled Yaâgoub. En comparant la répartition des arbres cubés en fonction du diamètre à 1,30 m (cm) et de la hauteur totale (m) pour les deux peuplements, nous constatons que, pour la pinède de Beni Imloul, la majorité des arbres sont situés dans les classes de diamètre et de hauteur les plus élevées, tandis que la plupart des arbres de la pinède de Ouled Yaâgoub sont répartis dans les classes de diamètre de moins de 25 cm. La classe des gros arbres pour le peuplement de Beni Imloul, avec un diamètre supérieur à 55 cm à hauteurs variables (de 15 à 20 m et plus), représente 7,66 % de la totalité des arbres échantillonnés, alors qu'à Ouled Yaâgoub la même classe de

diamètre ne représente que 3,82 %. Cette différence de composition des échantillons pourrait être à l'origine des volumes élevés en faveur de la pinède des Beni Imloul.

Tableau III.12. Caractéristiques dendrométriques et volumes des arbres cubés dans le massif de Beni Imloul et Ouled Yaâgoub.

Station	Taille de l'échantillon	Variable	Moyenne	Min	Max	CV%
Beni Imloul	209	Diamètre (cm)	38,2	17,1	76	22,38
		Hauteur (m)	15,37	9,4	22,7	14,83
		Volume (m ³)	0,85	0,12	2,7	50,42
Ouled Yaâgoub (Goubi <i>et al.</i>, 2019)	340	Diamètre (cm)	29,08	7,4	68,90	39,04
		Hauteur (m)	11,52	4,9	18,69	24,31
		Volume (m ³)	0,46	0,015	2,3	78,22

La figure III.13, qui présente les volumes observés et les courbes simulées à l'aide du tarif à une entrée pour les arbres ayant un diamètre compris entre 7 et 76 cm montre que, à partir de 25 cm de diamètre, les volumes observés des arbres de Beni Imloul sont supérieurs aux volumes de la pinède de Ouled Yaâgoub pour des diamètres similaires. Cela pourrait être dû à une meilleure croissance en hauteur pour les arbres de Beni Imloul. Ceci reflète un grand potentiel productif pour la pinède Beni Imloul par rapport à celle de Ouled Yaâgoub malgré la situation de cette dernière dans l'étage bioclimatique subhumide.

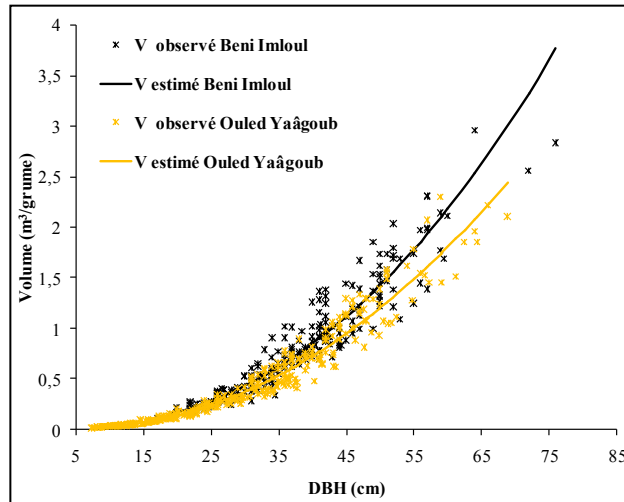


Figure III.13. Projection des volumes observés des arbres échantillonnés en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) et courbes simulées à l'aide du tarif de cubage à une entrée pour les pinèdes de Beni Imloul et Ouled Yaâgoub.

Conclusion

Le présent chapitre a porté sur le test et l'ajustement de plusieurs équations linéaires et non linéaires dans le but de prédire le volume bois fort et le volume à différents niveaux de diamètre et de hauteur d'arbres individuels de pin d'Alep de la forêt de Beni Imloul. Le choix des meilleures équations repose principalement sur la précision des estimations et l'étude numérique et graphique des résidus pour les deux types de tarifs. L'utilisation de la pondération a amélioré la précision des équations testées, surtout pour les petits arbres, et par conséquent a conduit à de meilleurs résultats.

Sur la base des résultats obtenus, les équations pondérées (F3) pour les tarifs de cubage à une entrée et (F7) pour les tarifs de cubage à deux entrées ont été retenues pour le cubage des grumes du pin d'Alep. En plus des tarifs globaux, un système d'équations a été construit pour la prédiction des volumes marchands.

Le tarif de cubage à une entrée, bien qu'il soit plus facile à appliquer sur le terrain, présente le coefficient de variation le plus élevé (22,43 %), ce tarif est souvent utilisé dans le cadre des aménagements. Cependant le tarif de cubage à deux entrées qui est plus précis, avec un coefficient de variation de l'ordre de 16,15 %, peut être utilisé pour la vente du bois sur pied.

En plus des tarifs globaux utilisés pour la prédiction du volume bois fort des grumes des arbres en fonction du diamètre (DBH) et de la hauteur totale en (m), avec les systèmes d'équations (S) utilisées pour prédire le volume jusqu'à n'importe quel diamètre fin-bout ou

hauteur, ainsi que le diamètre jusqu'à une hauteur donnée ou la longueur de la grume jusqu'à un diamètre donné, les gestionnaires forestiers ont la possibilité d'utiliser un outil plus efficace pour répartir le bois sur pied par classes de grosseur et ainsi déterminer à l'avance la valeur et l'utilisation possible des grumes des arbres de pin d'Alep, souvent recherchées par l'industrie du bois.

Les tarifs élaborés dans le cadre de cette étude peuvent être utilisés pour l'estimation du volume bois fort des grumes, et les volumes marchands des arbres ayant un diamètre à hauteur de poitrine (DBH) qui varie entre 15 et 80 cm, et une hauteur entre 9 et 23 m. En dehors de ces limites, ces tarifs doivent être utilisés avec prudence.

Chapitre. IV Modélisation de la croissance en hauteur dominante

Introduction

Dans le contexte de l'étude de la croissance des peuplements, le terme modélisation regroupe les méthodes employées pour analyser et simuler la réponse des peuplements d'origine génétique diverse et dans des milieux variés, et qui sont soumis à des traitements différents. La modélisation consiste à réduire une réalité complexe à un système structuré d'éléments et de relations. Selon l'objectif à atteindre, le modèle, résultat de la modélisation, est plus simple et plus maniable que la réalité. Les modèles de croissance sont en général une représentation simplifiée des accroissements observés (Bouchon, 1988).

La connaissance du potentiel productif d'un massif forestier est considérée comme un aspect très important pour sa gestion. Ce potentiel se représente principalement par la production ligneuse, ainsi que la sylviculture nécessaire pour l'atteindre à la fin du cycle de production. L'indice de site est couramment utilisé comme indicateur de la productivité potentielle d'une zone forestière et permet de classer les sites et de les comparer entre eux (Cabanillas Saldaña, 2010 ; Rojo-Alboreca *et al.*, 2017).

La notion d'indice de site consiste à évaluer les potentialités de production forestière d'une station donnée. Par définition, l'indice de site est donné par la hauteur moyenne ou par la hauteur dominante atteinte à un âge de référence donné pour un peuplement régulier composé d'une seule essence dite essence de référence (CTGREF, 1979 ; Rondeux, 1993 ; Weiskittel *et al.*, 2011).

La hauteur dominante est souvent utilisée pour la construction des courbes d'indice de site ; car il est connu qu'à l'exception des éclaircies régulièrement très fortes par le haut, la hauteur dominante est peu sensible aux traitements sylvicoles généralement appliqués (l'intensité et le type des éclaircies). De plus, la relation âge-hauteur dominante reflète l'effet des facteurs de la station sur la croissance des peuplements. De ce fait, cette relation peut être utilisée comme base de définition de classes ou de niveaux de productivité des peuplements, et permet de les classer en fonction de leurs potentialités et de leur fertilité, et donne indirectement la production totale (YI, 1976 *in* Bentouati, 2006 ; Rondeux, 1993 ; Rondeux *et al.*, 2014).

L'indice de site permet de classer facilement les stations les unes par rapport aux autres à l'égard d'une essence donnée. Pour le gestionnaire forestier cela permet le choix d'aménagement, le choix des techniques sylvicoles à mettre en œuvre, leur intensité ainsi que leur fréquence d'application (CTGREF, 1979).

Dans l'optique de caractériser (modéliser) la croissance en hauteur dominante et de déterminer la capacité de production des peuplements du pin d'Alep dans la forêt de Beni

Imploul, ce chapitre est consacré pour l'ajustement et la comparaison de différents modèles de croissance en hauteur selon deux approches, l'approche dite « équations en différence algébrique (ADA) » et l'approche dite « équations en différences algébriques généralisées (GADA) ». Par la suite, on procède à une classification des stations par classes de productivité en hauteur dominante et en volume, en se basant sur l'indice de site calculé à un âge de référence.

IV.1 Notions générales

IV.1.1 Notion de productivité

En foresterie, la productivité ou la capacité de production est une notion très importante qui est considérée pour chiffrer et prévoir la production et son évolution dans le temps. Dans le contexte dendrométrique, la productivité est assimilée à la vitesse de production de la phytomasse. L'expression la plus utilisée en foresterie est la production ou production "utile" qui concerne une partie variable de la productivité primaire et est exprimée en termes de volume, souvent de volume du bois fort (Decourt, 1973 ; Rondeux, 1993).

D'après Rondeux (1977 ; 1993), il existe deux types de productivité distincts ; la productivité potentielle (naturelle) ou "productivité optimale possible" qui est une production optimale relative à des peuplements qui peuvent être caractérisés comme "idéaux" d'origine cultivés ou naturelles, homogènes, non perturbés, pleins, normalement denses, ne présentant pas des vides, ou un sur-stockage, et conditionnés par les propriétés intrinsèques des stations et la productivité actuelle ou "artificielle" qui est la production réelle observée d'une station dans ses composantes actuelles à savoir : le sol, le peuplement, le traitement, les accidents, etc.

La productivité d'une espèce donnée peut être estimée par plusieurs méthodes, qui sont :

- Les méthodes dendrométriques directes : ces méthodes à caractère dendrométrique visent à estimer le volume total produit pour une station donnée et sur une période de temps donnée. Elles sont en principe les plus recommandables et sont applicables aussi bien en peuplements homogènes équiennes qu'en peuplements hétérogènes mélangés.

Le critère de productivité concerne la production totale de matière ligneuse, soit le volume total produit à un âge de référence, soit l'accroissement moyen annuel ou l'accroissement périodique en volume à cet âge.

- Les méthodes dendrométriques indirectes : le critère de productivité est défini par une caractéristique dendrométrique étroitement liée à la production totale en volume.

L'estimation indirecte s'appuie sur des critères qualitatifs ou quantitatifs étroitement liés à la production en volume, tels que :

- Les indices écologiques (climatiques, édaphiques, topographiques ou floristiques),
- Les indices dendrométriques, dont les plus utilisés sont basés sur la hauteur dominante du peuplement, le volume total produit et la hauteur dominante ou encore sur la croissance périodique en hauteur.
- Les méthodes combinées où le critère de productivité résulte de l'association de caractéristiques dendrométriques et de diverses variables du milieu (sol, flore, topographie, climat, etc.).

La méthode indirecte qui repose sur le concept de hauteur dominante du peuplement à un âge de référence donné est la plus utilisée ; d'après la loi de EICHHORN élargie, la production totale en volume depuis l'origine d'un peuplement forestier est fonction de sa seule hauteur moyenne ou mieux dominante (Decourt, 1973 ; Rondeux, 1993).

Les relations âge-hauteur des arbres sont couramment utilisées pour évaluer la productivité potentielle des peuplements forestiers (Raulier *et al.*, 2003). Selon Alder (1980), pour les peuplements homogènes et équiennes la hauteur dominante atteinte à un âge donné constitue un bon indice de productivité (ou indicateur de fertilité). La construction des courbes de production en fonction de la hauteur dominante, à partir des données provenant de différentes sources, se base généralement sur les méthodes suivantes : la méthode des courbes guides, la méthode de prédiction des paramètres et l'approche en différences (Approche en Différences Algébriques (ADA), Approche en Différences Algébriques Généralisées (GADA)). La méthode des courbes guides est la plus simple et la moins indiquée parmi d'autres méthodes les plus élaborées, elle ne permet que la construction de courbes anamorphiques. Les méthodes en différences algébriques et celle de prédiction des paramètres ont cependant été présentées comme une alternative efficace à la construction des courbes de sites polymorphes, en supposant des taux de croissance différents entre les différents sites et l'invariance dans la trajectoire de la simulation et de l'âge de référence (Filho *et al.*, 2023).

IV.1.2 Les fonctions de croissance

Les fonctions de croissance décrivent l'évolution de la taille d'un individu ou d'une population en fonction du temps. La sélection des fonctions de croissance appropriées pour la modélisation des arbres et des peuplements est une étape importante pour le développement des modèles de croissance et de production.

L'estimation de l'indice du site nécessite une équation hauteur-âge spécifique. De nombreuses équations ont été élaborées pour diverses espèces et régions, ces équations diffèrent selon le type de données, le modèle utilisé et la méthode d'estimation des paramètres utilisée dans leur développement (Weiskittel *et al.*, 2011).

Selon Burkhart et Tomé (2012), les fonctions de croissance les plus couramment utilisées pour modéliser le développement forestier doivent avoir les caractéristiques suivantes :

- La courbe est souvent limitée par la valeur zéro à un début précis ($t=0$ ou $t= t_0$), selon que la variable modélisée commence à $t=0$, comme c'est le cas pour la grande majorité des variables des arbres et des peuplements, ou plus haut, comme c'est le cas du diamètre de l'arbre à hauteur d'homme ou de la surface terrière du peuplement.
- La courbe doit généralement présenter une valeur maximale habituellement atteinte à un âge plus avancé (existence d'une asymptote horizontale).
- La pente de la courbe devrait augmenter avec l'augmentation du taux de croissance dans la phase initiale et la diminution dans les phases finales (montrer un point d'inflexion).

Les modèles sont construits pour tester des hypothèses, comparer des systèmes sylvicoles alternatifs, mettre à jour les inventaires forestiers et déterminer les calendriers régionaux de récolte du bois.

L'indice de site permet de fixer les niveaux de productivité ou encore de classer les peuplements selon leurs potentialités de production. Chaque niveau de production est lui-même représenté par la courbe de croissance de la hauteur dominante en fonction de l'âge des peuplements. Dans le cas où la productivité est basée sur la hauteur dominante atteinte par un peuplement à un âge de référence donné, il est important de préciser la nature des données ainsi que la manière d'exprimer l'évolution de la hauteur dominante en fonction de l'âge et selon différents niveaux de productivité (Rondeux, 1993).

IV.1.3 Sources de données pour l'élaboration des courbes d'indice de site

Les données de croissance se présentent sous différentes formes et qui sont : les placettes permanentes, les placettes temporaires et l'analyse de tiges individuelles (Rondeux, 1993 ; Raulier *et al.*, 2003 ; Weiskittel *et al.*, 2011 ; Burkhart et Tomé, 2012).

IV.1.3.1 Les placettes temporaires

Les équations d'indice de site ont souvent été développées à partir des mesures des couples âge-hauteur sur des placettes temporaires dans des peuplements de qualités, de site et d'âges variables. Par la suite et à partir des données une courbe guide qui présente l'évolution de la hauteur pour l'indice de site moyen sera ajustée. Les hauteurs à tous les âges pour toutes les

autres classes de sites sont généralement supposées proportionnelles à celle de la courbe guide.

IV.1.3.2 Les placettes permanentes

Cette méthode consiste à faire des mesures périodiques de la hauteur dominante et de l'âge sur les mêmes arbres dans des placettes permanentes. Les données sur l'évolution de la hauteur des peuplements au fil du temps permettent d'ajuster des équations d'indice de site, anamorphiques (une forme) ou polymorphes (plusieurs formes). Une fois les données de remesure sont disponibles, la hauteur peut être prédite directement ou la croissance en hauteur peut être modélisée.

IV.1.3.3 Analyses des tiges

L'analyse de tiges peut être effectuée selon trois méthodes. La première consiste à effectuer des mesures inter-nodales pour les espèces d'arbres ayant un modèle de croissance déterminé. La seconde peut être procédée par une coupe longitudinale, le long de la moelle de la tige principale afin que les hauteurs à différents âges puissent être mesurées directement. En ce qui concerne la troisième méthode, des coupes transversales de la tige principale peuvent être effectuées à des hauteurs données puis le comptage des cernes à chaque hauteur permet de déterminer l'âge des arbres à cette hauteur.

Bien que les données de mesure des placettes permanentes soient relativement coûteuses à obtenir et les résultats ne sont disponibles que plusieurs années après l'installation initiale des placettes, elles constituent la meilleure source pour les modèles de croissance.

Par comparaison aux placettes permanentes, l'analyse de tiges est considérée comme un moyen rapide et peu coûteux d'obtenir des données nécessaires pour la modélisation de la croissance en hauteur des arbres des peuplements forestiers. Toutefois, si des coupes transversales sont effectuées le long de la tige et que le nombre de cernes est enregistré, il en résulte un biais dans la détermination de la hauteur pour des âges donnés, car la coupe se produira rarement à l'extrémité d'une pointe terminale (fin de la période de croissance annuelle) ; ce qui nécessite une correction de la hauteur.

IV.1.3.3.1 Méthodes de correction de la hauteur

L'estimation de la hauteur d'un arbre en fonction de son âge à partir des données des analyses de tiges d'arbres sectionnées a fait l'objet de plusieurs études. Machado *et al.* (2010) et Burkhardt et Tomé (2012) ont présenté différentes méthodes d'estimation, parmi lesquelles :

La méthode de Graves (1906) : Cette méthode se base sur la dernière section du tronc, celle qui contient les cernes les plus récents, et divise la longueur de cette section par le nombre de cernes qu'elle contient. Le résultat représente l'estimation de la croissance annuelle en hauteur. En multipliant cette valeur par le nombre total de cernes de l'arbre, on obtient une estimation de la hauteur totale de l'arbre.

La méthode de Lenhart (1972) propose une approche simplifiée pour estimer la hauteur de l'arbre en se basant sur la longueur de la dernière section du tronc. Elle divise la longueur de cette section de manière égale entre le nombre de cernes présents, en supposant que chaque année a contribué de façon équivalente à la croissance de cette partie de l'arbre. Elle considère que la croissance en hauteur annuelle est constante sur cette section.

La méthode de Carmean (1972) s'appuie sur l'hypothèse d'une croissance annuelle en hauteur constante, tout comme la méthode de Graves. Cependant, elle introduit un facteur correctif pour tenir compte du moment où la section de bois est prélevée pour l'analyse des cernes. Carmean a estimé qu'en moyenne, les sections sont prélevées à mi-période de croissance, ce qui signifie que les cernes ne représentent pas la croissance totale de l'année.

La méthode de Newberry (1991) a été développée pour améliorer la précision de la méthode de Carmean en corrigeant les sous-estimations de la croissance en hauteur dans les sections les plus proches de la hauteur totale de l'arbre. La méthode de Carmean suppose une croissance constante, tandis que Newberry reconnaît que la croissance ralentit souvent dans les dernières années de vie de l'arbre, ce qui conduit à une sous-estimation de la hauteur des cernes dans ces sections.

La méthode ISSA ("Incremental Stem Segment Analysis", ou "Analyse Incrémentale de Segment de Tige"), développée par Fabbio *et al.* (1994), est une approche plus complexe pour estimer la hauteur d'un arbre en fonction de son âge, qui se distingue des méthodes précédentes par l'utilisation d'équations différentielles.

La méthode TARG (Tree Annual Radial Growth) de Kariuki (2002) se base sur la largeur des cernes de croissance pour estimer la hauteur atteinte par l'arbre chaque année.

Finalement, La méthode de Lappi (2006) offre une approche plus flexible pour estimer la hauteur des arbres en utilisant la programmation linéaire. Cette technique permet de générer des courbes hauteur/âge plus précises en s'adaptant aux variations complexes de la croissance de l'arbre.

IV.1.4 Fixation de l'âge de référence

L'âge de base ou l'âge de référence, exprimé en années, est nécessaire à connaître pour déterminer l'indice de site qui correspond à la hauteur de l'arbre dominant atteinte à cet âge de référence. Le choix de l'âge de référence est une étape importante, car cela peut avoir des implications significatives sur la précision des prédictions ; puisqu'elles sont généralement d'autant plus biaisées qu'un peuplement est éloigné de l'âge de base (Weiskittel *et al.*, 2011).

L'âge de référence doit être choisi en tenant compte de trois considérations :

(1) il doit être inférieur ou égal à l'âge de rotation le plus jeune pour les traitements sylvicoles courants, (2) il devrait être proche de l'âge de rotation et (3) l'âge de base doit être sélectionné de manière à constituer un indicateur fiable de la hauteur à d'autres âges (Goelz et Burk, 1992). Selon Diéguez-Aranda *et al.* (2005) in Sghaier *et al.* (2012), l'âge de référence peut être choisi le plus jeune possible, afin de faciliter une prise de décision plus précoce quant aux traitements sylvicoles à appliquer au peuplement. D'après CTGREF (1979), l'âge de référence est choisi dans la plupart des cas d'une façon arbitraire et peut varier de 50 ans pour les peuplements à courte révolution et à croissance rapide, jusqu'à 100 ans pour les espèces suffisamment longévives, cependant Rondeux (1993) a proposé 50 ans comme âge de référence pour les essences de grande production exploitées à courte révolution telles que la plupart des résineux et des peupliers, et 100 ans pour les feuillus et certains résineux exploités à longue révolution.

IV.1.5 Fixation des niveaux de productivité

La relation âge-hauteur s'exprime souvent sous forme d'un faisceau de courbes de fertilité propres à une espèce poussant dans une région donnée et définit la hauteur atteinte par un peuplement à un âge de référence (indice de fertilité ou de station). C'est aussi un élément fondamental dans la prévision de l'accroissement des peuplements homogènes (Alder, 1980 ; Bentouati *et al.*, 2005).

Les niveaux de productivité de référence correspondent généralement à des valeurs de hauteur dominante atteinte à un âge déterminé. Dans ce type de classification, et pour des peuplements purs équiennes, les classes de productivité sont presque toujours matérialisées par des intervalles égaux de hauteur dominante à un âge fixé, à condition que la forme des courbes liant l'âge et la hauteur soit appropriée (Rondeux, 1993).

IV.2 Matériels et méthodes

IV.2.1 Collecte des données

IV.2.1.1 Analyses de tiges

Les données sont obtenues par la méthode des analyses de tiges ; au total 30 arbres choisis aléatoirement parmi les plus gros dans un chantier d'exploitation ont été abattus à 0,30 m du sol. Avant la coupe, ces arbres ont fait l'objet des mesures de hauteur totale et des diamètres à 0,30 m et 1,30 m. Chaque tige a été ensuite débitée en billons de 1 m de longueur, les deux diamètres de chaque billon ont été mesurés. A l'extrémité supérieure de chaque découpe, une rondelle a été coupée. Les rondelles ont subi un ponçage avec du papier abrasif (du plus gros au plus fin) afin de permettre la lisibilité des cernes, et le nombre de cernes a été compté sur toutes les rondelles prélevées.

L'âge actuel d'un arbre est obtenu en ajoutant 3 années au nombre de cernes obtenus au niveau de coupe de l'arbre en question (Sghaier *et al.*, 2012). L'âge à un niveau donné de la tige correspond à la différence entre l'âge actuel et le nombre de cernes dénombrés à ce niveau (Bentouati *et al.*, 2005).

IV.2.1.1.1 Méthode de correction de la hauteur

Afin de corriger le biais causé par la méthode d'analyse de tiges, où les longueurs des sections transversales ne coïncident généralement pas avec la croissance périodique en hauteur, la méthode de Carmean (1972), avec la modification proposée par Newberry (1991) a été utilisée. Le choix de cette méthode se justifie en se basant sur les études de Dyer et Bailey (1987) cités par Machado (2010), Burkhart et Tomé (2012), Sghaier *et al.* (2012). Cette méthode a été également utilisée par Rojo-Alboreca *et al.* (2017) et Kherchouche *et al.* (2024).

