

# 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

**Khedidja ZEGHICHI<sup>1,2</sup>**  
**Dalila KHERCHOUCHE<sup>1</sup>**  
**Abdallah BENTOUATI<sup>1</sup>**  
**Tahar SGHAIER<sup>3</sup>**  
**Laid BELKHIRI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Université Batna 1  
Institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques  
Département des sciences agronomiques  
Route de Biskra, 05000 Batna  
Algérie

<sup>2</sup> Université Batna 1  
Laboratoire d'amélioration des productions agricoles et protection des ressources en zones arides (LAPAPEZA)  
Route de Biskra, 05000 Batna  
Algérie

<sup>3</sup> Université de Carthage  
Institut national de recherches en génie rural, eaux et forêts (INRGREF)  
Laboratoire d'écologie forestière  
Rue Hédi EL Karray EL Menzah IV  
BP 10, 2080 Ariana  
Tunisie

**Auteur correspondant /**  
**Corresponding author:**  
Khedidja ZEGHICHI –  
[khedidja.zeghichi@univ-batna.dz](mailto:khedidja.zeghichi@univ-batna.dz)

**ORCID :**  
<https://orcid.org/0009-0007-1122-2302>



**Photo 1.**  
Peuplement naturel de pin d'Alep faisant l'objet d'assiette de coupe dans la forêt de Beni Imloul.  
*Natural stand of Aleppo pine subject to cutting in the Beni Imloul forest.*  
Photo K. Zeghichi.

**Doi :** 10.19182/bft2023.357.a36958 – Droit d'auteur © 2023, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 22 juillet 2022 ; date d'acceptation : 14 avril 2023 ; date de publication : 1<sup>er</sup> octobre 2023.



Licence Creative Commons :  
Attribution - 4.0 International.  
Attribution-4.0 International (CC BY 4.0)

## Citer l'article / To cite the article

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 Forêts des Tropiques, 357 : 29-42. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2023.357.a36958>

## RÉSUMÉ

### 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

L'objectif du présent travail est d'établir des tarifs de cubage à une et deux entrées permettant d'estimer le volume bois fort de fûts de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) de la forêt de Beni Imloul en Algérie. Les données récoltées proviennent des analyses de 209 tiges représentatives des différentes classes de diamètre et de hauteur choisies dans la même forêt. Différentes fonctions linéaires et non linéaires ont été ajustées sans et avec pondération sur les données collectées. Le choix des fonctions les mieux adaptées repose principalement sur leur précision et sur l'étude numérique et graphique des résidus obtenus. Les deux fonctions non linéaires pondérées à une et à deux entrées retenues ont respectivement des précisions de l'ordre de 88 % et 94 % et des écarts-types résiduels de l'ordre de 0,192 et 0,137 m<sup>3</sup>. Des tables de cubage à une et à deux entrées ont été simulées à partir des fonctions retenues, avec des coefficients de variation de 22 % et de 16 % respectivement pour les tables à une et à deux entrées. Le tarif de cubage à deux entrées, plus précis, peut être utilisé pour des coupes finales, tandis que celui à une entrée peut l'être pour des interventions d'aménagements sylvicoles.

**Mots-clés :** *Pinus halepensis* Mill., tables de cubage, Beni Imloul, Aurès, Algérie.

## ABSTRACT

### Adjusting roundwood volume tables for the management of Aleppo Pine stands (*Pinus halepensis* Mill.) in the Beni Imloul forest in Algeria

This study aimed to establish single and double entry volume tables to estimate volumes of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Algeria's Beni Imloul forest. The data was collected from analyses of 209 stems selected as representative of the different diameter and height classes in the forest. Different linear and non-linear functions were adjusted to the data collected, without and with weighting. The most suitable functions were selected mainly on the basis of their accuracy and the numerical and graphic processing of the residuals obtained. Accuracies of the two weighted non-linear single and double entry functions selected were of the order of 88% and 94% respectively, with residual standard deviations of the order of 0.192 and 0.137 m<sup>3</sup>. Single and double entry volume tables were simulated using the functions selected, with coefficients of variation of 22% and 16% for the single entry and double entry tables respectively. The more accurate double entry table can be used for final felling, while the single entry table is suitable for silvicultural management operations.