L'équation de correction de Carmean (1972) est de la forme suivante :

$$H_{ij} = h_i + \frac{(h_{i+1} - h_i)}{[2(r_i - r_{i+1})]} + (j - 1) \frac{(h_{i+1} - h_i)}{(r_i - r_{i+1})}$$

Où : j= chaque cerne de croissance en comptant à partir de la moelle pour chaque i^{ème} disque extrait de l'arbre, c'est-à-dire j = (1,2,...,r_i) ; r_i = nombre de cernes de croissance dans le i^{ème} disque ; i = numéro de disque (section) de la base vers le haut ; h_i = hauteur de coupe pour le i^{ème} disque ; H_{ij} = hauteur des cernes correspondant à l'âge j, du i^{ème} disque.

IV.2.1.2 Mesures dans les placettes temporaires

Dans le but de caractériser la qualité des placettes échantillonnées, les données des analyses de tiges ont été complétées par la mesure de l'âge et la hauteur dominante de 60 placettes temporaires de forme circulaire et d'une superficie qui varie entre 19 et 25 ares.

Les placettes choisies ont été uniformément distribuées dans la zone d'étude, couvrant les différentes situations pédogéoclimatiques, elles ont été également sélectionnées d'une manière à couvrir toutes les gammes de développement, d'âge, de qualité de site et de densité des peuplements.

Dans chaque placette, le diamètre à 1,3 m de hauteur de tous les arbres ayant un diamètre supérieur ou égal à 5 cm a été mesuré, la hauteur totale des quatre plus gros arbres ainsi que celle de quelques autres arbres choisis systématiquement selon le protocole d'échantillonnage a été également mesurée.

Pour déterminer l'âge des placettes, un carottage a été effectué à la tarière de Pressler à 1,30 m au-dessus du sol, pour des arbres dominants, sains et non fourchus. Les carottes ont été préparées et les cernes de croissance mesurés selon les principes de bases de la dendrochronologie (Delwaide et Filion, 2010). Avant la mesure, les carottes séchées ont été montées sur des supports de bois rainurés. Ces carottes ont fait l'objet d'un ponçage avec du papier abrasif (du plus gros au plus fin), pour rendre visible la limite entre les cernes de croissance. L'interdatation des échantillons a été réalisée à l'aide d'une loupe binoculaire, et la mesure des largeurs des cernes au 1/100 de mm a été effectuée à l'aide d'une table de mesure (Velmex).

IV.2.2 Ajustement des modèles

L'approche utilisée pour prédire la croissance en hauteur des arbres s'appuie sur des équations dites "en différences". Cette approche est flexible et peut être appliquée à divers modèles reliant la hauteur à l'âge de l'arbre, permettant ainsi de produire des familles de courbes anamorphiques ou polymorphiques. Pour développer une forme en différences d'une équation hauteur-âge, il faut exprimer la hauteur future de l'arbre (h_d) en fonction de sa hauteur actuelle (h_{d1}), de son âge actuel (t_1) et de son âge futur (t_2) c'est-à-dire :

$$h_d = f(t_2, t_1, h_{d1}) \text{ (Burkhart et Tomé, 2012).}$$

Les équations de croissance en hauteur dominante (indice de site) idéaux doivent présenter certaines caractéristiques : un comportement logique (la taille devrait être nulle à l'âge zéro et égal à l'indice de site à l'âge de référence), des bases théoriques solides, un polymorphisme,

des courbes de forme sigmoïde avec un point d'inflexion et un âge de base invariable (même résultat quel que soit l'âge de référence choisi).

Bailey et Clutter (1974) ont introduit le concept d'invariance de l'âge de base, dans lequel une équation dynamique peut calculer des prédictions directement à partir de n'importe quelle couple âge-hauteur sans compromettre la cohérence des prédictions. Cette technique est connue sous le nom d'approche en différences algébriques (ADA), elle consiste à dériver des équations dynamiques, permettant la substitution de paramètres d'équation et la génération de courbes anamorphiques ou polymorphes. Par la suite Cieszewski et Bailey (2000) ont proposé l'approche en différences algébriques généralisées (GADA : l'approche en différences algébriques généralisées) qui est une amélioration de la méthode ADA traditionnelle, elle offre une plus grande flexibilité des équations dynamiques, les rendant polymorphes et dotées de multiples asymptotes, (Cieszewski, 2002).

Le développement des modèles ADA/GADA est basé sur la modification des paramètres du modèle de base par des fonctions explicites de X, et peuvent être construits pour tenir compte de la corrélation temporelle attendue pour les données longitudinales d'évolution de la hauteur dominante. Il s'agit d'une variable indépendante inobservable, qui peut décrire les facteurs bio-édapho-climatiques non mesurables du site (Cieszewski, 2001 ; dos Santos *et al.*, 2023).

Deux formes de l'approche en différences ont été utilisées pour modéliser la croissance en hauteur dominante, à savoir : l'approche en différences algébriques (ADA) et l'approche en différences algébriques généralisées (GADA), en utilisant la technique des variables muettes (*the dummy variables method*). Ces deux approches ont également été utilisées par (Cieszewski, 2001 ; Cieszewski et Strub, 2008 ; Sghaier et Garchi, 2009, Sghaier *et al.*, 2012 ; dos Santos *et al.*, 2023 ; Kherchouche *et al.*, 2024).

L'utilisation de données issues d'analyse de tiges implique une autocorrélation entre les observations successives au sein d'un même arbre (corrélation entre les résidus au sein d'un même arbre), ce qui invalide les tests d'hypothèses standards (Grégoire *et al.*, 1995). Ainsi, pour tenir compte de cette éventuelle autocorrélation, les termes d'erreur ont été modélisés à l'aide d'une structure autorégressive d'erreurs successives (CAR(x)). Cela permet de prendre en compte des données irrégulièrement espacées et déséquilibrées (Grégoire *et al.*, 1995 ; Zimmerman et Núñez-Antón, 2001), typiques de nombreux ensembles de données forestières (West *et al.*, 1984).

Le CAR(x) est de la forme suivante :

$$e_{ij} = \sum_{n=1}^x d_n \rho_n^{t_{ij} - t_{i(j-n)}} e_{i(j-n)} + \varepsilon_{ij}$$

Avec : e_{ij} est le $j^{\text{ème}}$ résidu ordinaire sur le $i^{\text{ème}}$ arbre (c'est-à-dire la différence entre les hauteurs observées et estimées de l'arbre i aux mesures d'âge j), $d_n = 1$ pour $j > n$ et il est nul pour $j \leq n$, ρ_n est le paramètre autorégressif d'ordre n à estimer, et $t_{ij} - t_{i(j-n)}$ est la distance temporelle (années) séparant les observations $j^{\text{ème}}$ des $j^{\text{ème}}-n$.

La méthode (*the dummy variables method*) et la structure d'erreur CAR(x) ont été mises en œuvre à l'aide de la procédure MODEL, SAS/ETS® (SAS Institute Inc., 2004), qui permet une mise à jour dynamique des résidus (Sghaier *et al.*, 2012 ; Kherchouche *et al.*, 2024).

IV.2.3 Modèles de croissance étudiés

La sélection des fonctions de croissance appropriées est une étape importante pour le développement des modèles de croissance des arbres et des peuplements. Dans le but d'établir une relation entre la croissance en hauteur et l'âge, nous avons ajusté et comparé six modèles parmi les plus utilisés dans la recherche forestière, basés sur l'utilisation de la méthode d'équations en différence.

Les fonctions de croissance testées sont issues des formes différentielles dérivées des fonctions de base de Hossfeld (Hossfeld, 1882), de Chapman-Richards (Bertalanffy, 1949, 1957 ; Richards, 1959) et de Lundquist-Korf (Lundqvist, 1957) (Tableau IV.1). Chaque fonction de base a donné naissance à deux modèles dynamiques en supposant un seul paramètre (ADA : M1, M3 et M5) ou deux paramètres (GADA : M2, M4 et M6) liés aux facteurs bio-édapho-climatiques du site.

Selon Palahi (2004) *in* Pereira Miguel (2023), les fonctions dynamiques candidates ont la propriété d'invariance temporelle, c'est-à-dire les projections qui utilisent des âges initiaux différents mais qui ont les mêmes âges finaux sont équivalentes.

Le tableau IV.1 illustre les modèles ajustés et comparés de M1 à M6 avec : a_1 , a_2 et a_3 sont les paramètres des équations de base, b_1 , b_2 et b_3 sont les paramètres pour les équations dérivées ADA et GADA.

Les équations dynamiques sont de la forme suivante :

$$Y = f(t, t_0, Y_0)$$

Où : Y est la valeur de la fonction à l'âge t et Y_0 est la variable de référence définie comme la valeur de la fonction à l'âge t_0 (Sghaier *et al.*, 2012).

Tableau IV.1. Équations de base et formulations (ADA/GADA) utilisés pour la modélisation de la croissance en hauteur dominante. (Sghaier *et al.*, 2012 ; Kherchouche *et al.*, 2024).

Equation de base	Paramètres liés au site	Solution pour X avec les valeurs initiales (t_0, Y_0)	Equation dynamique	Modèle
Hossfeld $Y = \frac{a_1}{1 + a_2 t^{-a_3}}$	$a_2 = X$	$X_0 = t_0^{b_3} \left(\frac{b_1}{Y_0} - 1 \right)$	$Y = \frac{b_1}{1 - \left(1 - \frac{b_1}{Y_0} \right) \left(\frac{t_0}{t} \right)^{b_3}}$	M1
	$\begin{cases} a_1 = b_1 + X \\ a_2 = b_2 X \end{cases}$	$X_0 = \frac{Y_0 - b_1}{1 - b_2 Y_0 t_0^{-b_3}}$	$Y = \frac{b_1 + X_0}{1 + b_2 X_0 t^{-b_3}}$	M2
Bertalanffy-Richards $Y = a_1 (1 - \exp(-a_2 t))^{a_3}$	$a_2 = X$	$X_0 = -\ln \left(1 - \left(\frac{Y_0}{b_1} \right)^{1/b_3} \right) / t_0$	$Y = b_1 \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{Y_0}{b_1} \right)^{1/b_3} \right]^{t/t_0} \right\}^{b_3}$	M3
	$\begin{cases} a_1 = \exp(X) \\ a_2 = b_2 + b_3/X \end{cases}$	$X_0 = \frac{1}{2} \left(\ln Y_0 - b_2 F_0 \pm \sqrt{(b_2 F_0 - \ln Y_0)^2 - 4 b_3 F_0} \right)$ Avec $F_0 = \ln(1 - \exp(-b_1 t_0))$	$Y = Y_0 \left(\frac{1 - \exp(-b_1 t)}{1 - \exp(-b_1 t_0)} \right)^{(b_2 + b_3/X_0)}$	M4
Lundqvist-Korf $Y = a_1 \exp(-a_2 t^{-a_3})$	$a_2 = X$	$X_0 = -\ln \left(\frac{Y_0}{b_1} \right) t_0^{b_3}$	$Y = b_1 \left(\frac{Y_0}{b_1} \right)^{\left(\frac{t_0}{t} \right)^{b_3}}$	M5
	$\begin{cases} a_1 = \exp(X) \\ a_2 = b_2/X \end{cases}$	$X_0 = \frac{1}{2} \left(\ln Y_0 \pm \sqrt{(-\ln Y_0)^2 + 4 b_2 t_0^{-b_3}} \right)$	$Y = \exp(X_0) \exp(-(b_2/X_0) t^{-b_3})$	M6

IV.2.4 Critères de comparaison des modèles testés

Dans le but de choisir le modèle le plus adéquat pour la modélisation de la croissance en hauteur dominante, tous les modèles ajustés ont été comparés en tenant compte d'un certain nombre de critères. Il s'agit des critères qui mesurent la capacité d'ajustement et la capacité de prédiction, l'analyse de la normalité de la distribution des erreurs (résidus), ainsi que le réalisme biologique de ces modèles. La violation possible de l'hypothèse d'homoscédasticité (la constance de la variance des erreurs) de la distribution des erreurs a été examinée en projetant les résidus en fonction des hauteurs prédites.

IV.2.4.1 Capacité d'ajustement

La capacité d'ajustement des modèles ajustés a été évaluée en se basant sur :

- **Le biais :**

$$biais = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)$$

- **L'erreur quadratique moyenne résiduelle ou l'écart-type résiduel:**

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

- **Le coefficient de détermination ajusté :**

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

où n est le nombre d'observations, y_i, \hat{y}_i et \bar{y} sont les valeurs mesurées, prédites et moyennes de la variable dépendante respectivement, et p est le nombre de paramètres estimés dans le modèle.

IV.2.4.2 Capacité de prédiction

En l'absence d'un ensemble de données de validation indépendant, la capacité de prédiction des modèles a été évaluée à l'aide de la méthode *Leave-One-Out Jackknife* avec des résidus *PRESS (Prediction Sum of Squares)* ou des erreurs de prédiction (Sánchez-González *et al.*, 2005, 2007). Ces résidus sont équivalents aux résidus obtenus en omettant tour à tour chaque observation des données, et en ajustant le modèle aux observations restantes, en prédisant la

réponse pour l'observation omise et en comparant la valeur prédite avec la valeur observée $y_i - \hat{y}_{i,-i} = e_{i,-i} : (i = 1, 2, \dots, n)$ où y_i est la valeur observée, $\hat{y}_{i,-i}$ est la valeur estimée pour l'observation i (où cette dernière est absente de l'ensemble de données d'ajustement du modèle) et n est le nombre d'observations. Chaque fonction candidate donne n résidus *PRESS*. La quantité *PRESS* est donnée par la formule suivante :

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-i})^2$$

En termes de précision, plus la valeur statistique *PRESS* est proche de la somme des carrés des écarts résiduels, meilleure est la capacité prédictive du modèle. Par la suite, les résidus *PRESS* ont également été utilisés pour calculer les critères de comparaison suivants : Bias_p, RMSE_p, R^2_{press} et PREMAD.

- Biais de prédiction :

$$\text{Biais}_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-i})$$

- L'erreur quadratique moyenne de prédiction :

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-i})^2}{n - p}}$$

- Coefficient de détermination de prédiction (press R-square) :

$$R^2_{press} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,-i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

- Moyenne de prédiction des écarts absolus :

$$PREMAD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_{i,-i}|$$

IV.2.4.3 La normalité de la distribution des erreurs (résidus)

La normalité de la distribution des erreurs a été examinée à l'aide du test de normalité de Ryan-Joiner (Ryan et Joiner, 1976) et la présentation graphique des quantiles normaux (QQ-probability plots). Le test de Ryan-Joiner est considéré comme une alternative plus simple que le test de Shapiro-Wilk (de Smith, 2015). La statistique de ce test repose sur le calcul du

coefficient de corrélation entre les résidus ($e_i = y_i - \hat{y}_i$) classées par ordre croissant et les scores normaux ou quantiles normaux (z_i), s^2 étant la variance des ces résidus :

$$\rho_{obs} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i z_i}{\sqrt{s^2(n-1) \sum_{i=1}^n z_i^2}}$$

Les scores normaux ou quantiles normaux (z_i) sont calculés comme suit :

$$z_i = \Phi^{-1}\left(\frac{i-3/8}{n+1/4}\right)$$

où $\Phi^{-1}(z)$ correspond à l'inverse de la fonction de répartition cumulative de la distribution normale réduite.

Des valeurs ρ_{obs} plus proches de l'unité (1) indiquent que les erreurs sont normalement distribuées. La normalité des résidus doit être rejetée au niveau de confiance $(1-\alpha)$ lorsque $\hat{\rho}_{obs} < \rho_\alpha$. Les valeurs critiques ρ_α sont présentées dans un tableau spécifique (Looney et Gullledge, 1985).

IV.2.4.4 Le réalisme biologique

Le pin d'Alep est connu par une moyenne de vie de 150 à 200 ans, cependant il peut atteindre jusqu'à 300 ans (Rameau *et al.*, 2008 ; Prévosto, 2013). Sur cette base, le réalisme biologique des modèles a été évalué par la prédiction de la croissance (la hauteur) à 250 ans.

IV.2.5 Choix de l'âge de référence

Pour choisir l'âge de référence adéquat pour le pin d'Alep, l'erreur relative des prédictions (RE%) a été calculée en utilisant la formule suivante :

$$RE\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-p)}}{\bar{y}} \times 100$$

Où : y_i, \hat{y}_i et \bar{y} sont les valeurs mesurées, prédites et moyenne de la variable dépendante respectivement, n est le nombre total d'observations utilisées pour ajuster le modèle et p est le nombre de paramètres du modèle (Sghaier *et al.*, 2012 ; Kherchouche *et al.*, 2024).

IV.2.6 Identification des classes de fertilité

IV.2.6.1 En fonction de l'indice de site (I_0)

Les classes de fertilité et leurs limites ont été choisies d'une manière arbitraire, en fixant une hauteur dominante à l'âge de référence choisi.

IV.2.6.2 En fonction du volume

Les classes de fertilité en fonction du volume ont été fixées selon la relation hauteur dominante-volume, en testant les deux fonctions :

$$v = a_1 \times H_d$$
$$v = a_0 + a_1 \times H_d$$

Avec a_0 et a_1 sont les paramètres des fonctions et h_d la hauteur dominante.

IV.3 Résultats

IV.3.1 Description des données collectées

Le tableau IV.2 présente les statistiques descriptives des 30 arbres qui ont fait l'objet des analyses des tiges, et qui ont donné un total de 429 rondelles.

Tableau IV.2. Statistiques descriptives des caractéristiques des arbres coupés utilisés pour la modélisation de la croissance en hauteur dominante.

Caractéristiques	Min	Max	Moy	E.T
Âge (années)	90	194	136,13	18,89
Hauteur (m)	12	19,5	15,88	1,65
Nombre de sections prélevées	11	20	14,41	2,26

IV.3.2 Reconstitution du faisceau expérimental

Le faisceau des courbes présentant l'évolution de la hauteur totale en fonction de l'âge illustré par la figure IV.1 a été obtenu par la projection des données des analyses de tiges de 30 arbres issues des coupes dans un chantier d'exploitation.

Sur la même figure, se superpose le nuage de points présentant les couples âge-hauteur ; (l'âge moyen et la hauteur dominante) obtenu au niveau des 60 placettes échantillonnées.

Cet ensemble de courbes et du nuage de points obtenu donne un faisceau expérimental délimitant un intervalle dans lequel des courbes de fertilité pourront être tracées par la suite.

Comme le montre la même figure, il y'a une harmonisation (compatibilité) entre les données des couples âge-hauteur des placettes échantillonnées et celles des analyses de tiges, quoique ces dernières sont de différentes origines (n'ont pas été prélevés dans les placettes).

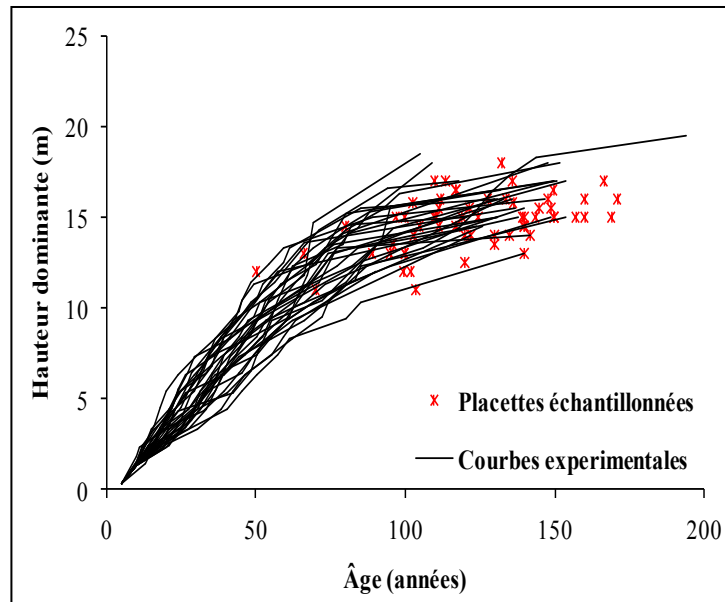


Figure IV.1. Superposition du faisceau de courbes expérimentales des 30 arbres utilisés en analyse de tiges et des couples âge-hauteur des 60 arbres dominants échantillonnés dans les placettes temporaires.

IV.3.3 Ajustement des modèles de croissance

L'ajustement des modèles dérivés de Hossfeld, Bertalanffy-Richards, et Lundqvist-Korf, sur les données issues des analyses de tiges, a donné les résultats des estimations des paramètres pour chaque modèle et leur précision qui sont présentés dans le tableau IV.3. Il ressort d'après le tableau IV.3 que tous les paramètres des différents modèles ajustés sont significatifs ($p < 0,05$). Parmi tous les modèles ajustés, M1 présente l'asymptote la plus faible avec le biais de prédiction et les valeurs de RMSE et $RMSE_p$ les plus élevées.

L'estimation de l'âge moyen à 250 ans montre que tous les modèles ont donné des valeurs logiques, avec une préférence pour M5 et M6.

Pour le modèle M3 où l'asymptote est inférieure à la hauteur maximale observée, son utilisation pour calculer l'indice de site a engendré des formes indéterminées (opération impossible) pour les arbres ayant une hauteur actuelle dépassant la valeur de son asymptote. En se basant sur la valeur, la signification des paramètres, les critères de comparaison et les hauteurs moyennes prédites par les différents modèles à l'âge de 250 ans, les trois modèles M1, M3 et M6 peuvent être retenus et comparés plus en profondeur.

Tableau IV.3. Estimation des paramètres et statistiques de la qualité d'ajustement et de prédiction des modèles.

Modèle	Par.	Est.	P> t	Capacité d'ajustement			Capacité de prédiction			PREMAD	Préd, (250)
				Biais	RMSE	R ² _{adj}	Bias _p	RMSE _p	R ² _{press}		
M1	b ₁	-6,75E68	<0,0001	0,067	0,852	0,969	0,007	1,176	0,943	0,770	24,39
	b ₃	0,706	<0,0001								
	ρ ₁	0,969	<0,0001								
	ρ ₂	0,958	<0,0001								
M2	b ₁	19,690	<0,0001	0,072	0,591	0,985	-0,066	0,670	0,982	0,452	18,09
	b ₂	2,42E32	<0,0001								
	b ₃	1,645	<0,0001								
	ρ ₁	0,975	<0,0001								
	ρ ₂	0,910	<0,0001								
M3	b ₁	17,398	<0,0001	0,066	0,580	0,985	-0,059	0,651	0,983	0,444	17,27
	b ₃	1,682	<0,0001								
	ρ ₁	0,978	<0,0001								
	ρ ₂	0,908	<0,0001								
M4	b ₁	0,022	<0,0001	0,065	0,599	0,984	-0,057	0,710	0,979	0,475	20,13
	b ₂	-5,487	0,0158								
	b ₃	20,370	0,0019								
	ρ ₁	0,976	<0,0001								
	ρ ₂	0,919	<0,0001								
M5	b ₁	29,503	<0,0001	0,077	0,625	0,9823	-0,07	0,730	0,978	0,487	19,54
	b ₃	0,669	<0,0001								
	ρ ₁	0,973	<0,0001								
	ρ ₂	0,917	<0,0001								
M6	b ₂	50,672	<0,0001	0,070	0,630	0,982	-0,053	0,806	0,973	0,520	19,57
	b ₃	0,637	<0,0001								
	ρ ₁	0,972	<0,0001								
	ρ ₂	0,925	<0,0001								

Préd, (250) : la hauteur prédite à l'âge de 250 ans.

Le biais et l'erreur quadratique moyenne RMSE ont été calculés pour les trois modèles par classes d'âge. Les sections issues des arbres échantillonnés ont été réparties en 7 classes d'âge d'amplitude égale à 20 ans.

L'analyse des graphiques du biais (en valeur absolue) (Figure IV.2) a montré que pour les classes inférieures à 100 ans c'est M2 qui présente les valeurs les plus faibles à l'exception de la classe 20-40 ans. Le modèle M6 présente les valeurs les plus faibles pour les classes d'âge < 40 ans et 100-120 ans, au-delà de 120 ans c'est M5 qui présente les valeurs les plus faibles.

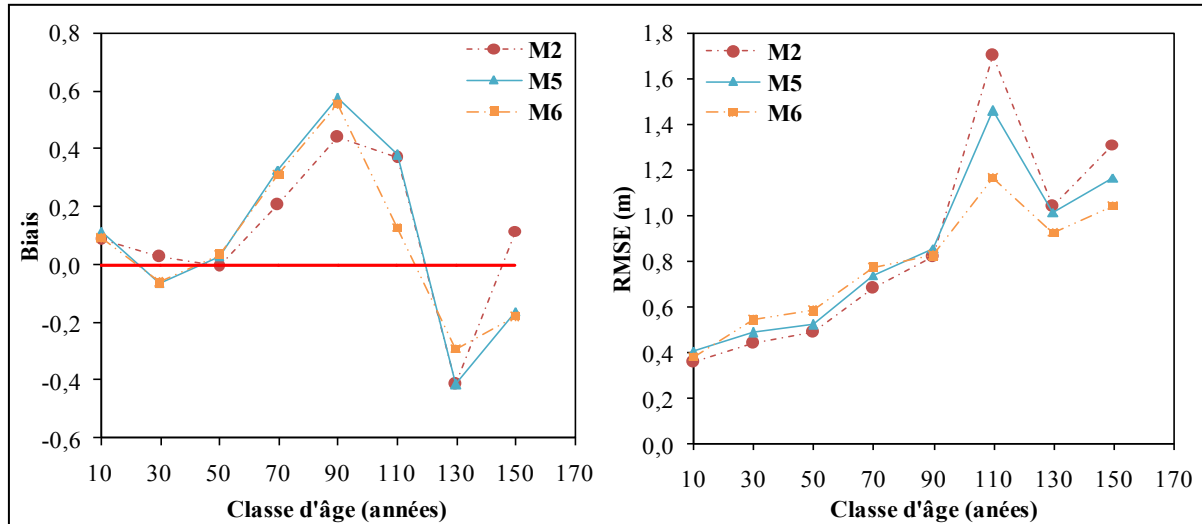


Figure IV.2. Biais et RMSE par classe d'âge pour les trois modèles ajustés retenus.

Quant à l'erreur quadratique moyenne (RMSE), comme le montre la figure IV.2, on constate que jusqu'à 100 ans les valeurs des trois modèles se rapprochent avec une légère supériorité de M2, au-delà M6 représente la valeur la plus faible, suivi par M5 et finalement M2 qui présente les valeurs les plus élevées.

Pour vérifier l'homoscédasticité ainsi que la normalité de la distribution des erreurs obtenues pour les modèles testés, la figure IV.3 illustre la projection des résidus par rapport à la hauteur prédite, et la figure IV.4 montre les courbes de probabilité (*QQ-probability plots*) et la valeur du test de normalité de Ryan-Joiner pour les modèles M2, M5 et M6.

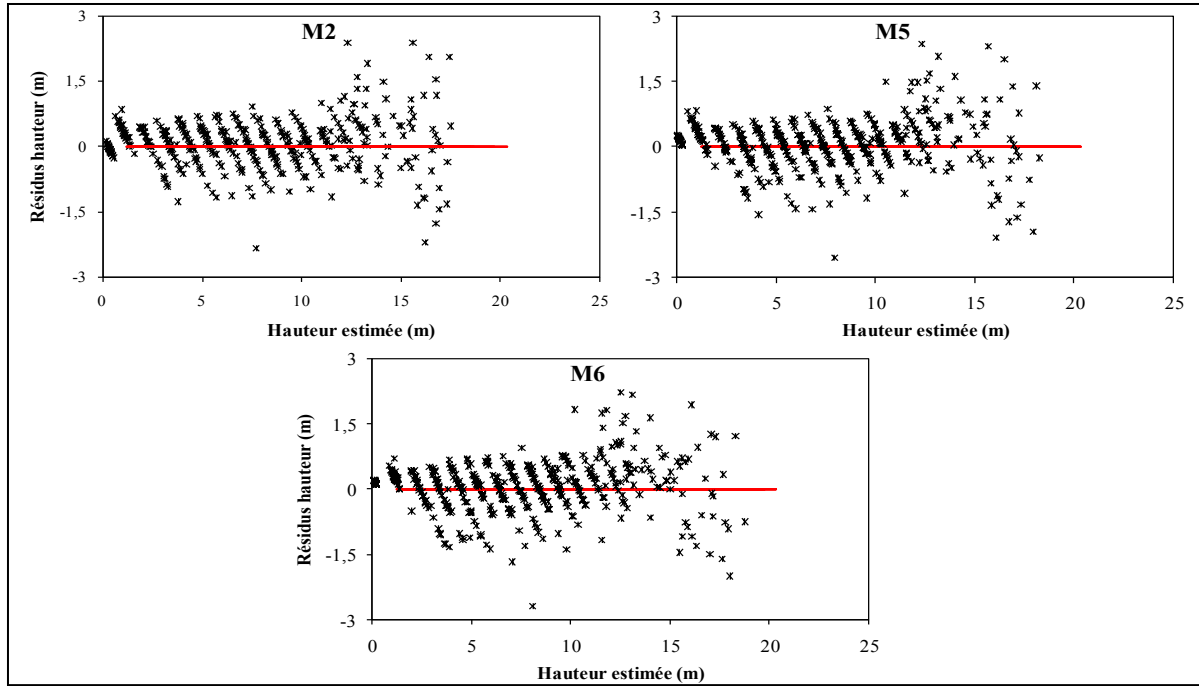


Figure IV.3. Projection des résidus des hauteurs (m) en fonction des hauteurs observées (m), obtenus par les modèles M2, M5 et M6.

D'après la figure IV.3, jusqu'à environ 13 m de hauteur les résidus sont plus ou moins distribués d'une façon aléatoire autour de la valeur de zéro pour tous les modèles avec une légère supériorité du modèle M2 pour les faibles hauteurs (< 1 m). Le même graphique montre une légère concentration des résidus au-dessus de zéro pour les hauteurs de 14 -15 m et ceci pour les trois modèles.

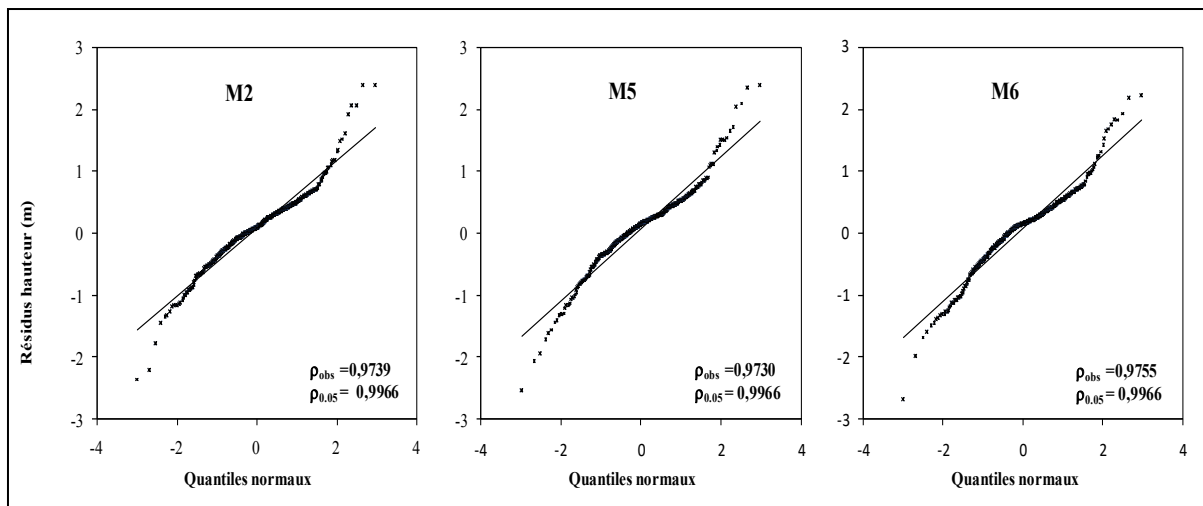


Figure IV.4. Diagramme de QQ-probability plots des résidus des hauteurs (m) et test de normalité de Ryan-Joiner pour les trois modèles testés M2, M5 et M6.

La distribution des résidus pour les trois modèles semble s'écarter légèrement de la distribution normale dans les deux extrémités. Avec une valeur de 0,9755 la distribution des résidus vers le haut pour le modèle M6 semble être la plus homogène par rapport aux autres modèles.

Malgré la ressemblance globale entre les trois modèles M2, M5 et M6 de point de vue précision et réalisme biologique, le modèle M6 donne des prédictions plus précises pour les classes d'âges les plus élevées (RMSE ; Figure IV.2) et des résidus dont la distribution s'approche le plus de la distribution normale (Figure IV.4). Ainsi, le modèle M6, dérivé de l'équation exponentielle proposée par Lundqvist-Korf (GADA) peut être considéré comme celui qui explique le mieux la réalité de la croissance en hauteur du pin d'Alep dans la pinède de Beni Imloul, caractérisée par des peuplements dont l'âge dépasse largement les 100 ans (Figure IV.1). Ce modèle sera utilisé par la suite pour déterminer l'indice de site I_0 et définir les classes de fertilité et de classer les placettes échantillonnées selon la valeur de cet indice.

Le modèle retenu est de la forme suivante :

$$Y = \exp(X_0) \exp(-(50,672/X_0)t^{-0,637})$$

Avec :

$$X_0 = \frac{1}{2} \left(\ln Y_0 \pm \sqrt{(-\ln Y_0)^2 + 4 \times 50,672 t_0^{-0,637}} \right)$$

Y_0 et t_0 : représentent les variables prédictives ; la hauteur (Y_0) et l'âge (t_0) pour lequel Y_0 est observé ; ln est le logarithme népérien.

IV.3.4 Fixation de l'âge de référence

Afin de définir l'indice de site pour un peuplement, il est nécessaire de déterminer l'âge de référence, la figure IV.5 montre les résultats de l'application directe du modèle M6 pour calculer l'erreur relative (RE%) par classe d'âge. Il ressort d'après cette figure que les classes de 60 à 100 et de 120 à 140 présentent les erreurs relatives les plus faibles. Sur la base de ces résultats et en se référant à la littérature où l'âge de référence doit être choisi le plus jeune possible, nous suggérons un âge de référence de 100 ans pour calculer l'indice de site des peuplements de pin d'Alep dans la forêt de Beni Imloul dans le cadre de cette étude. Il est à signaler que le même âge a été utilisé par Kherchouche *et al.* (2024) pour la même espèce dans la même forêt.

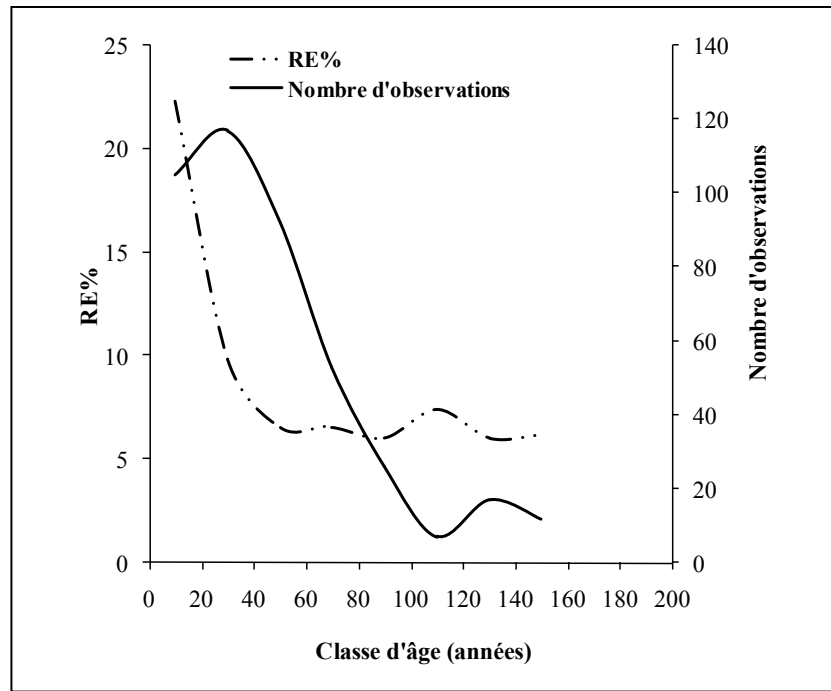


Figure IV.5. Erreur relative de prédiction de la hauteur (RE%) par classes d'âge, calculée par le modèle M6, et le nombre d'observations qui lui correspondent.

IV.3.5 L'indice de site

Après avoir fixé l'âge de référence (t_{ref}) à 100 ans, pour déterminer l'indice de site (I_0 : hauteur atteinte à l'âge de référence t_{ref}) pour chaque peuplement, le modèle retenu s'écrit sous la forme suivante :

$$I_0 = \exp(X_0) \exp\left(-\frac{50,672}{X_0} t_{ref}^{-0,637}\right)$$

Avec :

$$X_0 = \frac{1}{2} \left(\ln Y_0 \pm \sqrt{(-\ln Y_0)^2 + 4 \times 50,672 t_0^{-0,637}} \right)$$

Où : Y_0 et t_0 représentent la hauteur et l'âge actuels et t_{ref} représente l'âge de référence choisi (100 ans).

Selon Johnson et Worthington (1963), l'indice de site d'un arbre individuel doit rester constant quel que soit l'âge de référence choisi (âge invariant), il ne devrait pas y avoir de tendance lorsque l'indice de site estimé est représenté en fonction de l'âge. Pour examiner l'invariance de l'indice de site, un faisceau de courbes de prédiction de l'indice de site en fonction de l'âge en utilisant le modèle M6 et les données d'analyse des tiges a été élaboré (Figure IV.6). A l'exception des âges les plus jeunes (avant environ 15 à 20 ans) où l'estimation s'est montrée très erratique (biaisée), le faisceau montre une constance des prédictions des indices de site au

fil du temps. Pour cela, le modèle d'indice de site développé dans le cadre de cette étude doit être utilisé pour des peuplements qui ont plus de 20 à 30 ans d'âge.

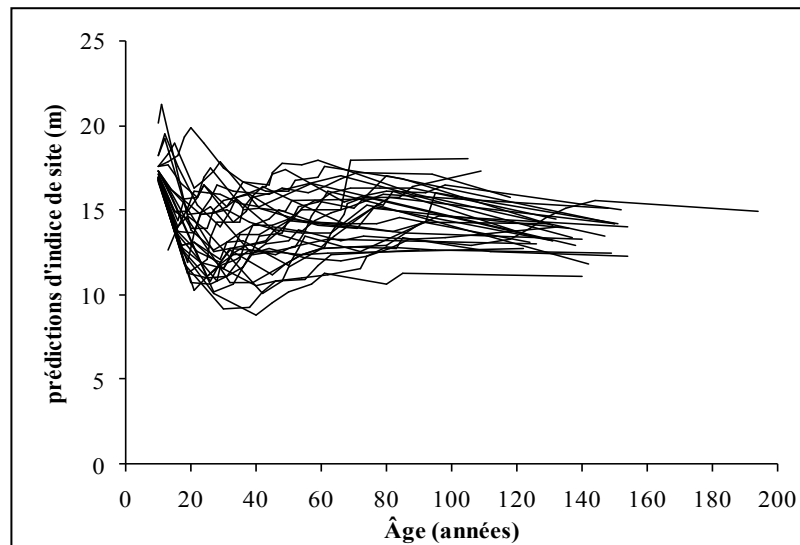


Figure IV.6. Prédiction de l'indice de site par le modèle M6 en fonction de l'âge pour les arbres utilisés en analyse de tiges.

IV.3.6 Identification des classes de fertilité

IV.3.6.1 En fonction de l'indice de site (I_0)

L'estimation d'indice de site pour les 60 placettes échantillonnées en appliquant le modèle M6 a donné des valeurs qui varient entre 10,79 m et 18,11 m avec une valeur moyenne de 13,6 m, une étendue de 7,32 m et un écart-type de 1,47 m (Tableau IV.4).

Pour identifier les classes de fertilité à l'âge de référence de 100 ans, autour de la moyenne de (~14 m) nous avons fixé d'une façon arbitraire trois classes de fertilité d'un intervalle de 2,5 m en divisant l'étendue par trois. Ainsi, deux limites ont été fixées autour la valeur moyenne ; une limite supérieure à 15,25 m et une deuxième limite inférieure à 12,75 m. de cette façon, trois classes de hauteur dominante d'une amplitude égale à 2,5 m correspondant à des hauteurs dominantes à 100 ans de 16,5 m, 14 m et 11,5 m ont été définies.

L'application directe du modèle d'indice de site a permis de tracer les courbes de fertilité (courbes de croissance) pour les limites et les centres des classes définies (Figure IV.7).

Tableau IV.4. Distribution des placettes échantillonnées par classes de fertilité et leurs caractéristiques statistiques.

Classe de fertilité	Limites de La classe (m)	Centre de La classe (m)	Effectif	I_0 (m)			
				Min	Max	Moy	E.T
1	$I_0 > 15,25$	16,5	9	15,33	18,11	16,13	0,84
2	$12,75 < I_0 \leq 15,25$	14	32	12,82	15,23	13,78	0,69
3	$I_0 \leq 12,75$	11,5	19	10,79	12,72	12,09	0,53
Total	-	-	60	10,79	18,11	13,60	1,47

Les résultats de la distribution des placettes selon les classes de fertilité et les valeurs prédites de cet indice pour chaque classe sont présentés dans le tableau IV.4.

La répartition des 60 placettes échantillonnées en trois classes de productivité est représentée par la figure IV.7 ci-dessous.

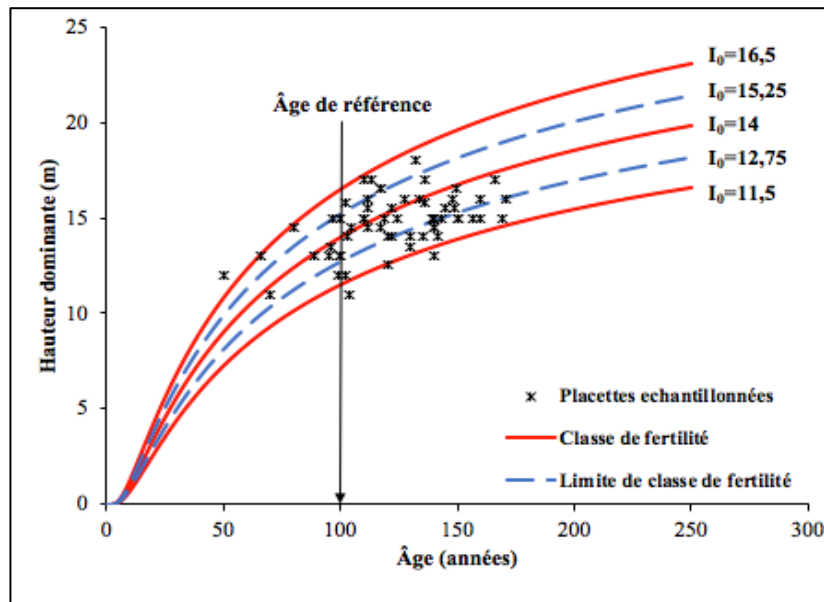


Figure IV.7. Projection des données des couples âge-hauteur des arbres dominants échantillonnés au niveau de 60 placettes sur le faisceau de courbes de croissance en hauteur dominante obtenues avec le modèle M6 pour des indices de site 11,5 m, 14 m et 16,5 m à un âge de référence de 100 ans.

IV.3.6.1.1 Caractérisation des classes de fertilité

Le tableau IV.4 récapitule les caractéristiques dendrométriques moyennes des placettes réparties selon les trois classes de fertilité.

La première classe de fertilité, avec un indice moyen de site de l'ordre de 16,5 m ($I_0 > 15,25$ m), est considérée comme la meilleure classe de fertilité et regroupe seulement 9 placettes,

soit 15 % des placettes échantillonnées. Ces placettes se caractérisent par une densité moyenne de 303 arbres à l'hectare et un âge moyen de 99 ans.

La deuxième classe de fertilité dont l'indice moyen de site est de l'ordre de 14 m ($12,75 \text{ m} < I_0 \leq 15,25 \text{ m}$) est une classe de fertilité moyenne et regroupe 53 % des placettes échantillonnées. Les peuplements appartenant à cette classe de fertilité ont une densité moyenne de 280 arbres à l'hectare et un âge moyen de 120 ans.

La troisième et dernière classe de fertilité, avec un indice moyen de site de 11,5 m ($I_0 \leq 12,75 \text{ m}$) est considérée comme une classe de fertilité médiocre. Elle est représentée par 19 placettes, soit 32% des placettes échantillonnées. Les peuplements relevant de cette classe sont caractérisés par une densité moyenne d'environ 300 arbres à l'hectare et un âge moyen de 137 ans.

Tableau IV.5. Statistiques descriptives des variables mesurées pour les 60 placettes et leur répartition en 3 classes de fertilité.

Variable	Classes de fertilité											
	1 : $I_0 > 15,25$				2 : $12,75 < I_0 \leq 15,25$				3 : $I_0 \leq 12,75$			
	Min	Max	Moy	E.T	Min	Max	Moy	E.T	Min	Max	Moy	E.T
I_0 (m)	15,3	18,1	16,1	0,8	12,8	15,2	13,8	0,7	10,8	12,7	12,1	0,5
Âge (Année)	50	132,2	98,7	27,3	70	166,5	120,1	22,6	99,3	171	137,1	21,0
N (arbre/ha)	198	693,2	302,6	170,1	132,4	670,9	279,6	126,3	147,7	660,3	299,3	159,5
Dg	15,2	41,6	31,6	10,5	17,3	49	32	7,3	14,3	45	29	7,8
G (m²/ha)	9,6	30,4	20,4	8,1	6,9	31,9	20,2	4,9	10,6	23,5	16,8	3,9
H_d (m)	12	18	15,6	2	11	17	14,9	1,3	11	16	14	1,3
D₀ (cm)	23,8	75	55	18,3	30	82,5	61,6	11,9	24,3	85,3	59,4	14,6
vbf (m³/ha)	49	207,3	131,6	60,6	40,9	207,3	131,1	34,4	54,8	159,8	105,5	27,4
Effectif	9				32				19			

Min : minimum, **Max** : maximum, **Moy** : moyenne, **E.T** : Écart-type, **I_0** : indice de site, **N** : densité (arbres/ha), **Dg** : diamètre moyen quadratique, **G** : surface terrière, **H_d** : hauteur dominante, **D₀** : diamètre maximal, **vbf** : volume bois fort.

IV.3.6.2 En fonction du bois fort (vbf)

La productivité déterminée par la hauteur dominante atteinte à un âge donnée (âge de référence), comporte plusieurs niveaux correspondants, par convention, à des intervalles égaux de hauteur entre les différentes classes. Cette classification entraîne des divisions inégales en termes de volumes et cela peut entraîner des inconvénients en matière d'aménagement (Rondeux, 1993).

De ce fait, les classes de croissance en hauteur dominante prédéfinies ont été transformées en classes de productivité en volume à travers la relation liant le volume du peuplement à sa hauteur dominante. En utilisant la formule suivante : $v = 8,4 \times H_d$.

Le tableau IV.6 et la figure IV.8, présentent les classes de productivité en volume, et la répartition des placettes échantillonnées, tandis que le tableau IV.7 illustre les statistiques descriptives des différentes caractéristiques dendrométriques de ces classes. Selon le tableau IV.6, la majorité des peuplements (26 avec un taux de 43,33 %) appartient à la 1^{ère} classe, 34 placettes sont réparties entre les deux classes restantes, 17 placettes pour chacune.

Tableau IV.6. Distribution des placettes échantillonnées par classes de volume bois fort et leurs caractéristiques statistiques.