**Keywords:** *Pinus halepensis* Mill., Beni Imloul, volume tables, Aurès, Algeria.

## RESUMEN

### Ajustes de tarifas de cubicación de la madera resistente para la gestión de poblaciones de pino de Alepo (*Pinus halepensis* Mill.) En el bosque de Beni Imloul en Argelia

El objetivo del presente trabajo es establecer tarifas de cubicación en tablas de una y dos entradas que permitan estimar el volumen de madera resistente de troncos de pino de Alepo (*Pinus halepensis* Mill.) del bosque de Beni Imloul en Argelia. Los datos recogidos provienen del análisis de 209 tallos representativos de diferentes clases de diámetro y de altura elegidas en el mismo bosque. Varias funciones lineales y no lineales se ajustaron sin y con ponderación a partir de los datos recogidos. La elección de las funciones mejor adaptadas se basa principalmente en su precisión y en el estudio numérico y gráfico de los residuos obtenidos. Las dos funciones no lineales ponderadas a una y a dos entradas retenidas tienen respectivamente precisiones del orden del 88 % y 94 % y desviaciones estándar residuales del orden de 0,192 y 0,137 m<sup>3</sup>. Se simularon tablas de cubicación de una y dos entradas a partir de las funciones retenidas con coeficientes de variación del 22 % y del 16 % respectivamente para las tablas de una y dos entradas. La tarifa de cubicación de dos entradas, más precisa, puede utilizarse para las talas finales, mientras que la de una entrada puede utilizarse para intervenciones de ordenación silvícola.

**Palabras clave:** *Pinus halepensis* Mill., Beni Imloul, tablas de cubicación, Aurès, Argelia.

## Introduction

Le pin d'Alep est une essence robuste et connue pour sa plasticité écologique. En Algérie, cette espèce est considérée comme la plus abondante avec 800 000 ha disponibles, soit 40 % de la surface forestière totale (Daoui *et al.*, 2007). Depuis 1968, elle a été largement utilisée dans les reboisements avec un taux d'utilisation de l'ordre de 86 % par rapport aux autres espèces présentes dans les différents programmes de reboisement (Bensaid, 1995).

D'après Bentouati (2006), les massifs forestiers de pin d'Alep dans l'Aurès algérien sont constitués le plus souvent de futaies adultes et vieillissantes, dépassant parfois l'âge d'exploitabilité. Le massif des Beni Imloul a une superficie d'environ 72 000 ha, et produit un volume de 40 000 m<sup>3</sup> par an, ce qui reflète un potentiel productif important qui nécessite l'élaboration d'outils adéquats pour l'estimation de la production et la gestion durable de ce massif, tels que les tarifs de cubage. Outre l'estimation du volume, le tarif de cubage peut constituer un outil d'évaluation des quantités de carbone stockées par les arbres.

Par définition, les tarifs de cubage sont considérés comme des outils d'estimation indirecte du volume des arbres sur pied. Deux types de tarifs de cubage peuvent être utilisés : (1) les tarifs nécessitant une seule mesure par arbre (tarifs à une entrée), exprimant le volume (V) d'un arbre en fonction d'un seul critère qui est le diamètre de la tige à hauteur de poitrine (DBH, à 1,30 m de hauteur) et se présentant sous la forme  $V = f(\text{DBH})$  ; (2) les tarifs nécessitant deux mesures par arbre (tarifs à deux entrées) qui font intervenir un facteur supplémentaire tel que la hauteur totale (H) de l'arbre et qui s'expriment sous la forme  $V = f(\text{DBH}, H)$ . Les tarifs à deux entrées sont plus précis que ceux à une entrée (Rondeux, 1993).