Classe de volume	Limites de classes (m ³)	Centre de classe (m ³)	Effectif	Volume bois fort (m ³)			
				Min	Max	Moy	E.T
1	vbf > 128,85	139,42	26	129,23	207,28	157,14	24,70
2	107,73 < vbf ≤ 128,85	118,29	17	107,82	128,09	116,56	6,57
3	vbf ≤ 107,73	97,17	17	40,92	105,28	77,42	19,08

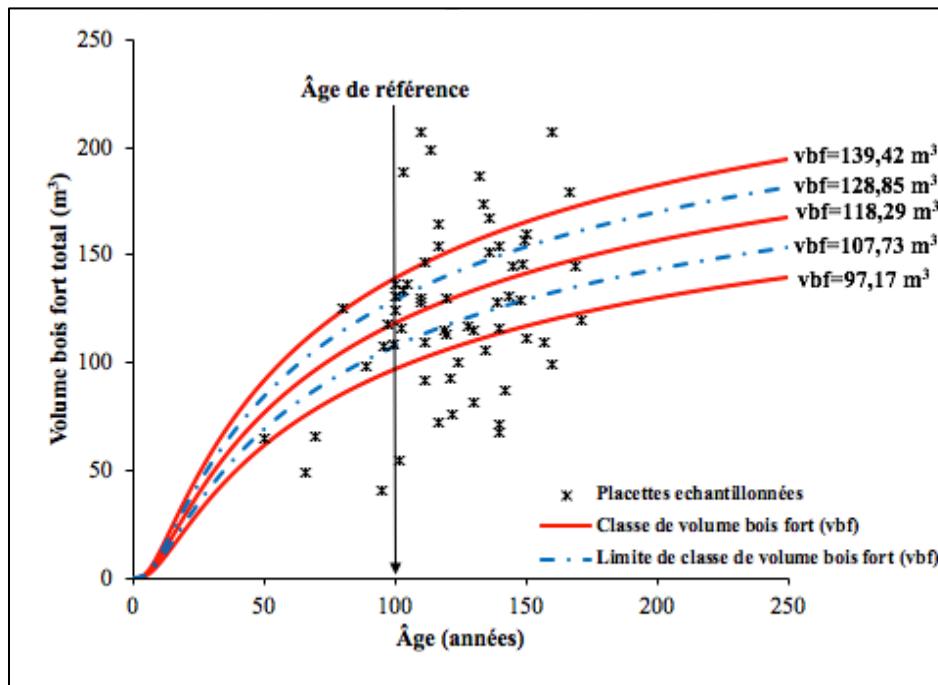


Figure IV.8. Projection des données de 60 placettes en fonction de leur volume et âge sur les classes de volume.

IV.3.6.2.1 Caractérisation des classes de volume bois fort (vbf)

A partir du tableau IV.7, les différentes classes de volume peuvent être décrites comme suit :

- La classe 1 regroupe des peuplements âgés de 130 ans, d'une densité faible de 267 arbres à l'hectare et d'une surface terrière moyenne de 24 m²/ha avec un volume de 157 m³/ha.
- La classe 2 est composée des peuplements dont l'âge et la densité sont sensiblement les mêmes que ceux des peuplements appartenant à la classe précédente. Cette classe se distingue de la précédente par des valeurs inférieures pour la surface terrière et le volume à l'hectare avec 18 m²/ha et 117 m³/ha.
- La classe 3 comprend des peuplements se caractérisant par des densités élevées de l'ordre de 341 arbres à l'hectare en moyenne, une surface terrière et un volume faible de l'ordre de 13 m²/ha et 77 m³/ha respectivement.

Tableau IV.7. Statistiques descriptives des caractéristiques des peuplements par classe de productivité en volume bois fort.

Variable	Classes de volume											
	vbf > 128,85				107,73 < vbf ≤ 128,85				vbf ≤ 107,73			
	Min	Max	Moy	E.T	Min	Max	Moy	E.T	Min	Max	Moy	E.T
I₀ (m)	10,8	16,3	13,7	1,3	11,4	16,3	13,6	1,4	11,1	18,1	13,5	1,8
Âge (Année)	100	169	129,6	21,5	80,0	171,0	120,6	24,8	50,0	160,0	112,7	30,2
N (arbre/ha)	132,4	670,9	267,2	122,3	157,9	636,6	271,4	122,0	152,1	693,2	340,9	179,3
Dg	20,9	49	35,7	7,1	20,0	37,7	30,7	5,1	14,3	34,7	24,0	6,5
G (m²/ha)	19,2	31,9	23,9	3,3	17,0	20,0	18,2	1,1	6,9	17,7	12,8	2,6
H₀ (m)	11,0	18	15,3	1,5	12,0	16,0	14,6	1,1	11,0	16,5	13,8	1,5
D₀ (cm)	39,7	85,3	64,7	10,9	34,6	77,5	62,6	11,0	23,8	69,3	49,9	15,6
vbf (m³/ha)	129,2	207,3	157,1	24,7	107,8	128,1	116,6	6,6	40,9	105,3	77,4	19,1
Effectif	26				17				17			

IV.3.7 Comparaison entre les classes d'indice de site et les classes de volume bois fort

La confrontation des deux classements des peuplements ; selon leur indice de site puis selon leur volume, a révélé que 20 placettes, soit un taux de 33,33 %, ont gardé exactement la même position, 4 placettes dans la 1^{ère} classe de productivité, 8 placettes pour la 2^{ème} et la 3^{ème} chacune.

La catégorie des peuplements déplacés vers une classe voisine, soit inférieure ou supérieure, constitue 62 % des peuplements (37 placettes), où la majorité (26 placettes) a été déplacée vers la classe supérieure contre 11 placettes vers la classe inférieure.

Seulement 3 placettes, soit 5 %, se sont déplacées de la classe 1 à la classe 3.

A partir de ces résultats, on peut conclure que le modèle de croissance en hauteur dominante élaboré dans cette étude, peut être considéré comme valide pour l'estimation de la productivité en volume pour 95 % des peuplements échantillonnés.

IV.4 Discussion

Après l'analyse des statistiques utilisées pour comparer les six modèles étudiés, le comportement du RMSE, le biais par classe d'âge ainsi que la comparaison graphique des résidus et le test de normalité, c'est la forme différentielle algébrique généralisée (GADA) de la fonction de croissance proposée par Lundqvist-Korf (Lundqvist, 1957) qui a été jugée la meilleure, et retenue pour le développement des courbes d'indice de site.

Ce modèle, avec ses deux formes (ADA) et (GADA), a également montré une performance et a donné des meilleurs résultats pour le pin d'Alep ainsi que pour d'autres espèces. En Tunisie, c'est la forme (GADA) qui a été retenue pour le pin d'Alep (Sghaier et Garchi, 2009) ainsi que pour le Pin pignon (Sghaier *et al.*, 2012).

Cependant, la forme (ADA), s'est montrée la plus performante pour l'Eucalyptus au Portugal (Mateus et Tomé, 2009) et au Brésil (Martinz, 2014). La méthode (GADA) permet de dériver des modèles polymorphes avec des asymptotes variables, donnant ainsi une grande flexibilité des équations dynamiques (Cieszewski et Strub, 2008 ; dos Santos, 2023). L'âge de référence qui a été fixé pour cette étude à 100 ans a été choisi en tenant compte de la valeur la plus faible de l'erreur relative obtenue (RE%). Pour la même espèce dans les Aurès ; cet âge a été fixé à 100 ans par Franz et Forster (1979), et à 70 ans pour le massif de Ouled Yaâgoub (Bentouati *et al.*, 2005). Dans une étude plus récente menée dans les Beni Imloul par Kherchouche *et al.* (2024), cet âge de référence a été également fixé à 100 ans. En France (Couhert, 1991) et en Tunisie (Sghaier et Garchi, 2009), cet âge a été fixé à 50 ans. Dans ce dernier cas (Tunisie), cet âge correspond presque à l'âge moyen des peuplements du pin d'Alep étudiés.

L'étude de la productivité des sites forestiers est d'une grande importance pour l'aménagement et la gestion des peuplements forestiers, Il existe une grande variété d'approches pour évaluer la productivité des sites forestiers, cependant l'indice de site reste le moyen le plus utilisé pour quantifier la productivité d'un site, il permet de fixer les niveaux de productivité et de classer les peuplements selon leurs potentialités de production.

Le choix des intervalles des classes de fertilité a été fait arbitrairement autour d'une moyenne de 14 m et d'une amplitude de 2,5. Ainsi trois classes de productivité ont été matérialisées, de bonne, moyenne et de faible fertilité, et qui ont des hauteurs dominantes moyennes de 16,5 m,

14 m et 11,5 m respectivement à un âge de référence de 100 ans. L'application directe du modèle M6 sur les données des 60 placettes nous a permis leur classification selon ces trois classes ; 53% des peuplements sont de moyenne productivité, 32% d'une productivité médiocre, et seulement 15% des placettes relève de la classe de bonne productivité.

Cependant, les valeurs des hauteurs dominantes moyennes attendues à 250 ans sont estimées à 23 m, 20 m et 17 m pour des valeurs d'indice de site à 100 ans de 16,5 m ; 14 m et 11,5 m. Cela correspond à la croissance biologique plausible de l'espèce dans les environnements de croissance étudiés. D'après les résultats de cette étude, les courbes élaborées doivent être utilisées pour des âges supérieurs à 20-30 ans, car pour les âges plus jeunes, une croissance irrégulière en hauteur peut conduire à des classifications erronées (Sghaier *et al.*, 2012).

Bien que les courbes liant la hauteur dominante à l'âge soient souvent les plus utilisées pour déterminer les niveaux de production des peuplements forestiers, elles ne sont pas toujours suffisantes pour caractériser la productivité d'un milieu donné (Rondeux, 1993). L'appréciation de la productivité basée sur les classes de volume a donné des résultats plus satisfaisants et a permis d'identifier également trois classes de production. La répartition des placettes selon leur volume en fonction de l'âge a montré que 43,33% des placettes appartiennent à la 1^{ère} classe de productivité avec un volume moyen de 157,14 m³/ha, le volume qui peut être produit à 250 ans pour cette classe est de l'ordre de 195 m³/ha.

Dans le pourtour méditerranéen, les études sur la croissance en hauteur du pin d'Alep sont nombreuses. Les résultats de la croissance en hauteur pour cette espèce dans la forêt de Beni Imloul ont été comparés d'abord avec les modèles établis en Algérie et précisément dans les Aurès (Bentouati *et al.*, 2005 ; Kherchouche *et al.*, 2024, et avec ceux de Tunisie (Sghaier et Garchi, 2009) et en Espagne (Rojo-Alboreca *et al.*, 2017).

Les courbes des classes de fertilité développées par les auteurs mentionnés ci-dessus ont été superposées aux courbes du modèle retenu dans notre étude, et au nuage de couples de points âge-hauteur pour les 60 placettes échantillonnées dans le même cadre. La figure IV.9 (a), représente la superposition des courbes de fertilité obtenues dans cette étude avec celles de Bentouati *et al.* (2005) pour Ouled Yaâgoub et de Kherchouche *et al.* (2024) pour le massif de Beni Imloul. Jusqu'à 120 ans on note qu'il y'a une parfaite concordance entre les trois courbes, au-delà on remarque une légère supériorité pour les courbes de Kherchouche *et al.* (2024) et une stabilité de la croissance des courbes d'Ouled Yaâgoub (Bentouati *et al.*, 2005). La ressemblance entre les courbes développées dans le cadre de cette étude et celles développées par Kherchouche *et al.* (2024) est due à l'origine des données utilisées dans les deux études (même massif forestier) et à la même technique de modélisation de l'indice de

site (approche GADA). Les courbes d'indice de site développées par Bentouati *et al.* (2005) qui montrent une stabilité ou un arrêt de croissance vers l'âge de 150 ans sont ajustées sur des données qui proviennent d'un autre environnement de croissance (Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana) et selon une autre approche de modélisation (méthode des courbes guides).

Les figures IV.9 (b) et (c) montrent une confrontation des trois classes de fertilité définies dans la présente étude avec les mêmes classes, mais établies selon les modèles obtenus par Rojo-Alboreca *et al.* (2017) et Sghaier et Garchi (2009) pour les peuplements espagnols et tunisiens respectivement. Avant 100 ans, les peuplements espagnols et tunisiens montrent une croissance plus rapide que celle des Beni Imloul. La différence est marquée pour les peuplements tunisiens où la courbe de la troisième classe de fertilité en Tunisie dépasse la 1^{ère} classe de Beni Imloul pour les jeunes âges (jusqu'à 20 à peu près). La croissance de ces peuplements tend à diminuer, jusqu'à ce que les courbes recoupent celles des Beni Imloul à 100, puis au-delà de cet âge c'est plutôt l'inverse qui se produit ; la croissance des peuplements de Beni Imloul reste maintenue, tandis que celle des peuplements espagnols et tunisiens tend vers la stabilité qui commence plus rapidement chez les peuplements espagnols par rapport aux peuplements tunisiens.

La différence enregistrée avec les peuplements de Tunisie et de l'Espagne peut être due soit à l'utilisation des modèles et des techniques d'ajustement différents, soit à la variabilité des conditions des milieux de croissance des différents peuplements d'un pays à l'autre.

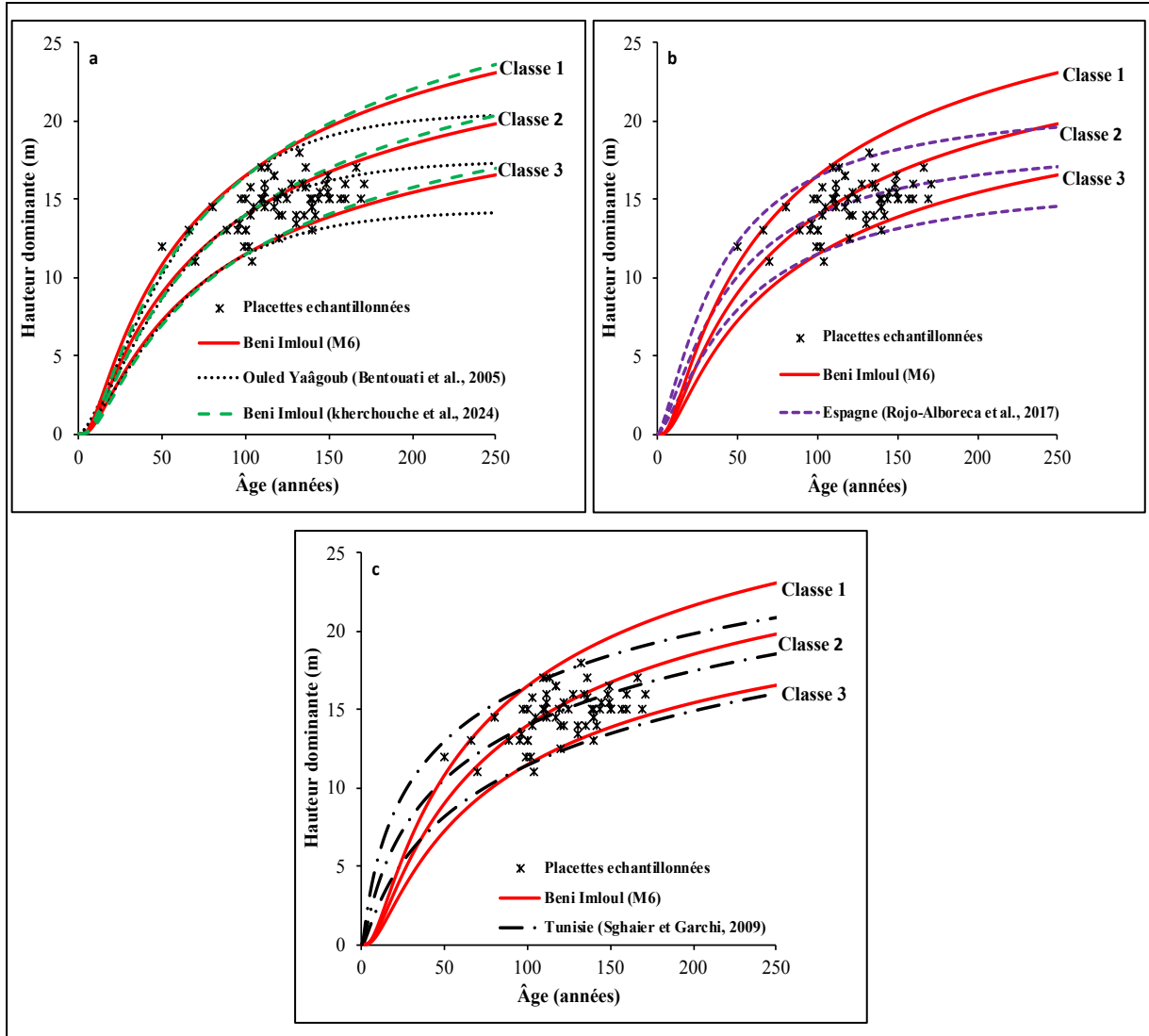


Figure IV.9. Comparaison des courbes des trois classes de fertilité de la pinède de Beni Imloul (M6) avec celles de l'Algérie (Ouled Yaâgoub (Bentouati *et al.*, 2005) et Beni Imloul (Kherchouche *et al.* (2024)) (a), de l'Espagne (Rojo-Alboreca *et al.*, 2017) (b) et de la Tunisie (Sghaier et Garchi, 2009) (c).

Conclusion

Dans ce chapitre, des courbes d'indice de site ont été développées pour des peuplements naturels de pins d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans la forêt de Beni Imloul. À partir des données de 30 arbres abattus et ayant fait l'objet d'analyses de tiges, un ajustement de six modèles dérivés des équations de base de Hossfeld, Bertalanffy-Richards et Lundqvist-Korf en leurs deux formes (ADA) et (GADA) a été effectué. Sur la base de différents critères de comparaison statistique et graphique (basée sur l'étude des résidus), le modèle M6 dérivé de la fonction de croissance proposée par Lundqvist-Korf (Lundqvist, 1957) (forme GADA),

s'est avéré le plus adéquat pour calculer l'indice de site dans cette pinède. L'application directe du modèle M6 pour un âge de référence choisi à 100 ans, a permis de définir trois classes de fertilité en fonction de l'indice de site et en fonction du volume.

Les courbes développées dans la présente étude ont été comparées aux modèles d'indices de sites existants pour la même espèce dans d'autres régions du pays et des pays voisins du pourtour méditerranéen.

Cette étude reflète l'importance de développer des courbes d'indice de site pour caractériser et classer les peuplements selon leur potentiel productif Il est à signaler que le modèle développé dans le cadre de la présente étude doit être appliqué à des peuplements ayant atteint 20 ans d'âge et plus.

**Chapitre. V Tables de production et sylviculture du
pin d'Alep**

Introduction

Lorsqu'il s'agit de donner à l'étude des peuplements un caractère dynamique, il est important de les suivre dans le temps et de caractériser leur évolution (Rondeux, 1993).

En matière d'aménagement forestier, le suivi et la prévision de l'évolution des peuplements par niveau de fertilité des stations, se réalise en utilisant les tables de production qui sont des tableaux chiffrés décrivant le développement dans le temps des peuplements forestiers équiennes, homogènes et de densité normale. Ces tables sont considérées comme les outils les plus connus et les plus utilisés en matière de prévision de la production des peuplements forestiers, en exprimant leur évolution dans le temps (Decourt, 1964 ; Rondeux, 1993).

Il existe trois types de tables de production. Le premier type : les tables de production normales qui sont développées, essentiellement par voie graphique, à partir des placettes installées dans des endroits entièrement peuplées ou à densité normale. Le second type : les tables de production empiriques qui s'appliquent à des peuplements de densité moyenne et couvrent des conditions de peuplements plu larges. Le troisième type : les tables de production à densités variables qui couvrent un ensemble de situations encore plus large. Dans ce dernier type de tables, la densité est introduite comme une variable explicative à côté de l'âge (Rondeux, 1993 ; Burkhart et Tomé, 2012).

Une table de production fournit, par unité de surface et par niveau de productivité, pour le peuplement principal et le peuplement accessoire (arbres prélevés en éclaircies) les caractéristiques suivantes :

- la hauteur moyenne et/ou dominante,
- le nombre d'arbres,
- la surface terrière,
- le diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne ou diamètre moyen arithmétique,
- le volume du bois fort de la tige ou le bois fort total.

Par le biais de relations mathématiques adéquates, ces caractéristiques permettent de calculer pour le peuplement total (peuplement principal + peuplement accessoire) la production totale en volume ainsi que l'accroissement annuel courant (AAC) et l'accroissement annuel moyen (AAM) en volume et en surface terrière. A côté de ces tables qui contiennent ce type d'informations qui sont applicables pour une sylviculture moyenne, il existe d'autres types de tables de production contenant d'autres informations (Bouchon, 1988 ; Rondeux, 1993).

Les données de base pour la construction des tables de production sont collectées dans des placettes expérimentales permanentes ou temporaires, réparties aussi uniformément que

possible dans les différentes classes d'âge et de milieux de croissance. Une placette permanente est un peuplement d'une étendue de quelques ares, matérialisée sur le terrain de façon permanente et faisant l'objet de mesures répétées sur les mêmes individus et durant une longue période. En l'absence de ces placettes permanentes, les placettes temporaires de mesures peuvent constituer une alternative pour la construction des tables de production où une partie des informations relatives au passé des arbres, en particulier leur croissance en hauteur, peut être obtenue par l'analyse de tiges (Palm, 1989 ; Rondeux, 1993).

De multiples tables de production ont été développées pour différentes espèces, et dans différentes régions du monde. En ce qui concerne le pin d'Alep dans les Aurès algériens, des tables de production ont été construites par Franz et Forster (1979), Bentouati (2006) et Rabhi *et al.* (2023).

L'objectif principal de ce chapitre est de dresser des tables de production pour le pin d'Alep de la forêt de Beni Imloul selon deux types de sylviculture : une sylviculture moyenne observée et une sylviculture proposée basée sur le calcul d'un indice d'espacement moyen entre les arbres qui dépend de la hauteur dominante du peuplement.

V.1 Construction des tables de production

La méthode utilisée pour la construction des tables de production s'appuie sur l'établissement de trois grands ensembles de relations entre les variables intervenant normalement dans une table de production à savoir : la hauteur dominante, la densité, l'âge, le diamètre moyen quadratique et le volume total (Decourt, 1972, Rondeux, 1993, Sghaier et Ammari, 2012). Les données de base utilisées proviennent de 60 placettes temporaires installées dans la pinède de Beni Imloul.

Les relations nécessaires pour l'élaboration d'une table de production sont les suivantes :

V.1.1 Une relation exprimant la productivité de la station

C'est une relation de type $H_d = f(\hat{A}ge, I_0)$, elle est dépendante de l'âge et des conditions du milieu et ne dépend pas des éclaircies pratiquées. Il s'agit d'une relation qui exprime la croissance en hauteur dominante en fonction de l'âge et du niveau de productivité (I_0 , hauteur dominante à un âge de référence) (Rondeux, 1993).

Cette relation est donnée par le modèle polymorphique en différences algébriques généralisés (GADA) dérivée de la forme intégrale de la fonction de Lundqvist-Korf (M6), qui a servi au développement des courbes de fertilité et qui a la forme suivante :

$$H_d = \exp(X_0) \exp\left(-\left(50,672/X_0\right)t_{ref}^{-0,637}\right) \quad (M6)$$

$$\text{Avec : } X_0 = \frac{1}{2} \left(\ln Y_0 \pm \sqrt{(-\ln Y_0)^2 + 4 \times 50,672 t_0^{-0,637}} \right)$$

Où : t_0 est l'âge actuel et t_{ref} est l'âge de référence choisi (100 ans).

V.1.2 Des relations de description des peuplements

D'après Rondeux (1993), pour définir l'état des peuplements d'une essence donnée et leur évolution avant et après éclaircie, des relations statistiques sont utilisées. Il s'agit des relations dendrométriques indépendantes de l'âge et de la productivité de la station :

- La hauteur moyenne (H_m en m) comme une fonction de la hauteur dominante : $H_m = f(H_d)$.
- Le diamètre moyen quadratique exprimé comme une fonction de la densité (N) du peuplement et la hauteur dominante ou la hauteur moyenne : $D_g = f(N, H_d \text{ ou } H_m)$.
- Le volume total comme une fonction de la densité du peuplement, la hauteur dominante ou la hauteur moyenne et le diamètre moyen quadratique ou la surface terrière (Tarif de cubage peuplement) : $V = f(N, H_d, H_m, D_g, G)$.

Le volume bois fort de chaque peuplement a été obtenu par le biais des tarifs de cubage pondérés à une et à deux entrées élaborés dans le même cadre d'étude en troisième chapitre, selon la disponibilité des données des arbres. Les tarifs utilisés sont représentés par les deux équations :

$$v_i = 1,79E - 4Di^{2,296} \text{ avec } R^2 = 0,8787 \text{ pour le tarif à une entrée.}$$

$$v_i = 6,10E - 5Di^{1,8214} Hi^{1,023} \text{ avec } R^2 = 0,9375 \text{ pour le tarif à deux entrées.}$$

V.1.3 Des relations exprimant la sylviculture et le choix du régime d'éclaircie

Ces relations sont matérialisées au moyen de trois critères : la rotation, l'intensité et la nature des éclaircies.

La rotation (R) de l'éclaircie

La rotation (R) de l'éclaircie est imposée dans le modèle en termes de périodes de temps, ou de mètre d'accroissement de hauteur moyenne ou de hauteur dominante, elle est donnée par la relation suivante :

$$R = f(h_d, I_0) \text{ ou } R = f(h_d)$$

Selon Bentouati (2006), dans le cas où la rotation est liée à la hauteur dominante, l'éclaircie doit être pratiquée chaque fois que la hauteur dominante aura atteint une valeur donnée.

Pour le pin d'Alep, Benzyene *et al.* (1992) citent des rotations assez espacées pour éviter l'effet brusque de l'éclaircie. Des rotations fixes de 10 ont été adoptées en Espagne (Montero *et al.*, 2001), en Algérie (Bentouati, 2006) et en Tunisie (Sghaier et Ammari, 2012).

En France, des rotations variables selon les classes de productivité ont été choisies (Couhert et Duplat, 1993). Dans la présente étude et en se basant sur les deux études réalisées en Tunisie et en Algérie, nous avons opté pour une rotation uniforme de 10 ans.

L'intensité de l'éclaircie

Quant à l'intensité des éclaircies, elle consiste à la diminution du nombre de tiges à chaque éclaircie, ou aussi au nombre de tiges N à laisser sur pied lorsque le peuplement atteint une hauteur dominante donnée.

Il s'agit d'exprimer l'évolution de la densité du peuplement comme une fonction de la hauteur dominante ou la hauteur moyenne et l'âge du peuplement

$$N = f(H_d, H_m, t)$$

En se basant sur la relation de la densité, deux types de sylviculture sont présentés dans cette étude.

V.1.3.1 Sylviculture moyenne observée

Pour caractériser l'intensité de l'éclaircie, les états de densité des peuplements ainsi que les variables mesurées dans les placettes temporaires sont considérés comme une alternative pour faire face à l'indisponibilité des données (Sghaier et Ammari, 2012).

Les fonctions de densité de F11 jusqu'à F15 ont été ajustées et évaluées, elles sont mentionnées dans le tableau V.1.

V.1.3.2 Sylviculture proposée

Afin de doser le degré des éclaircies, deux méthodes sont utilisées et citées dans la littérature, la première est celle de la « surface terrière relative » de Assmann (1954, 1956), la seconde est celle du « facteur d'espacement » d'Hart-Becking (Hart, 1928 ; Becking, 1953).

La sylviculture proposée dans cette étude repose sur l'utilisation de l'indice d'espacement d'Hart-Becking (S) ; il s'agit d'un indice imaginé par Hart (1928) et mis au point par Becking (1953) (Pardé, 1961). Selon Wilson (1979), il s'agit d'un indice qui exprime l'espacement moyen entre les arbres en fonction de la hauteur dominante en partant du principe selon lequel l'espacement augmente avec la hauteur. Cet indice d'espacement exprimé en % est très employé en peuplements résineux équiennes afin de servir de guide pour doser les éclaircies, il est donné par la formule suivante :

$$s = \frac{10^4}{H_d \sqrt{N}}$$

Où S est l'indice d'espacement d'Hart-Becking, H_d est la hauteur dominante (m), N est le nombre d'arbres par hectare.

Cet indice qui est exprimé en pourcent de la hauteur dominante, vise à maintenir une distance relative constante entre les arbres. Ainsi, lorsque la hauteur dominante augmente, la distance absolue entre les arbres augmente également, cependant la distance relative reste constante. Un indice S élevé indique une concurrence faible entre les arbres (Sghaier et Ammari, 2012).

Pour déterminer la valeur de l'indice d'Hart-Becking à appliquer lors des éclaircies dans les peuplements de pin d'Alep, Sghaier et Ammari (2012) indiquent trois points importants :

- la densité initiale simulée à l'âge de 10 ans pour chaque classe de productivité dans le cas de la sylviculture observée.
- les valeurs observées et estimées de l'indice d'espacement d'Hart-becking dans les peuplements jeunes de pin d'Alep par classe de productivité.
- La stabilisation du nombre de tiges. En s'appuyant sur les travaux de Bentouati (2006), le nombre de tiges doit se stabiliser entre 700 et 900 tiges par hectare entre l'âge de 20 et 30 ans, selon les conditions stationnelles. Ce choix est justifié par la nature de l'espèce : le pin d'Alep qui est considéré comme une essence de lumière ne tolère pas une densité excessive et se caractérise par une croissance relativement lente.

Type de l'éclaircie

Le type ou la nature de l'éclaircie est représenté généralement par le coefficient k défini comme le rapport du volume moyen des arbres éliminés en éclaircie \bar{v}_e au volume moyen des arbres du peuplement avant éclaircie \bar{v} (Rondeux, 1993) :

$$k = \frac{\bar{v}_e}{\bar{v}}$$

Le coefficient k permet de caractériser la nature de l'éclaircie, en indiquant si elle est par le haut ou par le bas. Une valeur de k proche de 1 correspond à une éclaircie par le haut, tandis qu'une valeur de 0,7 à 0,8 ou inférieure indique une éclaircie par le bas (Decourt, 1972).

Au niveau du massif de Beni Imloul, en raison de l'état sanitaire dégradé des arbres (fortement attaqués par les polypores) et de l'âge avancé de la pinède, Franz et Forester (1979) ont recommandé une éclaircie forte par le haut.

Toutes les relations dendrométriques indépendantes de l'âge et de la productivité de la station et celles de la densité, mentionnées en haut, ont été évaluées selon les fonctions suivantes (Tableau V.1) :

Tableau V.1. Les différentes fonctions (sous modèle) ajustées. Source (Sghaier et Ammari, 2012).

Type de relation	Fonction (Sous modèle)	N°
$H_m = f(H_d)$	$H_m = a_0 H_d$	F1
	$H_m = a_0 + a_1 H_d$	F2
$D_g = f(N, H_d, H_m)$	$D_g = a_0 + a_1 \frac{100}{\sqrt{N}} + a_2 H_d$	F3
	$D_g = a_0 + a_1 \frac{100}{N^{a_2}} + a_3 H_d$	F4
	$D_g = a_0 + a_1 H_d + a_2 N$	F5
	$D_g = a_0 H_d^{a_1} N^{a_2}$	F6
$V = f(N, H_d, H_m, D_g, G)$	$V = a_0 + a_1 (G \times H_d)$	F7
	$V = a_0 N^{a_1} D_g^{a_2} H_d^{a_3}$	F8
	$V = a_0 N^{a_1} D_g^{a_2}$	F9
	$V = a_0 G^{a_1} H_d^{a_2}$	F10
$N = f(H_d, H_m, t)$	$N = a_0 e^{a_1 H_d}$	F11
	$N = a_0 H_d^{a_1}$	F12
	$N = \frac{10^4}{(a_0 + a_1 H_d^{a_2})^2}$	F13
	$N = \frac{10^4}{(a_0 + a_1 H_d \sqrt{t})^2}$	F14

V.1.4 Ajustement et comparaison des modèles

L'ajustement des différents modèles a été réalisé par les procédures REG et MODEL du logiciel statistique SAS.

Le choix de la meilleure fonction pour chaque type de relation a été basé sur le test de signification des paramètres de chaque modèle et la comparaison des valeurs du coefficient de détermination (R^2) et de l'écart-type résiduel ($RMSE$).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$$

V.1.5 Choix de l'âge d'exploitabilité

L'âge d'exploitabilité correspond au point où les courbes d'accroissement annuel courant (AAC) et d'accroissement annuel moyen (AAM) se croisent, marquant ainsi le maximum de ce dernier. Il sert à déterminer la révolution des peuplements équiennes dans l'aménagement forestier classique. L'utilisation de cette révolution permet de maximiser la production du bois par hectare (Clutter *et al.*, 1983 ; Davis et Johnson, 1987 ; Davis *et al.*, 2001 in Sghaier et Ammari, 2012).

En France, selon Neveux *et al.* (1986), le diamètre d'exploitation fixé à 40 cm pour les zones de fertilité moyenne à bonne, correspond à un âge voisin de 80 ans.

En Tunisie l'âge d'exploitabilité est considéré à un diamètre moyen de 30 cm. Ce dernier est atteint entre 80 et 120 ans, soit 100 ans en moyenne (Chakroun, 1986).

En Algérie, l'âge moyen d'exploitabilité des peuplements matures de pin d'Alep est fixé à 80 ans, où les arbres atteignent un diamètre compris entre 30 et 45 cm, et leur croissance en hauteur commence à décliner significativement (Bentouati, 2006).

V.2 Résultats

V.2.1 Caractéristiques dendrométriques des placettes

Les caractéristiques dendrométriques des 60 placettes échantillonnées et utilisées pour construire les tables de production sont illustrées dans le tableau V.2.

Tableau V.2. Statistiques descriptives des variables dendrométriques mesurées et calculées pour les 60 placettes temporaires échantillonnées.

Variable	Min	Max	Moy	E.T
Âge (années)	50	171	122,26	25,69
N (arbres/ha)	132	693	289	142,04
D_g (cm)	14	49	31	7,99
H_d (m)	11	18	14,69	1,52
D₀ (cm)	23,8	85,3	59,93	13,79
I₀ (m)	10,79	18,11	13,60	1,47
vbf (m³/ha)	40,92	207,28	123,06	38,64

N: densité (nombre d'arbres par hectare), **D_g** : diamètre moyen quadratique (cm), **H_d** : hauteur dominante (m) ; **D₀** diamètre maximal (cm), **I₀** : indice de site, **vbf** : volume bois fort (m³/ha).

V.2.2 Courbes d'indices de site et classes de productivité

A partir du modèle (M6) dérivé de la fonction de Lundqvist-Korf (formulation GADA), exprimant la productivité de la station, les peuplements de la pinède de Beni Imloul ont été répartis en trois classes de productivité d'une amplitude de 2,5 m, ayant les indices de site de 16,5 m, 14 m et 11,5 m respectivement.

V.2.3 Modèles ajustés indépendants de l'âge et de la productivité de la station

Les résultats d'ajustement des fonctions exprimant les relations de description des peuplements sont présentés dans le tableau V.3. Ces fonctions permettent de simuler les paramètres dendrométriques et de calculer les accroissements nécessaires pour élaborer les tables de production, pour la sylviculture observée ainsi que pour la sylviculture proposée.

Tableau V.3. Les fonctions (sous modèles) ajustées et retenues.

N°	Relation	Fonction retenue	R ²	RMSE
F1	$H_m = f(H_d)$	$H_m = 0,954 \times H_d$	0,547	1,193
F6	$D_g = f(N, H_d, H_m)$	$D_g = 21,926 \times H_d^{0,969} \times N^{-0,41}$	0,783	3,785
F10	$V = f(N, H_d, H_m, D_g, G)$	$V = 2,6E - 04 \times N^{0,961} \times D_g^{2,12} \times H_d^{0,172}$	0,996	2,447
F14	$N = f(H_d, H_m, t)$	$N = \frac{10^4}{(1,814 + 0,026 \times H_d \times \sqrt{t})^2}$	0,367	114

V.2.4 Les relations exprimant la sylviculture et le choix du régime d'éclaircie

V.2.4.1 Table de production de sylviculture moyenne observée

L'établissement des tables de production de sylviculture moyenne observée se base sur la relation exprimant l'évolution de la densité. Parmi les fonctions ajustées c'est la fonction F14 qui a été retenue et utilisée pour le calcul des différentes caractéristiques dendrométriques ainsi que le volume total et les accroissements pour cette table (Tableau V.3).

L'application du système d'équations ajusté (M6, F1, F6, F10 et F14) nous a permis de dresser le tableau V.4 décrivant la sylviculture moyenne observée. Cette table présente l'état des peuplements avant et après éclaircie, le volume des éclaircies, le volume total et les accroissements en volume.

Chapitre. V Tables de production et sylviculture du pin d'Alep

Tableau V.4. Table de production pour le pin d'Alep dans la pinède de Beni Imloul : sylviculture observée.

I ₀	Âge	Avant éclaircie					Éclaircie			Après éclaircie			Accroissements			
		H _d	H _m	N	D _g	G	V	N _e	V _e	V _{e,c}	N	D _g	V	V _t	AAM	AAC
16,5	10	1,32	1,26	2706	1,12	0,27	0,70	830	0,22	0,22	1875	1,30	0,67	0,90	0,09	*
	20	4,26	4,06	1875	4,06	2,43	9,13	595	3,03	3,25	1280	4,75	8,81	12,07	0,60	1,12
	30	6,89	6,57	1280	7,57	5,76	25,70	363	7,66	10,91	917	8,68	24,92	35,83	1,19	2,38
	40	9,05	8,63	917	11,31	9,21	45,79	227	11,95	22,85	690	12,70	44,60	67,46	1,69	3,16
	50	10,83	10,34	690	15,12	12,40	66,59	149	15,23	38,08	542	16,70	65,12	103,19	2,06	3,57
	60	12,33	11,76	542	18,93	15,25	86,82	103	17,53	55,61	439	20,63	85,16	140,77	2,35	3,76
	70	13,60	12,97	439	22,69	17,76	105,96	74	19,06	74,66	365	24,47	104,18	178,84	2,55	3,81
	80	14,70	14,02	365	26,38	19,97	123,82	55	20,01	94,68	310	28,20	121,98	216,65	2,71	3,78
	90	15,65	14,93	310	29,98	21,92	140,39	42	20,56	115,23	268	31,82	138,52	253,75	2,82	3,71
	100	16,5	15,74	268	33,49	23,64	155,74	33	20,81	136,04	235	35,34	153,86	289,90	2,90	3,61
	110	17,25	16,46	235	36,91	25,18	169,94	27	20,85	156,89	209	38,76	168,08	324,97	2,95	3,51
	120	17,93	17,11	209	40,24	26,55	183,11	22	20,75	177,63	187	42,08	181,27	358,91	2,99	3,39
	130	18,54	17,69	187	43,48	27,78	195,33	18	20,54	198,18	169	45,31	193,52	391,70	3,01	3,28
	140	19,10	18,22	169	46,63	28,88	206,69	15	20,27	218,45	154	48,46	204,92	423,37	3,02	3,17
	150	19,61	18,71	154	49,71	29,89	217,28	13	19,95	238,39	141	51,51	215,55	453,94	3,03	3,06
	160	20,08	19,15	141	52,70	30,80	227,17	*	*	*	*	*	*	*	*	*
14	10	1,01	0,97	2778	0,86	0,16	0,39	735	0,11	0,11	2043	0,98	0,38	0,48	0,05	*
	20	3,43	3,27	2043	3,18	1,62	5,67	584	1,70	1,81	1459	3,65	5,50	7,31	0,37	0,68
	30	5,65	5,39	1459	5,92	4,01	16,72	382	4,61	6,42	1077	6,70	16,26	22,67	0,76	1,54
	40	7,50	7,15	1077	8,82	6,59	30,58	249	7,50	13,92	828	9,83	29,85	43,77	1,09	2,11
	50	9,04	8,63	828	11,78	9,02	45,27	169	9,83	23,74	659	12,94	44,33	68,07	1,36	2,43
	60	10,34	9,87	659	14,74	11,24	59,78	119	11,54	35,28	540	15,99	58,69	93,97	1,57	2,59
	70	11,45	10,92	540	17,65	13,21	73,65	87	12,74	48,02	453	18,97	72,47	120,49	1,72	2,65
	80	12,41	11,84	453	20,52	14,96	86,71	66	13,54	61,56	387	21,88	85,47	147,03	1,84	2,65
	90	13,25	12,65	387	23,31	16,52	98,92	51	14,04	75,61	336	24,70	97,65	173,25	1,93	2,62
	100	14	13,36	336	26,04	17,91	110,29	40	14,33	89,93	296	27,44	109,00	198,94	1,99	2,57
	110	14,67	13,99	296	28,70	19,15	120,87	33	14,46	104,39	263	30,10	119,58	223,97	2,04	2,50
	120	15,26	14,56	263	31,29	20,26	130,71	27	14,47	118,86	237	32,69	129,43	248,29	2,07	2,43
	130	15,80	15,08	237	33,82	21,26	139,88	22	14,40	133,25	215	35,21	138,61	271,87	2,09	2,36
	140	16,30	15,55	215	36,28	22,17	148,43	19	14,27	147,52	196	37,66	147,18	294,71	2,11	2,28
	150	16,75	15,98	196	38,68	23,00	156,42	16	14,09	161,61	180	40,05	155,20	316,81	2,11	2,21
	160	17,17	16,38	180	41,02	23,75	163,90	14	13,89	175,51	166	42,38	162,7	338,21	2,11	2,14
170	17,55	16,74	166	43,3	24,43	170,92	12	13,67	189,18	154	44,65	169,74	358,92	2,11	2,07	
180	17,91	17,08	154	45,53	25,06	177,51	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
11,5	10	0,73	0,70	2847	0,62	0,09	0,19	621	0,04	0,04	2226	0,69	0,18	0,23	0,02	*
	20	2,63	2,51	2226	2,37	0,98	3,17	554	0,83	0,88	1671	2,67	3,09	3,96	0,20	0,37
	30	4,44	4,23	1671	4,43	2,58	9,90	393	2,46	3,34	1278	4,95	9,66	13,00	0,43	0,90
	40	5,98	5,70	1278	6,60	4,37	18,75	271	4,22	7,56	1007	7,28	18,34	25,90	0,65	1,29
	50	7,27	6,94	1007	8,80	6,13	28,38	191	5,73	13,29	816	9,59	27,83	41,13	0,82	1,52
	60	8,37	7,99	816	11,00	7,75	38,08	138	6,91	20,21	678	11,87	37,44	57,64	0,96	1,65
	70	9,32	8,89	678	13,16	9,22	47,50	103	7,78	27,99	575	14,08	46,78	74,77	1,07	1,71
	80	10,14	9,67	575	15,29	10,55	56,47	79	8,40	36,39	495	16,25	55,70	92,10	1,15	1,73
	90	10,86	10,36	495	17,37	11,74	64,93	62	8,83	45,22	433	18,35	64,13	109,35	1,21	1,73
	100	11,5	10,97	433	19,40	12,80	72,86	50	9,10	54,32	384	20,39	72,05	126,37	1,26	1,70
	110	12,07	11,52	384	21,37	13,76	80,29	41	9,26	63,58	343	22,38	79,47	143,05	1,30	1,67
	120	12,59	12,01	343	23,30	14,63	87,24	34	9,34	72,92	309	24,31	86,42	159,34	1,33	1,63
	130	13,06	12,46	309	25,19	15,41	93,74	28	9,36	82,28	281	26,19	92,92	175,20	1,35	1,59
	140	13,49	12,87	281	27,02	16,13	99,84	24	9,32	91,60	257	28,02	99,02	190,62	1,36	1,54
	150	13,88	13,24	257	28,81	16,78	105,55	20	9,26	100,86	237	29,81	104,75	205,61	1,37	1,50
	160	14,24	13,59	237	30,56	17,38	110,92	18	9,17	110,02	219	31,55	110,12	220,15	1,38	1,45
170	14,57	13,90	219	32,27	17,92	115,96	14	8,93	128,01	190	34,91	119,95	247,96	1,38	1,37	
180	14,88	14,2	204	33,93	18,43	120,71	12	8,8	136,82	178	36,53	124,45	261,26	1,38	1,33	
190	15,17	14,48	190	35,57	18,89	125,2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

Les indications liées au tableau ci-dessus (Tableau IV.4) sont les suivantes : I_0 : Indice de site, H_d : Hauteur dominante, H_m : Hauteur moyenne, N : Densité (arbres/ha), D_g : Diamètre moyen quadratique, G : Surface terrière (m^2/ha), V : Volume total (m^3/ha), N_e : Effectif de l'éclaircie, V_e : Volume de l'éclaircie, $V_{e.c}$: Volume cumulé de l'éclaircie, V_t : Volume total depuis l'origine, AAM : Accroissement annuel moyen ($m^3/ha/an$), AAC : Accroissement annuel courant ($m^3/ha/an$).

V.2.4.2 Table de production de la sylviculture proposée

Partant du même principe pour l'élaboration des tables de production pour la sylviculture moyenne observée, l'établissement de la table de production de la sylviculture proposée repose sur le calcul de l'indice d'espacement d'Hart-Becking (S) en plus du système des fonctions (M6, F1, F6 et F10).

En considérant les trois points essentiels pour le choix de l'indice (S) et afin de garder la densité entre 700 et 900 arbres/ha, à l'âge de 20 à 30 ans, les indices d'espacement de 54, 62 et 75 ont été appliqués sur les classes de fertilité 1, 2 et 3 respectivement, et ce à partir de l'âge de 30 ans.

Pour l'évolution de la densité, nous avons appliqué la fonction F14 pour estimer ce paramètre à l'âge de 10-20 ans, puis la fonction suivante de Hart-Becking à partir de 30 ans :

$$N = \left(\frac{10^4}{S \times H_d} \right)^2$$

Où : N est le nombre d'arbres à l'hectare, S est l'indice d'espacement d'Hart-Becking et H_d est la hauteur dominante (m).

Chapitre. V Tables de production et sylviculture du pin d'Alep

Tableau V.5. Table de production pour le pin d'Alep dans la pinède de Beni Imloul : sylviculture proposée.

I ₀ Âge	Avant éclaircie						Éclaircie			Après éclaircie			Accroissements		
	H _d	H _m	N	D _g	G	V	N _e	V _e	V _{e.c}	N	D _g	V	V _t	AAM	AAC
10	1,32	1,26	2706	1,12	0,27	0,70	830	0,22	0,22	1875	1,30	0,67	0,90	0,09	*
20	4,26	4,06	1875	4,06	2,43	9,13	1152	5,72	5,94	723	6,00	8,36	14,30	0,72	1,34
30	6,89	6,57	723	9,56	5,20	24,38	304	10,61	16,55	419	11,97	23,19	39,74	1,32	2,54
40	9,05	8,63	419	15,59	8,00	42,60	127	13,49	30,04	292	18,07	41,21	71,25	1,78	3,15
50	10,83	10,34	292	21,51	10,62	61,52	67	14,83	44,87	226	23,92	60,07	104,94	2,10	3,37
60	12,33	11,76	226	27,11	13,02	80,10	40	15,26	60,13	185	29,38	78,66	138,79	2,31	3,38
70	13,60	12,97	185	32,31	15,21	97,87	27	15,16	75,29	159	34,44	96,48	171,77	2,45	3,30
80	14,70	14,02	159	37,12	17,19	114,67	19	14,77	90,06	140	39,10	113,35	203,41	2,54	3,16
90	15,65	14,93	140	41,56	18,99	130,46	14	14,24	104,30	126	43,40	129,20	233,50	2,59	3,01
16,5 100	16,50	15,74	126	45,67	20,63	145,26	11	13,65	117,95	115	47,37	144,07	262,02	2,62	2,85
110	17,25	16,46	115	49,46	22,14	159,13	9	13,03	130,98	107	51,05	158,00	288,98	2,63	2,70
120	17,93	17,11	107	52,99	23,52	172,13	7	12,42	143,39	100	54,47	171,07	314,46	2,62	2,55
130	18,54	17,69	100	56,27	24,80	184,34	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	1,01	0,97	2778	0,86	0,16	0,39	735	0,11	0,11	2043	0,98	0,38	0,48	0,05	*
20	3,43	3,27	2043	3,18	1,62	5,67	1227	3,47	3,58	816	4,63	5,21	8,79	0,44	0,83
30	5,65	5,39	816	7,51	3,61	15,85	354	7,09	10,67	463	9,48	15,04	25,71	0,86	1,69
40	7,50	7,15	463	12,48	5,66	28,29	144	9,24	19,91	318	14,55	27,34	47,24	1,18	2,15
50	9,04	8,63	318	17,44	7,60	41,46	75	10,33	30,23	243	19,47	40,44	70,68	1,41	2,34
60	10,34	9,87	243	22,17	9,39	54,54	45	10,74	40,97	198	24,10	53,52	94,50	1,57	2,38
70	11,45	10,92	198	26,61	11,03	67,17	30	10,76	51,74	169	28,43	66,18	117,92	1,68	2,34
80	12,41	11,84	169	30,74	12,53	79,19	21	10,56	62,30	148	32,44	78,24	140,54	1,76	2,26
90	13,25	12,65	148	34,57	13,90	90,55	15	10,24	72,54	133	36,15	89,64	162,18	1,80	2,16
14 100	14,00	13,36	133	38,12	15,15	101,24	12	9,85	82,39	121	39,60	100,38	182,78	1,83	2,06
110	14,67	13,99	121	41	16,30	111,31	9	9,44	91,84	112	42,80	110,49	202,33	1,84	1,96
120	15,26	14,56	112	44,49	17,36	120,78	8	9,03	100,86	104	45,78	120,00	220,87	1,84	1,85
130	15,80	15,08	104	47,35	18,34	129,69	*	*	*	*	*	*	*	*	*
10	0,73	0,70	2847	0,62	0,09	0,19	621	0,04	0,04	2226	0,69	0,18	0,23	0,02	*
20	2,63	2,51	2226	2,37	0,98	3,17	1323	1,92	1,97	903	3,43	2,92	4,88	0,24	0,47
30	4,44	4,23	903	5,71	2,31	9,36	405	4,33	6,30	498	7,28	8,86	15,15	0,51	1,03
40	5,98	5,70	498	9,72	3,69	17,19	161	5,82	12,12	336	11,41	16,58	28,70	0,72	1,35
50	7,27	6,94	336	13,80	5,03	25,65	83	6,65	18,77	254	15,49	25,00	43,76	0,88	1,51
60	8,37	7,99	254	17,76	6,28	34,20	49	7,02	25,78	205	19,38	33,53	59,31	0,99	1,56
70	9,32	8,89	205	21,50	7,44	42,54	32	7,11	32,89	173	23,04	41,89	74,78	1,07	1,55
80	10,14	9,67	173	25,01	8,50	50,56	22	7,04	39,93	151	26,46	49,92	89,85	1,12	1,51
90	10,86	10,36	151	28,28	9,47	58,19	16	6,87	46,80	134	29,65	57,58	104,37	1,16	1,45
11,5 100	11,50	10,97	134	31,34	10,37	65,42	12	6,65	53,45	122	32,62	64,83	118,28	1,18	1,39
110	12,07	11,52	122	34	11,20	72,25	10	6,40	59,85	112	35,39	71,69	131,54	1,20	1,33
120	12,59	12,01	112	36,85	11,96	78,71	8	6,15	66,00	104	37,97	78,18	144,18	1,20	1,26
130	13,06	12,46	104	39,34	12,67	84,81	7	5,89	71,89	98	40,4	84,31	156,2	1,20	1,20
140	13,49	12,87	98	41,68	13,33	90,58	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Le coefficient k pour la sylviculture proposée est de l'ordre de 0,1 au niveau de toutes les classes de productivité, ce qui indique une éclaircie par le bas.

V.2.5 Effet de la sylviculture sur la productivité du pin d'Alep

La figure V.I présente l'évolution du diamètre moyen quadratique (D_g) et du volume total (V_t) en fonction de l'âge pour les trois classes de productivité et selon le type de sylviculture.

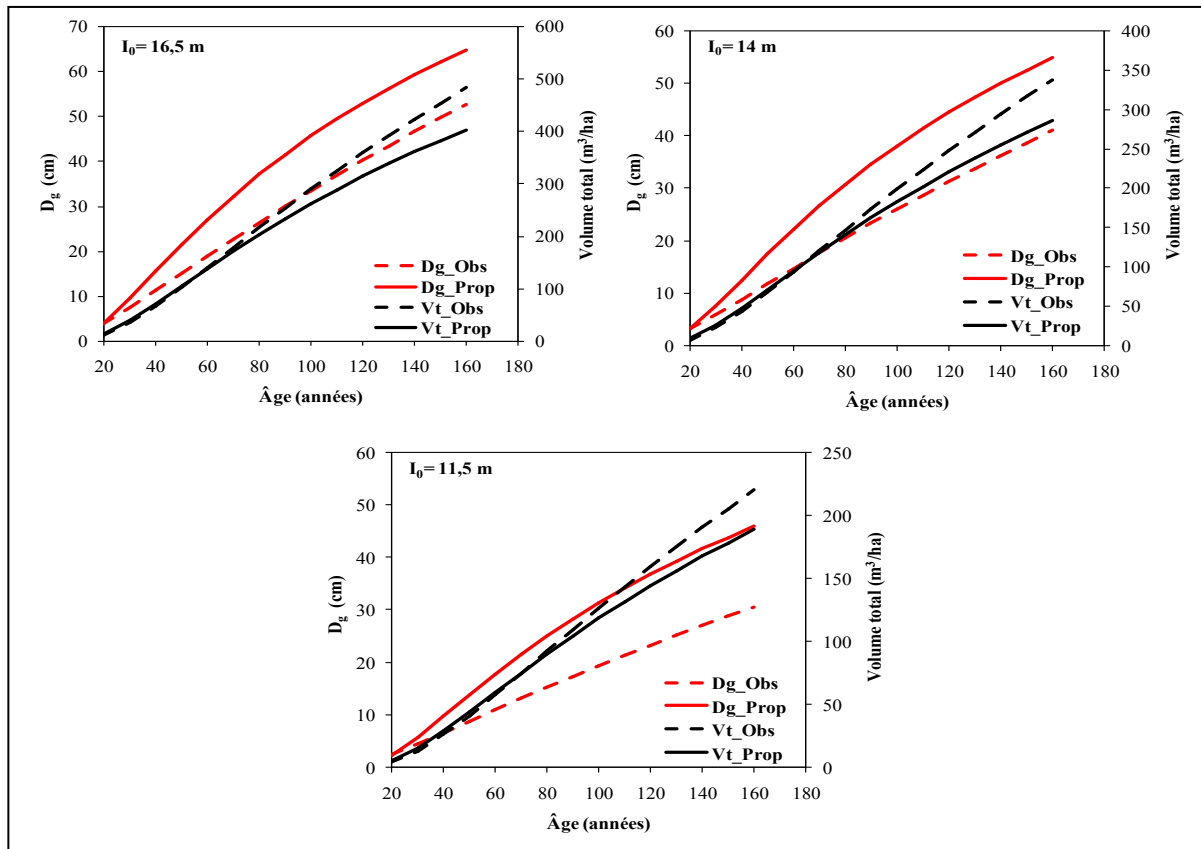


Figure V.1. Évolution du diamètre moyen quadratique (D_g) et du volume total (V_t) du pin d'Alep dans les trois classes de productivité pour la sylviculture observée (Obs) et la sylviculture proposée (Prop).

Pour toutes les classes de productivité, le diamètre moyen quadratique obtenu par la sylviculture proposée est supérieur à celui observé avec un écart très important qui augmente avec l'âge. Pour la sylviculture proposée, un diamètre moyen quadratique de 50 cm n'est atteint que pour la classe 1 vers 150 à 160 ans, alors que cette dimension est atteinte à des âges plus précoces pour la sylviculture proposée ; vers 110 ans.

Cependant, les volumes totaux sont presque de la même grandeur, avec une légère supériorité pour les volumes de la sylviculture observée, à partir de 80 ans.

V.2.6 Densité des peuplements pour les deux types de sylviculture

La figure V.2 montre l'évolution de la densité en fonction de l'âge avant et après éclaircie, pour les deux types de sylvicultures et les différentes classes de productivité. A partir de cette figure et du tableau V.4, la densité pour la sylviculture moyenne observée est forte, avec une densité initiale entre de 2700 et 2800 arbres/ha, même après l'éclaircie le nombre n'a pas vraiment diminué.

Pour la sylviculture proposée, après l'application de l'indice d'espacement, le nombre d'arbres à l'hectare a diminué d'une façon significative ; en gardant une densité entre 700 et 900 arbres/ha à l'âge de 30 ans, la densité atteinte à 80 ans est d'une moyenne de 160 arbres/ha pour toutes les classes de productivité.

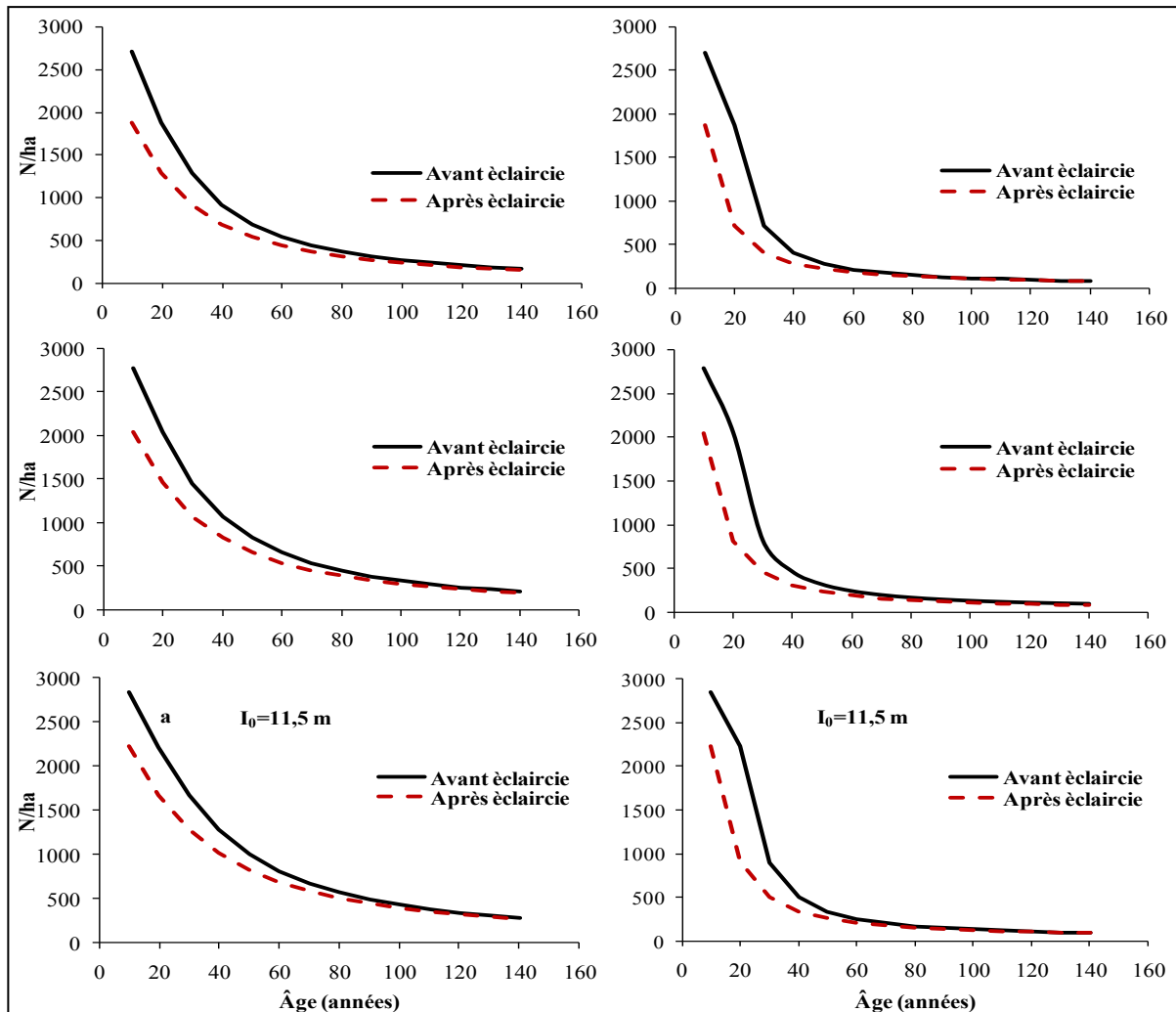


Figure V.2. Évolution du nombre d'arbres en fonction de l'âge (avant et après éclaircie) pour les trois classes de productivité selon les deux types de sylviculture (a : observée, b : proposée).

V.2.7 Accroissement et productivité du pin d'Alep

Les accroissements annuels moyens (AAM) et courants (AAC) en fonction de l'âge, obtenus pour la sylviculture moyenne observée et proposée, pour les trois classes de productivité sont présentés dans la figure V.3.

D'après les graphiques de la figure V.3, on constate que l'accroissement annuel courant (AAC) passe rapidement par un maximum puis retombe assez vite, cependant la courbe de l'accroissement annuel moyen atteint le maximum lentement pour se stabiliser par la suite. Les deux courbes se croisent quand l'accroissement annuel moyen est maximum.

D'après le tableau V.4 et la figure V.3, pour la sylviculture observée l'accroissement annuel moyen (AAM) atteint son maximum à différents âges selon les classes de fertilité ; à l'âge de 150 ans pour la 1^{ère} classe, 170 ans pour la 2^{ème} classe, et 180 ans pour la troisième, alors que pour la sylviculture proposée ce maximum est atteint entre 110 et 130 ans selon la classe de fertilité.

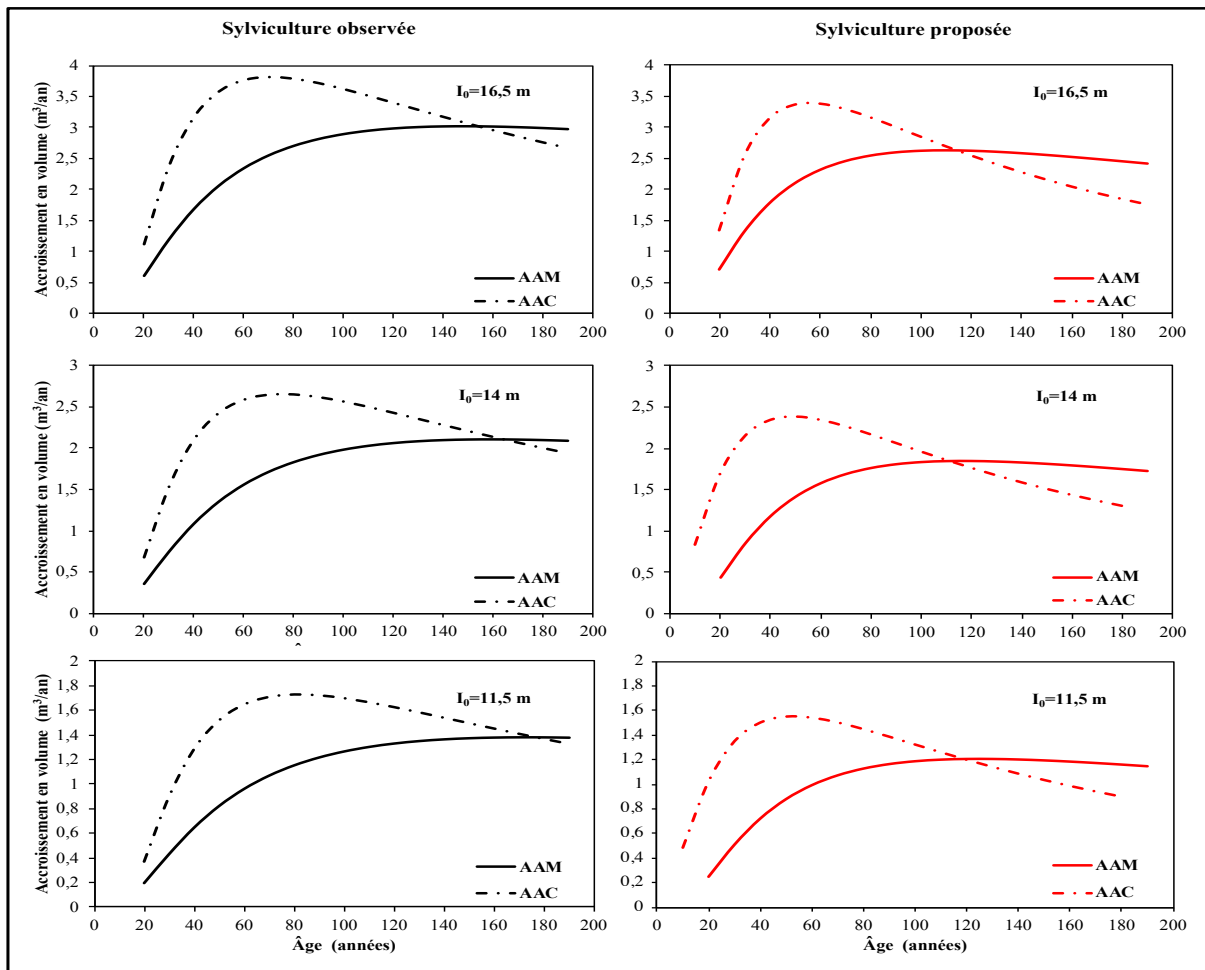


Figure V.3. Accroissement annuel moyen (AAM) et accroissement annuel courant (AAC) des trois classes de productivité du pin d'Alep de Beni Imloul pour la sylviculture moyenne observée, et la sylviculture proposée.

V.2.8 Choix de l'âge d'exploitabilité

Pour déterminer l'âge d'exploitabilité optimal des peuplements de pin d'Alep dans la pinède de Beni Imloul, nous avons considéré deux critères : la convergence entre l'accroissement annuel moyen (AAM) et l'accroissement annuel courant (AAC), en volume, qui se situe entre 110 et 130 ans pour la sylviculture proposée, et un diamètre moyen d'exploitabilité qui dépasse 30 cm.

Sur la base de ces éléments, nous avons jugé judicieux de fixer un âge d'exploitabilité de 110 ans pour les deux premières classes et 120 ans pour la troisième classe (intersection des deux courbes d'accroissements). Ces âges correspondent à des diamètres quadratiques moyens de 49,46 cm, 41 cm et 36,85 cm et des accroissements annuels moyens de l'ordre de 2,63 m³/ha/an, 1,84 m³/ha/an et 1,2 m³/ha/an selon les classes de fertilité (Tableau V.5).

V.3 Discussion

L'application de l'indice de Hart-Becking (S) pour doser les éclaircies a engendré une augmentation des grosseurs des tiges, cependant la production totale finale en volume des peuplements reste sensiblement la même. D'après Pardé (1961), l'intensité de l'éclaircie, qu'elle soit plus ou moins importante, n'a pas d'impact significatif sur la quantité finale de bois produite. En revanche elle influence considérablement la qualité du bois (dimension des tiges).

La forte densité des peuplements à l'état observé est due à l'absence des traitements sylvicoles. La densité diminue peu avec l'âge, car la mortalité naturelle et quelques coupes irrégulières sont les seuls facteurs qui la régulent (Rabhi *et al.*, 2023). D'après Bentouati (2006), cette espèce n'a pas fait l'objet d'une sylviculture ambitieuse en Algérie, à cause du rôle principal de protection des forêts de pin d'Alep et le maintien de l'équilibre des milieux déjà assez fragiles.

Le dosage des éclaircies par l'utilisation de l'indice de Hart-Becking (sylviculture proposée) a permis de diminuer la densité des arbres d'une manière remarquable. A l'âge de 80 ans, on arrive à des valeurs de l'ordre de 159, 169 et 173 arbres par hectare contre 365, 453 et 575 arbres par hectare à l'état observée pour les classes de fertilité 1, 2 et 3, respectivement. Ces résultats corroborent avec ceux obtenus par Pardé (1961) qui indique une densité de 150 arbres au même âge. Selon le même auteur, cette faible densité peut être expliquée par les besoins importants en lumière du pin d'Alep. Cela permet aussi l'installation des semis naturels avant la fin de la révolution, ce qui est souhaitable pour ce type de forêt où une régénération naturelle complète nécessite généralement plusieurs années.

Quant au choix de l'âge d'exploitabilité, il revient à plusieurs considérations dont les plus importantes sont liées au rythme de croissance du pin d'Alep. Selon Bedel (1986), la croissance et la fertilité du pin d'Alep se ralentissent à partir de 80 ans, à celui-là il rajoute le risque de la pourriture de cœur. Douheret (1992) signale que le pin d'Alep commence souvent à dépérir vers 100 à 110 ans, les semenciers ne disposent que de très peu de graines fertiles au-delà de 80 ans. En tenant compte de ces différentes contraintes et afin d'assurer une bonne régénération naturelle et d'exploiter au maximum un bois de bonne qualité, bien que l'accroissement maximal est situé entre 110 et 120 ans (selon la classe de productivité), un âge moyen de 100 ans peut être adopté pour toute classe de productivité confondue.

En France, Neveux *et al.* (1986), ont signalé un diamètre d'exploitabilité de 40 cm atteint à 80 ans, dans les zones de fertilité moyenne à bonne, ce qui est proche de nos résultats où le même diamètre est atteint entre 90 et 100 ans pour la 1^{ère} classe de productivité.

En Tunisie, Chakroun (1986) considère l'âge d'exploitabilité pour un diamètre moyen de 30 cm atteint entre 80 et 120 ans (soit 100 ans en moyenne). Pour les peuplements de Beni Imloul, ce diamètre est atteint entre 70 et 100 ans selon les classes de fertilité. Cependant Sghaier et Ammari (2012) ont choisi un âge d'exploitabilité de 80 ans.

Dans l'Aurès algérien, pour le massif de Ouled Yaâgoub et des Beni Oudjana, Bentouati (2006), a choisi un âge d'exploitabilité selon la qualité de la station, qui se situe entre 70 et 90 ans et qui correspond à un diamètre d'exploitabilité de 35 à 45 cm. Dans une étude plus récente sur ce même massif, menée par Rabhi *et al.* (2023), l'âge d'exploitabilité utilisé est de 70 ans, ce qui correspond à un accroissement annuel moyen maximum pour des diamètres situés entre 35 et 54 cm.

Pour ce qui est des éclaircies, le but est d'améliorer la structure des peuplements forestiers en croissance. Les études qui ont montré l'avantage de cette pratique sont nombreuses ; d'une part sur l'amélioration de la disponibilité de l'eau pour les arbres (Breda *et al.*, 1995 ; Ducrey et Huc, 1999, Jiménez *et al.*, 2008) et d'autre part sur la diminution de l'ampleur et la durée du stress hydrique (Aussenac, 1987). Il a été prouvé aussi que l'éclaircie améliore la résistance des arbres à la sécheresse, au moins à court terme (dans les 5 ans suivant l'éclaircie) (Donner et Running, 1986 ; Misson *et al.*, 2003 cités par Jaouadi *et al.*, 2019).

En termes de productivité, le pin d'Alep est connu par sa faible capacité de production dans le pourtour méditerranéen. De nombreuses études ont été consacrées à cet aspect. D'après Pardé (1957), la production de cette espèce en France peut varier de 1,5 m³/ha/an dans les stations de fertilité les plus faibles jusqu'à 4 m³/ha/an sur des stations de fertilité

exceptionnelle à l'âge de 75 ans. Selon le même auteur, en Italie, des valeurs de production de 4 m³/ha/an sur terrain fertile et profond (Pavaré, 1954) et entre 5 et 6 m³/ha/an (Magini, 1955) ont été signalées.

En Espagne, Montero *et al.* (2001) rapportent un accroissement maximum allant de 1,4 à 4 m³/ha/an pour quatre classes de productivité.

En Afrique du Nord, selon Boudy (1950), la productivité du pin d'Alep varie de 0,5 à 4 m³/ha/an. Dans la forêt tunisienne, elle est de 4 m³/ha/an dans les meilleures stations (Chakroun, 1986). D'après les résultats de Sghaier et Ammari (2012), l'accroissement annuel moyen peut atteindre un maximum de 3,33 m³/ha/an à 50 ans, 1,97 m³/ha/an entre 60 et 70 ans, et 0,85 m³/ha/an à un âge de 100 et plus, pour les classes de bonne, moyenne et faible productivité, respectivement.

En Algérie, dans la région de l'Aurès, précisément dans le massif de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana, le maximum de production oscille entre 4,4 m³/ha/an et 1,4 m³/ha/an entre 70 et 80 ans (Bentouati, 2006). Cependant, pour le même peuplement les résultats de Rabhi *et al.* (2023) montrent des accroissements maximaux de 7,1 m³/ha/an, 5 m³/ha/an et 3,2 m³/ha/an pour respectivement des hauteurs de 19,5 m, 16,5 m et 13,5 m, à un âge de 70 ans.

Les résultats de la sylviculture proposée dans cette étude ont été comparés à ceux obtenus en Espagne, en Tunisie et en Algérie (Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana) (Tableau V.6). Il est à noter que les résultats cités pour les peuplements de l'Espagne sont issus d'une éclaircie modérée pour toutes les classes d'âges.

Le tableau ci-dessous présente le diamètre moyen quadratique (D_g), la densité (N), la hauteur dominante (H_d), le volume total (V_t), ainsi que l'accroissement annuel moyen (AAM) en volume pour les différentes classes de productivité à l'âge de 80 ans. D'après le tableau V.6, la croissance en hauteur dominante pour le peuplement en question est similaire à celle obtenue pour les peuplements tunisiens, avec une légère supériorité pour ces derniers pour les deux premières classes de productivité. Pour la 3^{ème} classe de productivité on remarque une supériorité pour les peuplements de Beni Imloul, cependant l'écart est très important avec les peuplements de l'Espagne et de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana, il est d'une moyenne de 5 m.

Les peuplements de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana, présentent les diamètres moyens quadratiques les plus élevés. Concernant la densité, ce sont les peuplements espagnols qui présentent les valeurs les plus élevées, alors que les peuplements de Beni Imloul correspondent aux valeurs les plus faibles et cela pour toutes les classes de productivité.

Quant au potentiel productif, les peuplements de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana, d'Espagne suivis par ceux de la Tunisie sont considérés comme les plus productifs par rapport au peuplement de Beni Imloul.

On remarque que la 1^{ère} et la 2^{ème} classe de productivité de 20 m à 20,7 m et 17 m à 17,5 m sont absentes au niveau des peuplements tunisiens et celui de Beni Imloul.

Tableau V.6. Comparaison de la production du pin d'Alep dans la pinède de Beni Imloul avec les résultats obtenus pour la même espèce en Espagne, Tunisie et Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana (âge de comparaison = 80 ans).

Origine	Caractéristiques dendrométriques	Classe de fertilité			
		1	2	3	4
Espagne (Montero et al., 2000)	D _g	37,5	29,6	23,1	18
	N	294	464	684	862
	H _d	20	17	14	11
	V _t	293,6	237,6	185,7	113,8
	AAM	3,7	3	2,3	1,4
Tunisie (Sghaier et Ammari, 2012)	D _g	37,77	34,96	31,71	/
	N	248	201	149	/
	H _d	15,9	12,8	9,6	/
	V _t	250,9	142,2	66,3	/
	AAM	3,14	1,78	0,83	/
Algérie (Bentouati, 2006)	D _g	50,9	42,5	34	25,5
	N	169	197	237	300
	H _d	20,7	17,5	14,2	10,9
	V _t	350,1	264	184,3	107,5
	AAM	4,4	3,3	2,3	1,3
Beni Imloul	D _g	37,12	30,74	25,01	/
	N	159	169	173	/
	H _d	14,7	12,41	10,14	/
	V _t	203,41	140,54	89,85	/
	AAM	2,54	1,76	1,12	/

Pour la pinède de Beni Imloul, le volume total de la 1^{ère} classe de productivité se situe entre la 1^{ère} et la 2^{ème} classe des peuplements tunisiens, et entre la 2^{ème} et la 3^{ème} classe pour les deux peuplements de Ouled Yaâgoub et d'Espagne.

Cependant le volume total au niveau de la 2^{ème} classe est situé entre la 2^{ème} et la 3^{ème} classe pour les peuplements tunisiens et entre la 3^{ème} et la 4^{ème} classe pour les peuplements de Ouled Yaâgoub et ceux d'Espagne.

La dernière et la 3^{ème} classe, peut être situé entre la 2^{ème} et la 3^{ème} classe de productivité pour la Tunisie. Concernant les peuplements d'Espagne et de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana bien que la hauteur dominante soit proche à celle du peuplement des Beni Imloul, le volume total de ce dernier est inférieur.

La faible productivité observée pour la pinède de Beni Imloul est due essentiellement aux conditions environnementales spécifiques de cette pinède. Les peuplements de Ouled Yaâgoub et des Beni Oudjana en majorité se situent dans l'étage bioclimatique sub-humide à hiver froid avec une exposition nord et nord-ouest, bénéficiant d'un meilleur apport hydrique (Bentouati, 2006). En revanche, la pinède de Beni Imloul est située dans un étage semi-aride.

Selon Brochiero (1999), le faible rendement des peuplements de pin d'Alep peut être attribué à de nombreux facteurs stationnels qui ont une liaison significative avec la croissance en hauteur :

- Le bilan hydrique stationnel : il semble être comme un facteur déterminant. Les études menées en régions méditerranéennes confirment ce lien direct, un bilan hydrique élevé est synonyme de bonne fertilité.
- L'exposition : les expositions intermédiaires favorisent la croissance du pin d'Alep, tandis que les expositions très chaudes limitent son développement.
- La texture du sol : les sols à texture équilibrée contenant du sable, limon et argile sont les plus favorables. Les limons purs ou des argiles lourdes sont les sols les moins favorables, les sols sableux, très filtrants, entraînent de faibles croissances.

Malgré son intérêt écologique et la grande surface qu'il occupe en Algérie, le pin d'Alep n'a pas été correctement valorisé sur le plan productif, même si les premiers travaux sylvicoles ont été faits, ils n'ont pas été poursuivis. Selon Bentouati (2006), le régime de la futaie régulière est le plus adopté dans les aménagements du pin d'Alep en Algérie à cause de la simplicité de son application. Il permet d'obtenir sur de grandes surfaces des peuplements sensiblement équiennes, de délimiter la surface à régénérer et de maintenir un rendement soutenu du produit exploité, mais il exige un état normal de la forêt impliquant des fois des sacrifices au niveau des jeunes peuplements.

En outre, Bentouati (2006) recommande le régime de la futaie jardinée par bouquets, avec un étage dominant de pin d'Alep et un taillis de chêne vert. Ce régime qui favorise la régénération naturelle et protège les jeunes semis, a été appliqué en France malgré qu'il limite le pâturage qui est très important dans certaines régions.

D'après Neveux *et al.* (1986), le type de peuplement de futaie régulière quoiqu'il ne soit pas le plus courant il est le plus favorable pour le pin d'Alep en termes de production de bois. Il maintient un couvert régulier et suffisamment dense et limite la croissance excessive du sous-bois.

Conclusion

Les résultats obtenus dans ce chapitre peuvent être considérés comme un ajout aux études de la productivité des peuplements du pin d'Alep dans la région des Aurès, fournissant ainsi des outils variés et très utiles pour la gestion des peuplements de la pinède de Beni Imloul.

A partir du modèle de croissance en hauteur dominante (M6), et les sous-modèles retenus (F1, F6 et F10), ajustés sur les données collectées au niveau des placettes échantillonnées, nous avons pu établir deux types de tables de production, la première pour une sylviculture moyenne observée qui repose sur la densité des peuplements en utilisant la fonction de densité (F14), et une deuxième pour une sylviculture proposée basée sur le dosage des éclaircies par l'indice d'espacement de Hart-Becking (S).

Ces deux tables présentent l'évolution dans le temps des caractéristiques dendrométriques du peuplement principal (avant et après éclaircie) et accessoire ainsi que la production totale en volume (V_t), les accroissements annuels moyens et courants (AAM et AAC) pour le peuplement total, et cela pour les trois classes de productivité définies préalablement selon la hauteur dominante à l'âge de référence de 100 ans.

L'utilisation de l'indice d'espacement de Hart-Becking pour le dosage des éclaircies a montré que son effet est plutôt qualitatif que quantitatif, il peut conduire à la production des tiges de bonne qualité, ainsi que le maintien d'une densité équilibrée.

L'accroissement annuel maximal est atteint selon les classes de productivité entre 110 et 120 ans selon la sylviculture proposée.

L'âge d'exploitabilité fixé à 100 ans permet une valorisation des arbres avant leur dépérissement et assurer une régénération naturelle convenable.

Bien que la place importante occupée par cette essence en Algérie du point de vue superficie et intérêt écologique, sa sylviculture présente encore de nombreuses interrogations et un défi pour les gestionnaires forestiers. Il est impératif de donner une grande importance à sa sylviculture et le suivi de son évolution dans le temps.

Il est à signaler que les tables de production élaborées dans le cadre de cette étude, doivent être utilisées avec prudence en dehors de cette zone d'étude, aussi il serait utile d'accompagner les tables de production par un tableau de répartition des tiges par catégories de grosseur.

Conclusion générale

Conclusion générale

Vu le peu de travaux sur la croissance et la production du pin d'Alep dans le massif de Beni Imloul en Algérie, la présente étude qui avait comme objectif principal l'élaboration des outils d'aide à la décision pour la gestion et l'aménagement des peuplements forestiers, vient pallier cet état de déficience, en fournissant aux gestionnaires forestiers différents modèles et tables fort utiles.

Au terme de cette étude, différents modèles (équations mathématiques) ont été ajustés et comparés sur la base des critères statistiques et graphiques basés essentiellement sur l'étude des résidus, afin d'en choisir les plus adéquats. Les principaux résultats obtenus dans cette étude peuvent être synthétisés comme suit :

Les premiers outils développés en matière d'estimation des volumes sont les deux types de tarifs de cubage à savoir les tarifs de cubage globaux à une et à deux entrées, et les tarifs de cubage marchands. Pour les tarifs de cubage globaux, l'application d'un poids de pondération ($w_i = 1/Di^4$) sur les fonctions testées a conduit à une amélioration au niveau de la précision des estimations, en particulier pour les arbres de petits diamètres. Ce sont les fonctions pondérées (F3) et (F7) qui ont été retenues pour le tarif de cubage à une et à deux entrées respectivement. Présentant un coefficient de variation un peu élevé (22,43%), les tarifs à une entrée sont d'une application simple et facile sur le terrain, ils sont généralement utilisés dans le cadre des programmes d'aménagements. Les tarifs à deux entrées ; nécessitant plus d'une mesure sur le terrain, sont considérés comme plus précis avec un coefficient de variation de l'ordre de 16 %. Ces derniers sont appliqués pour la commercialisation du bois sur pieds. Ayant l'avantage de prédire le volume à n'importe quelle découpe, les tarifs marchands sont considérés comme des outils les plus efficaces pour calculer la répartition du bois et ainsi de déterminer la valeur et l'utilisation appropriée des grumes des arbres dans la production et l'industrie.

Pour décrire la dynamique de la croissance en hauteur dominante, à partir des analyses de tige de 30 arbres, c'est l'équation dérivée de la fonction de Lundqvist-Korf sous la forme (GADA : l'approche en différences algébriques généralisées) qui a été retenue (M6).

En se référant à la littérature et le calcul de l'erreur relatif (RE%), l'âge de référence a été fixé à 100 ans. Ainsi l'indice de site a été obtenu en appliquant cet âge de référence dans le modèle (M6) et des courbes de productivité pour la pinède de Beni Imloul ont été dressées.

Les courbes établies qui expriment l'évolution de la hauteur dominante en fonction de l'âge passent par les hauteurs 16,5 m, 14 m et 11,5 m à l'âge de référence fixé à 100 ans et correspondent au potentiel de production des trois classes de fertilité identifiées.

Les placettes échantillonnées dans le cadre de cette étude ont été classées en fonction de l'indice de site (I_0) et du volume bois fort (vbf). Selon cet indice (I_0), 53 % des placettes se trouvent dans la deuxième classe, 32 % dans la troisième classe alors que la première classe ne renferme que 9 placettes, représentant ainsi 15% des placettes échantillonnées.

En se basant sur le modèle d'indice de site et des sous-modèles élaborés, des tables de production pour une sylviculture observée et une autre proposée ont été développées. Selon la table de production élaborée pour la sylviculture observée où la densité est exprimée par la formule (F14), il en ressort que l'accroissement annuel moyen (AAM) maximum est atteint à différents âges selon les classes de productivité. Cet accroissement est atteint vers l'âge de 150 ans pour la première classe et à des âges plus tardifs pour les classes de moyenne à mauvaise fertilité.

L'application de l'indice d'espacement de Hart-Becking (S) pour élaborer la table de production pour la sylviculture proposée a montré une diminution importante de la densité, ce qui conduit à une augmentation des diamètres et une diminution de l'âge d'exploitabilité. Pour la sylviculture proposée, cet âge est situé entre 110 et 130 ans pour les trois classes de productivité. En prenant en considération l'âge d'exploitabilité donné par la table de sylviculture proposée, et celui utilisé pour la même espèce et cité dans les travaux précédents, l'âge d'exploitabilité pour la pinède de Beni Imloul peut être fixé à 100 ans, afin d'éviter la détérioration des arbres sur pieds.

Il est à noter que pour la pinède de Beni Imloul, mis à part les travaux réalisés dans le cadre d'aménagement, le modèle de croissance élaboré par Kherchouche *et al.* (2011 ; 2024), les tarifs de cubage globaux et marchands ainsi que les tables de production pour les deux types de sylviculture sont les premiers en leur genre.

Les tables de production pour la sylviculture observée et la sylviculture proposée développées dans le cadre de cette étude constitueront des outils indispensables qui facilitent aux gestionnaires forestiers le choix de la nature, la période et l'intensité des interventions sylvicoles à réaliser selon les objectifs de gestion et d'aménagement des peuplements de pin d'Alep de Beni-Imloul. Finalement, il est à signaler que c'est au gestionnaire forestier que revient le choix de l'intensité de la sylviculture à appliquer. En plus des différents objectifs fixés, il doit prendre en considération les caractéristiques écologiques du milieu de la croissance du peuplement (Montero *et al.*, 2000).

La comparaison des résultats obtenus dans le cadre de notre étude avec ceux obtenus en Algérie et dans d'autres pays du pourtour méditerranéen ; que ce soit pour l'estimation des volumes, la croissance en hauteur dominante ou pour la productivité et les accroissements, nous a permis de positionner la pinède de Beni Imloul, objet de cette étude. A ce sujet et en ce qui concerne les tarifs de cubage globaux à une entrée, les volumes de la pinède de Beni-Imloul sont supérieurs à l'ensemble des tarifs marocains, et inférieurs à ceux obtenus par le tarif tunisien qui inclut le volume des branches. Pour les tarifs à deux entrées, ce sont les tarifs marocain et espagnol qui se sont avérés les plus proches du notre.

Quant aux courbes de croissance en hauteur dominante, la comparaison des courbes obtenues dans cette étude avec celles obtenues pour Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana (Bentouati, 2006) et Beni Imloul (Kherchouche *et al.*, 2024) a montré une concordance jusqu'à 120 ans, au-delà les courbes de Beni Imloul continuent à augmenter. Les courbes d'Espagne montrent une supériorité jusqu'à 100 ans, puis elles tendent vers la stabilité, alors que celles des Beni Imloul continuent à augmenter.

Les volumes totaux obtenus à l'âge de 80 ans et cela pour la sylviculture moyenne observée, ont montré une supériorité de productivité des peuplements de Ouled Yaâgoub et Beni Oudjana, d'Espagne et de la Tunisie par rapport au peuplement de Beni Imloul, et cela revient à plusieurs considérations.

En tenant compte de l'intervalle des diamètres, des hauteurs et des âges de l'échantillon qui a servi à l'élaboration de ces outils de gestion, il paraît judicieux de les utiliser avec prudence en dehors de ces limites. Les tarifs de cubage et les tables de production peuvent être utilisés pour des diamètres allant de 15 à 80 cm et des hauteurs de 9 à 23 m, cependant les modèles de croissance en hauteur dominante doivent être appliqués à des peuplements dépassant l'âge de 20 ans.

A la lumière des résultats obtenus dans cette étude, nous pouvons juger que l'accroissement et la productivité au niveau des peuplements du pin d'Alep de Beni Imloul, sont assez acceptables, et rentrent dans le rang des valeurs évoquées dans la littérature, tout en signalant que cette pinède mérite d'être prise en considération dans les plans futurs de gestion et d'aménagement.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdessemed, K. (1981). Le Cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* manetti) dans les massifs de l'Aurès et du Belezma. Étude phytosociologique problèmes de conservation et d'aménagements. Thèse - doc - Ing Université Aix Marseille, 199 p.
- Aissi A., (2019). Le chêne zéen à petites feuilles (*Quercus faginea* Lamk.) dans l'Aurès : cartographie, écologie et taxinomie. Thèse de doctorat, département des Sciences Agronomiques, Université Batna 1, 91 p.
- Alaoui A., Laaribya S., Gmira N., (2011). Production, croissance et modèles de conduite sylvicoles des principales essences (le pin maritime et le pin d'Alep) de reboisement au Maroc. Kastamonu University, Journal of Forestry Faculty, 11 (1): 68-84.
<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/159639>
- Alder D., (1980). Estimation des volumes et accroissements des peuplements forestiers. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture Rome, 22 (2) : 226 p.
- Bedel J., (1986). Aménagement et gestion des peuplements de pin d'Alep dans la zone méditerranéenne française. CIHEAM, Options Méditerranéennes, 86 (1) : 109-125.
<https://om.ciheam.org/om/pdfs10/CI010857.pdf>
- Beghami Y., (2013). Écologie et dynamique de la végétation de l'Aurès : analyse spatio-temporelle et étude de la flore forestière et montagnarde. Thèse de Doctorat, Département d'Agronomie Université Batna 1, 193p.
- Belkhiri L., (1999). Influence de la formule de cubage et de la longueur du billon sur la détermination du volume des arbres abattus : élaboration d'un tarif de cubage par la formule de NEWTON-SIMPSON pour le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill) de la forêt de Beni-Imlou. Mémoire d'ingénieur, Université El-Hadj Lakhdar – Batna – Faculté des sciences, Département d'agronomie, Algérie, 66 p.
- Bensaid S., (1995). Bilan critique du barrage vert en Algérie. Sécheresse, 6 (3) : 247-255.
[https://www.researchgate.net/publication/277728694 Bilan critique du barrage vert en Algerie](https://www.researchgate.net/publication/277728694_Bilan_critique_du_barrage_vert_en_Algerie)
- Bentouati, A., Bariteau, M., (2005). Une sylviculture pour le Pin d'Alep des Aurès (Algérie). Forêt méditerranéenne, 26(4) : 315-321. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03564622>
- Bentouati A., (2006). Croissance, productivité et aménagement des forêts de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans le massif de Ouled-Yakoub (Khenchela-Aurès). Thèse de doctorat, Université El Hadj Lakhdar-Batna, Faculté des sciences, Département d'agronomie, Algérie, 116 p. <http://www.secheresse.info/spip.php?article12870>
- Bouchon J., (1988). Les tables de production et les modèles de croissance : un outil de diagnostic sylvicole. Revue Forestière Française, 40 (S) : 46-50. <https://hal.science/hal-03424788/document>
- Boudy, P., (1950). Guide du forestier en Afrique du Nord. Paris : Édition La Maison rustique. 505 p.
- Bouzekri A., (2015). Évaluation multicritère des situations critiques au risque de la désertification dans les Aurès (Algérie). Thèse de Doctorat, département des sciences de la terre et de l'univers, université Batna 1, 198 p.
- Brochiero F., Chandioix O., Ripert C., Vennetier M., (1999). Autécologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire. Forêt Méditerranéenne, 20 (2) : 83-94.
[https://www.researchgate.net/publication/277952505 Autecologie et croissance du pin d'Alep en Provence calcaire Autecology and height growth of Pinus halepensis Mill in Provence](https://www.researchgate.net/publication/277952505_Autecologie_et_croissance_du_pin_d%27Alep_en_Provence_calcaire_Autecology_and_height_growth_of_Pinus_halepensis_Mill_in_Provence)
- Burkhardt H.E., Tomé M., (2012). Modeling Forest Trees and Stands. Springer (eBook), 457 p.

- Cabanillas Saldaña A.M., (2010). Bases para la gestión de masas naturales de *pinus halepensis* Mill. en el valle Del Ebro. Thèse, Département D'ingénierie Forestière École Technique Supérieure D'ingénierie Forestière Université Polytechnique de Madrid. 199 p.
- Cailliez F., (1980). Estimation des volumes et accroissement des peuplements forestiers avec référence particulière aux forêts tropicales. vol. 1 - estimation des volumes. Étude FAO : forêts 22 (1) : 99 p.
- Chakroun M.L., (1986). Le pin d'Alep et le pin brutia dans la sylviculture méditerranéenne. CIHEAM, Options Méditerranéennes, 86 (1) : 25-27.
<https://om.ciheam.org/om/pdf/s10/CI010848.pdf>
- Cieszewski C.J., Bailey R.L., (2000). Generalized Algebraic Difference Approach: Theory Based Derivation of Dynamic Site Equations with Polymorphism and Variable Asymptotes. Forest Science, 46 (1): 116–126.
- Cieszewski C.J., (2001). Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. Canadian Journal of Forest Research, 31
https://www.researchgate.net/publication/237865764_Three_methods_of_deriving_advanced_dynamic_site_equations_demonstrated_on_inland_Douglas-fir_site_curves
- Cieszewski C.J., Strub M., (2008). Generalized Algebraic Difference Approach Derivation of Dynamic Site Equations with Polymorphism and Variable Asymptotes from Exponential and Logarithmic Functions. Forest Science, 54 (3); 303-315.
https://www.researchgate.net/publication/233655108_Generalized_Algebraic_Difference_Approach_Derivation_of_Dynamic_Site_Equations_with_Polymorphism_and_Variable_Asymptotes_from_Exponential_and_Logarithmic_Functions
- Couhert B., Duplat P., (1993). Le pin d'Alep. Rencontres forestiers-chercheurs en forêt méditerranéenne. La Grande-Motte (34), 6-7 octobre 1993. Ed. INRA, Paris 1993. (Les colloques n°63), 125-147.
- CTGREF, (1979). Informations techniques, cahier 36 (4), 5 p. <https://climatetoolbox.org/>
- Daoui A., Douet J., Marchel R., Zerizer A., (2007). Valorisation du bois de pin d'Alep pour déroulage : optimisation de son étuvage. Bois et Forêts des Tropiques, 294 (4) : 52-64.
http://bft.cirad.fr/cd/BFT_294_51-64.pdf
- Decourt N., (1964). Les tables de production : leurs limites et leur utilité. Revue Forestière Française ,8 (9) : 640- 657. https://hal.science/hal-03389899v1/file/RFF_1964_8-9_640.pdf
- Decourt N., (1972). Méthode utilisée pour la construction rapide de tables de production provisoires en France. Annales des Sciences Forestières, 29 (1) : 35-48.
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00882052/document>
- Decourt N., (1973). Production primaire, production utile : méthode d'évaluation, indice de productivité. Annales des Sciences forestières, 30 (3) : 219-238.
- Deleuze C., Morneau F., Renaud J.P., Vivien Y., Rivoire M., Santenoise P., et al. (2014). Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, 200 la station. Rendez-vous Techniques ONF, 44 : 22-32. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01143797/document>
- De Smith M.J., (2015). Statistical analysis handbook: A comprehensive handbook of statistical concepts, techniques and software tools. Free Tech Books, 99 p.
<https://www.statsref.com/StatsRefSample.pdf>
- Do Amaral Machado S., rodrigues da silva L.C., Figura M.A., Téó S.J., Geroni Mendes Nascimento R., (2010). Comparison of methods for estimating heights from complete stem analysis data for pinus taeda. Ciência Florestal, 20 (1): 45-56.
<https://www.scielo.br/j/cflo/a/5RWMSMnrG6rLWVKTLfsxZH/abstract/?lang=en>
- Douheret J., (1992). Pin d'Alep comment choisir une sylviculture ? Forêt méditerranéenne, 13 (3) : 216-219.

- Draper N.R., Smith H., (1981). Applied regression analysis. New York, Willey, 709 p.
- Elaieb M.T., Shel F., Elouellani S., Janah T., Rahouti M., Thevenon M.F., Candelier K., 2017. Physical, mechanical and natural durability properties of wood from reforestation *Pinus halepensis* Mill. in the Mediterranean Basin. *Bois et Forêts des Tropiques*, 331(1) : 19-31.
https://www.researchgate.net/publication/315100329_Physical_mechanical_and_natural_durability_properties_of_wood_from_reforestation_Pinus_halepensis_Mill_in_the_Mediterranean_Basin
- Essoussi I., Sghaier T., 2024. Développement des équations de volume total et des volumes à diamètre et longueur variables des grumes d'arbres individuels du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie. *Bois et Forêts des Tropiques*, 359 : 5-25. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.359.a37165>
- Filho A.M., Netto S.P., Machado S.A, Corte A P.D., Behling A., (2023). Site classification for *Eucalyptus* sp. in a tropical region of Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 95 (1) : 1-15. <https://www.scielo.br/j/aabc/a/39K6wL5K7JSgrsnD9yr3npz/?lang=en>
- Filion L., Cloutier C., Cournoyer L., (2010). Méthodes d'analyse dendroécologique (deuxième partie), in : Payette S., Filion L., La dendroécologie. Principes, méthodes et applications. Presses de l'Université Laval, Québec, 772 p.
- Fkiri S., Ghazghazi H., Baraket M., Chérif S., Khouja M.L., Naser Z., (2020). Caractérisation écophysiological de pin d'Alep en Tunisie. In : *Le Pin d'Alep en Tunisie : Écologie, Gestion et Usages* (Ouvrage collectif), chapitre 5, 115-130. https://medforest.net/wp-content/uploads/2020/06/Ouvrage-Pin-dAlep_INRGREF_2020.pdf
- Fonweban J.N., Houllier F., (1997). Tarifs de cubage et fonctions de défilement pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun. *Annales des Sciences Forestières*, 54 (6) : 513 - 528. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00883166/document>
- Goubi M., Bentouati A., Kherchouche D., Sghaier T., (2019). Tarifs et tables de cubage d'arbres individuels du pin d'Alep, *pinus halepensis* Mill., dans l'Aurès algérien. *Bois et forêts des tropiques*, 339 (1) : 45-59. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/31715>
- Jaouadi W., Naghmouchi S., Alsubeie M., (2019). Should the silviculture of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) stands in northern Africa be oriented towards wood or seed and cone production? Diagnosis and current potentiality. *iForest*, 12 (3): 297-305. <http://www.sisef.it/forest/contents/?id=ifor2965-012>
- Jiménez E., Vega J.A., Pérez-Gorostiaga P., Cuiñas P., Fonturbel T., Fernandez C., Madrigal J., Hernando C. & Gijarro M., (2008). Effects of precommercial thinning on transpiration in young post-fire maritime pine stands, *Forestry* 81(4): 543-557.
- Johnson F.A., Worthington N.P., (1963). Procedure for developing a site index estimating system from stem analysis data. Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 10 p.
- Kherchouche D., Bentouati A., Kaabeche M., (2011). Croissance et écologie du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans le massif des Beni Imloul (Aurès, Algérie). *Sècheresse*, 22 (1) :43-48. https://www.researchgate.net/publication/281450794_Croissance_et_ecologie_du_pin_d%27Alep_Pinus_halepensis_Mill_dans_le_massif_des_Beni-Imloul_Aures_Algerie
- Kherchouche D., Goubi M., Sghaier T., Bentouati A., Zeghichi K., Slimani S., (2024). Dominant height growth modeling of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Beni Imloul forest, northern Algeria. *Annals of Silvicultural Research*, 49(1): 28-38. <https://creajournals.crea.gov.it/ast/>

- Lakreb N., Sen U., Bezzazi B., Pereira H., (2022). The physicomechanical and thermal properties of Algerian Aleppo pine (*Pinus halepensis*) wood as a component of sandwich panels. *iForest*, 15(2): 106-111. <http://www.sisef.it/iforest/contents/?id=ifor3952-015>
- Langbour P., Gérard J., Guibal D., Mahlani K., (2011). Caractérisation technologique et valorisation en bois d'œuvre du pin d'Alep de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. *Forêt Méditerranéenne*, 32 (3) : 263-270. https://www.foret-mediterraneenne.org/upload/biblio/foret_med_2011_3_263-270.pdf
- Lima dos Santos M., Pereira Miguel E., Nappo M.E., de Souza H.J., Costa dos Santos C.R., Macedo Silva J.N., Trondoli Matricardi E.A., (2023). Approaches to Forest Site classification as an indicator of Teak volume production. *Forests*, 14 (8): 1-17. <https://www.mdpi.com/1999-4907/14/8/1613>
- Looney S.W., Gullledge T.R., (1985). Use of the Correlation Coefficient with Normal Probability Plots. *The American Statistician*, 39 (1): 75-79. https://www.researchgate.net/publication/239799316_Use_of_the_Correlation_Coefficient_with_Normal_Probability_Plots
- Mateus A., Tomé M., 2009. A dominant height growth model for eucalyptus plantations in Portugal. *Discussiones Mathematicae, Probability and Statistics* 29 (2) :155–168.
- Mezali, M., 2003. L'étude prospective du secteur forestier en Afrique (FOSA). Algérie. Troisième session du forum des Nations-Unies sur les forêts. 9 p.
- Montero G., Grau J.M., Ruiz-Peinado R., Ortega C., Cañellas I., (2000). Tablas de producción para pinus halepensis Mill. *Cuad. SOCo Esp. Cien. For.*, 10: 183-188. http://secforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernos_secf/article/view/9231
- Montero G., Cañellas I., Ruiz-Peinado R., (2001). Growth and Yield Models for Pinus halepensis Mill. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 10 (1): 179-201. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.918.9546&rep=rep1&type=pdf>
- Montibus M., (2016). Détermination de la durabilité et de l'imprégnabilité du Pin d'Alep. *Forêt Méditerranéenne*, 37 (2) : 151-156. https://www.foret-mediterraneenne.org/upload/biblio/foret_med_2016_2_151-156.pdf
- Morice E., Chartier F., (1954). *Méthode statistique* (2^{ème} vol.). Paris, Imprimerie Nationale, 555 p.
-
- Musset R., (1935). Les calculs relatifs aux régimes pluviométriques. Fraction pluviométrique, écart pluviométrique relatif, coefficient pluviométrique relatif. In : *Les Études rhodaniennes*. 11 (1) : 75-85. https://www.persee.fr/doc/geoca_1164-6268_1935_num_11_1_6461
- Nahal I., (1962). Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Étude taxonomique, phytogéographique, écologique et sylvicole. *Annales de l'École Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences Nancy*, 19 (4) : 477-688. <https://hal.science/hal-03483847>
- Neveux M., Duhén L.M., Corti J.M., Devallois P., Fontanel J.L., Boiseau P., (1986). Plaidoyer pour une sylviculture du pin d'Alep par les techniciens de terrain. *Forêt méditerranéenne*, 8 (1) : 13-18. <https://hal.science/hal-03554781/document>
- Palm R., (1981). Calcul et choix des équations de cubage d'arbres. *Bull. Rech. Agron. Gembloux*, 16 (4) : 351-370.
- Palm R., 1983. Précision des valeurs estimées à l'aide de tarif de cubage d'arbres. *Annales des Sciences Forestières*, 40 (3) : 199-308. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00882307/document>
- Palm R., (1986). Étude des résidus de régression : principes et application. *Faculté des Sciences agronomiques, Gembloux (Belgique)*, 13 p.

- Palm R., (1988). Les critères de validation des équations de régression linéaire. Notes de Statistique et d'Informatique, Faculté des Sciences Agronomiques Gembloux (Belgique), 88 (1) : 1-27. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/113726/1/88-1-CritValidEqRégLin.pdf>
- Palm R., (1989). Construction de tables de production à partir de placettes temporaires : présentation d'une méthode. Annales des Sciences Forestières, INRA/EDP Sciences, 46 (4) : 387-396. <https://hal.science/hal-00882487>
- Pardé J., (1957). La productivité des forêts de pin d'Alep en France. Annales de l'École Nationale des Eaux et Forêts et de la Station de Recherches et Expériences Forestières, 15 (2) : 367- 414. <https://hal.science/hal-03483769/document>
- Pardé J., (1961). Comment préciser l'intensité d'une éclaircie ? Revue Forestière Française, 8 (9): 551-557.
- Prégent G., Savard F., Désaulniers G., (2001). Tarif de cubage à diamètre et longueur variables d'utilisation pour le pin gris en plantation au Québec. Mémoire de recherche forestière. Direction de la recherche forestière, Forêt Québec, 41 p.
- Prévosto B., (2013). Le pin d'Alep en France 17 fiches pour connaître et gérer. Éditions Quae. 160 p.
- Quezel P., (1986). Les pins du groupe « halepensis » : Écologie, Végétation, Écophysologie. Options Méditerranéennes. Série Étude CIHEAM, 86 (1) : 11-24. <https://om.ciheam.org/om/pdf/s10/CI010847.pdf>
- Rabhi k., Bentouati A., Sghaier T., (2023). Effet de la sylviculture sur les potentialités de production du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans l'Aurès algérien. Établissement de tables de production pour deux itinéraires sylvicoles. Revue Forestière Française, 74 (1) : 45-61. <https://doi.org/10.20870/revforfr.2023.7413>
- Rameau J.C., Mansion D., Dumé G., Gauberville C., Bardat J., Bruno É., Keller R., (2008). Flore forestière française, guide écologique illustré 3, région méditerranéenne. Institut pour le développement forestier, ministère de l'agriculture et de la pêche Agro Paris Tech_ENGREF, direction générale de la forêt et des affaires rurales, inventaire forestier national, 2432 p.
- Raulier F., Lambert M.C., Pothier D., Ung C.H., 2003. Impact of dominant tree dynamics on site index curves. Forest Ecology and Management, 184 (1-3): 65-78. https://www.researchgate.net/publication/222299423_Impact_of_dominant_tree_dynamics_on_site_index_curves
- Rojo-Alboreca A., Cabanillas-Saldaña AM, Barrio-Anta A., Notivol-Paino E., Gorgoso-Varela JJ., (2017). Site index curves for natural Aleppo pine forests in the central Ebro valley (Spain). Madera y Bosques, 23 (1): 143-159. https://www.researchgate.net/publication/316738867_Site_index_curves_for_natural_Aleppo_pine_forests_in_the_central_Ebro_valley_Spain
- Rondeux J., (1977). Estimation de la productivité forestière : Principe et méthodes. Annales de Gembloux,83:(5-17). [https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/62149/1/Ann.Gemb.1977.83\(1\).pp.5-17.pdf](https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/62149/1/Ann.Gemb.1977.83(1).pp.5-17.pdf)
- Rondeux J., (1993). La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les presses agronomiques de Gembloux, 521 p.
- Rondeux J., Laurent C., Thibaut A., (2014). Construction d'une table de production pour le douglas [*pseudotsuga menziesii* (mirb.) franco] en Belgique. Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux, 3 : 21 p. https://www.researchgate.net/publication/237805636_Construction_d%27une_table_de_production_pour_le_douglas_Pseudotsuga_Menziesii_MIRB_FRANCO_en_Belgique

- Rojo-Alboreca A., Cabanillas-Saldaña M.A., Barrio-Anta M., Notivol-Paino M., Gorgoso-Varela J.J., (2017). Site index curves for natural Aleppo pine forests in the central Ebro valley (Spain). *Madera y Bosques*, 23 (1): 143-159.
<https://www.researchgate.net/publication/316738867> Site index curves for natural Aleppo pine forests in the central Ebro valley Spain
- Ryan T.A., Joiner B.L., (1976). Normal probability plots and tests for normality. Pennsylvania State University, USA, 12 p.
<https://www.additive-net.de/de/component/jdownloads/send/70-support/236-normal-probability-plots-and-tests-for-normality-thomas-a-ryan-jr-bryan-l-joiner>
- SAS Institute Inc., (2004 a). SAS/STAT 9.1 User's Guide. Cary, NC, USA, SAS Institute Inc, 5121p.
https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc_91/stat_ug_7313.pdf
- SAS Institute Inc., (2004b). SAS/ETS 9.1 User's Guide. Cary, NC, USA, SAS Institute Inc, 2416 p. (48)
- Sánchez-González M., Tomé M., Montero G., (2005). Modelling height and diameter growth of dominant cork oak trees in Spain. *Annals of Forest Science*, 62 (7): 633-643.
<https://www.afs-journal.org/articles/forest/abs/2005/07/f5074/f5074.html>
- Sánchez-González M., Cañellas I., Montero G., (2007). Generalized height-diameter and crown diameter prediction models for cork oak forests in Spain. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 16 (1): 76-88.
<https://www.researchgate.net/publication/28251727> Generalized height-diameter and crown diameter prediction models for cork oak forests in Spain
- Schoenenberger A., (1970). Étude du couvert forestier de l'Aurès oriental, catalogue des espèces vasculaires, inventaire des espèces pastorales. Projet Algérie 15 aménagement et développement forestiers. 82 P.
- Sghaier T., Ammari Y., Garchi S., (2008). Étude et choix d'équations de cubage d'arbres pour le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Revue de l'INAT*, 23 (2) : 199-225.
<https://www.researchgate.net/publication/259286015> ETUDE ET CHOIX D'EQUATIONS DE CUBAGE D'ARBRES POUR LE PIN D'ALEP *Pinus halepensis* Mill EN TUNISIE
- Sghaier T., Garchi S., (2009). Modélisation de la croissance en hauteur dominante et fertilité des peuplements de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Ecologia Mediterranea* 35 : 49-63.
<https://www.researchgate.net/profile/Sghaier-Tahar/publication/259284865> Modelisation de la croissance en hauteur dominante et fertilité des peuplements de pin d'Alep *Pinus halepensis* Mill en Tunisie - Dominant height growth modelling and fertility of Aleppo pine *Pinus halepensis* Mill in Tunisia
<https://www.researchgate.net/publication/259284865> Modelisation-de-la-croissance-en-hauteur-dominante-et-fertilite-des-peuplements-de-pin-dAlep-Pinus-halepensis-Mill-en-Tunisie-Dominant-height-growth-modelling-and-fertility-of-Aleppo-pine-Pinus-halepensis-Mill-en-Tunisie
- Sghaier T., Ammari Y., (2012). Croissance et production du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Écologia méditerranéenne*, 38 (1) : 39 – 57.
<https://www.researchgate.net/publication/259284590> Croissance et production du pin d'Alep *Pinus halepensis* Mill en Tunisie - Growth and production of Aleppo pine *Pinus halepensis* Mill in Tunisia
- Sghaier T., Palahi M., Garchi S., Bonet J.A., Ammari Y., Pique M., (2012). Modeling Dominant Height Growth in Planted *Pinus pinea* Stands in Northwest of Tunisia. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2012/902381>

- Sghaier T., Garchi S., Ammari Y., (2013). Tables de cubage les plantations du pin pignon (*Pinus pinea*) du Nord- Ouest de la Tunisie. Annales de la Recherche Forestière au Maroc, 42 : 157-170. <https://www.researchgate.net/publication/275031477> Tables de cubage pour les plantations du pin pignon *Pinus pinea* du Nord-Ouest de la Tunisie
- Sghaier T., (2016). Techniques de modélisation de la croissance en hauteur dominante et indice de site des peuplements forestiers, une illustration. 60 p. <https://www.researchgate.net/publication/381111296> Sghaier T 2016 - Techniques de modélisation de la croissance en hauteur dominante et indice de site des peuplements forestiers Une illustration
- Sghaier T., Clautriaux J.J., Ammari Y., Othmani H., (2019). Effect of the substrates used for forest seedlings production on the survival and growth of trees in a reforestation site in North-West of Tunisia. International journal of tropical geology, geography and ecology, 43 (1): 145-160. <https://www.researchgate.net/publication/333045242> Effect of the substrates used for forest seedlings production on the survival and growth of trees in a reforestation site in North-West of Tunisia
- Sghaier T., Garchi S., Azizi T., (2020). Modélisation de la croissance et de la production du liège en Tunisie. Bois et Forêts des Tropiques, 346 (4) : 3-20. <https://www.researchgate.net/publication/348807288> Modelisation de la croissance et de la production du liège en Tunisie
- Sghaier T., Ammari Y., (2022). Ajustement d'un système d'équations de volumes marchands pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie. Bois et Forêts des Tropiques, 354 (4) : 19-39. <https://www.researchgate.net/publication/275031477> Tables de cubage pour les plantations du pin pignon *Pinus pinea* du Nord-Ouest de la Tunisie
- Teissier Du Cros E., (1992). Introduction du thème "Écologie Botanique" des journées pin d'Alep. Forêt Méditerranéenne, 8 (3) : 152-154. <https://hal.science/hal-03557143>
- Vennetier M., Ripert C., Chandioix O., Estève R., (2010). Évaluation de la croissance du Pin d'Alep en région méditerranéenne française. Revue Forestière Française, 62 (5): 1-17.
- Weiskittel A.R., Hann DW, Kershaw J.A, Vanclay J.K., (2011). Forest Growth and Yield Modeling. Wiley-Blackwell, A John Wiley & Sons, Ltd publications, 415 p.
- Zeghichi K., Kherchouche D., Bentouati A., Sghaier T., Belkhiri L., (2023). Ajustements de tarifs de cubage du bois fort pour la gestion de peuplements de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans la forêt de Beni Imloul en Algérie. Bois et Forêt des Tropiques, 357 (3) : 29-42. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/36958>

Annexes

Annexes

Annexe 1. Table de cubage de volumes marchands bois fort (bf) des grumes d'arbres de pin d'Alep : Diamètre fin-bout $d_{ij} = 30$ cm.

Classe DBH	DBH	Hi (m) vh _i (m ³)	Hauteur totale des arbres (m)									
			4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
20-30	25	h _{ij}	*	*	*	*	0,19	0,81	1,48	2,19	2,94	3,73
		vh _{ij}	*	*	*	*	0,047	0,055	0,063	0,071	0,079	0,088
30-40	35	h _{ij}	*	0,43	1,15	1,96	2,83	3,75	4,72	5,72	6,75	7,81
		vh _{ij}	*	0,081	0,108	0,136	0,164	0,192	0,220	0,248	0,276	0,305
40-50	45	h _{ij}	0,56	1,39	2,33	3,34	4,40	5,51	6,65	7,83	9,03	10,25
		vh _{ij}	0,116	0,175	0,235	0,296	0,356	0,417	0,478	0,540	0,601	0,663
50-60	55	h _{ij}	1,04	2,03	3,12	4,27	5,47	6,70	7,96	9,25	10,56	11,89
		vh _{ij}	0,202	0,305	0,410	0,515	0,620	0,726	0,832	0,939	1,046	1,153
60-70	65	h _{ij}	1,39	2,50	3,70	4,94	6,24	7,56	8,91	10,28	11,67	13,08
		vh _{ij}	0,309	0,468	0,628	0,788	0,950	1,112	1,275	1,438	1,602	1,766
70-80	75	h _{ij}	1,65	2,86	4,13	5,46	6,82	8,21	9,63	11,07	12,52	13,99
		vh _{ij}	0,436	0,661	0,887	1,114	1,343	1,572	1,802	2,033	2,264	2,496
80-90	85	h _{ij}	1,86	3,14	4,48	5,87	7,29	8,73	10,20	11,69	13,19	14,71
		vh _{ij}	0,583	0,883	1,186	1,490	1,795	2,102	2,410	2,718	3,027	3,337
90-100	95	h _{ij}	2,03	3,37	4,76	6,20	7,66	9,15	10,66	12,19	13,73	15,29
		vh _{ij}	0,749	1,134	1,522	1,913	2,305	2,699	3,094	3,490	3,887	4,285

Annexe 2. Table de cubage de volumes marchands bois fort (bf) des grumes d'arbres de pin d'Alep : Diamètre fin-bout $d_{ij} = 40$ cm.

Classe DBH	DBH	Hi (m) vhi (m ³)	Hauteur totale des arbres (m)									
			4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
30-40	35	h _{ij}	*	*	*	*	*	0,15	0,75	1,40	2,09	2,82
		vh _{ij}	*	*	*	*	*	0,087	0,100	0,112	0,125	0,138
40-50	45	h _{ij}	*	*	0,33	1,00	1,73	2,53	3,37	4,25	5,17	6,11
		vh _{ij}	*	*	0,134	0,168	0,202	0,237	0,271	0,306	0,341	0,376
50-60	55	h _{ij}	*	0,64	1,41	2,26	3,17	4,13	5,14	6,17	7,24	8,33
		vh _{ij}	*	0,198	0,265	0,333	0,402	0,470	0,539	0,608	0,677	0,747
60-70	65	h _{ij}	0,47	1,27	2,18	3,17	4,21	5,29	6,42	7,57	8,74	9,94
		vh _{ij}	0,218	0,330	0,443	0,557	0,671	0,786	0,901	1,016	1,132	1,248
70-80	75	h _{ij}	0,83	1,75	2,77	3,86	5,00	6,18	7,39	8,63	9,89	11,17
		vh _{ij}	0,327	0,496	0,665	0,836	1,008	1,180	1,352	1,525	1,699	1,873
80-90	85	h _{ij}	1,11	2,13	3,24	4,41	5,63	6,88	8,16	9,47	10,80	12,14
		vh _{ij}	0,458	0,693	0,930	1,168	1,408	1,648	1,889	2,131	2,374	2,617
90-100	95	h _{ij}	1,34	2,44	3,62	4,86	6,14	7,45	8,79	10,15	11,53	12,93
		vh _{ij}	0,607	0,920	1,234	1,551	1,869	2,188	2,508	2,830	3,152	3,475

Annexe 3. Table de cubage de volumes marchands bois fort (bf) des grumes d'arbres de pin d'Alep : Diamètre fin-bout $d_{ij} = 50$ cm.

Classe DBH	DBH	Hi (m) vhi (m ³)	Hauteur totale des arbres (m)										
			4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	
40-50	45	h _{ij}	*	*	*	*	*	*	*	*	0,63	1,27	1,93
		vh _{ij}	*	*	*	*	*	*	*	*	0,151	0,169	0,186
50-60	55	h _{ij}	*	*	*	0,22	0,84	1,53	2,28	3,06	3,88	4,74	
		vh _{ij}	*	*	*	0,195	0,234	0,274	0,315	0,355	0,395	0,436	
60-70	65	h _{ij}	*	*	0,65	1,37	2,16	3,00	3,89	4,82	5,78	6,77	
		vh _{ij}	*	*	0,288	0,362	0,436	0,511	0,585	0,660	0,735	0,811	
70-80	75	h _{ij}	*	0,63	1,40	2,25	3,16	4,12	5,13	6,16	7,23	8,32	
		vh _{ij}	*	0,347	0,466	0,585	0,705	0,826	0,947	1,068	1,190	1,311	
80-90	85	h _{ij}	0,35	1,12	1,99	2,94	3,95	5,01	6,10	7,22	8,37	9,55	
		vh _{ij}	0,338	0,512	0,688	0,864	1,041	1,219	1,397	1,576	1,756	1,935	
90-100	95	h _{ij}	0,64	1,51	2,47	3,51	4,60	5,73	6,89	8,09	9,30	10,54	
		vh _{ij}	0,468	0,709	0,952	1,196	1,441	1,687	1,934	2,181	2,430	2,679	