Une bonne connaissance de la croissance et de la productivité des peuplements de pin d'Alep permet d'as-

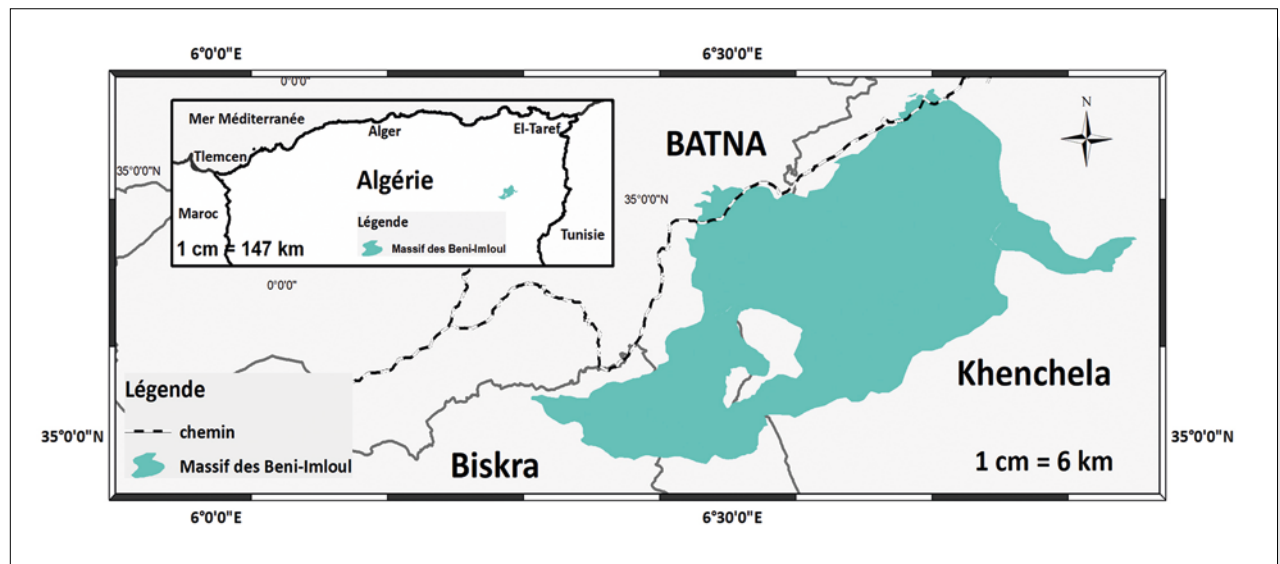
surer une gestion efficace de cette ressource. Bien que de nombreuses études écologiques soient disponibles, les études sur la croissance et la productivité restent insuffisantes et ne couvrent qu'une partie des massifs. De ce fait, pour mieux évaluer le potentiel de production ligneuse de la pinède de Beni Imloul, nous avons mené cette étude qui a pour objectif d'établir des tarifs de cubage à une et à deux entrées, en testant plusieurs modèles cités dans la littérature afin d'identifier le mieux adapté pour le pin d'Alep dans ce massif forestier.

## Matériel et méthodes

### Zone d'étude

Les arbres échantillonnés proviennent de la forêt domaniale de Beni Imloul (figure 1), qui se situe au nord-ouest de la wilaya de Khenchela, entre 6°18' et 6°53' de longitude Est et entre 35°2' et 35°0' de latitude Nord. L'altitude varie entre 1 000 et 1 700 m, la pluviométrie annuelle moyenne est de 300 mm sur les piedmonts et 700 mm sur les sommets. Les versants exposés au nord sont plus arrosés que ceux exposés au sud (Kherchouche *et al.*, 2011). Le mois de janvier est le mois le plus froid, avec une température minimale moyenne de 3 °C, alors que la température moyenne du mois le plus chaud (août) est de 33 °C. Le climat varie du semi-aride froid au subhumide froid. Les sols les plus fréquents sont les rendzines et les sols bruns calcaires (Abdessemed, 1981 *in* Kherchouche *et al.*, 2011).

Le pin d'Alep est l'espèce dominante dans le massif de Beni Imloul avec une superficie de 72 000 ha (Bentouati, 2006). D'après Kadik (1987) et Goubi (2011), il est présent depuis le fond des vallées jusqu'aux plus hauts sommets,

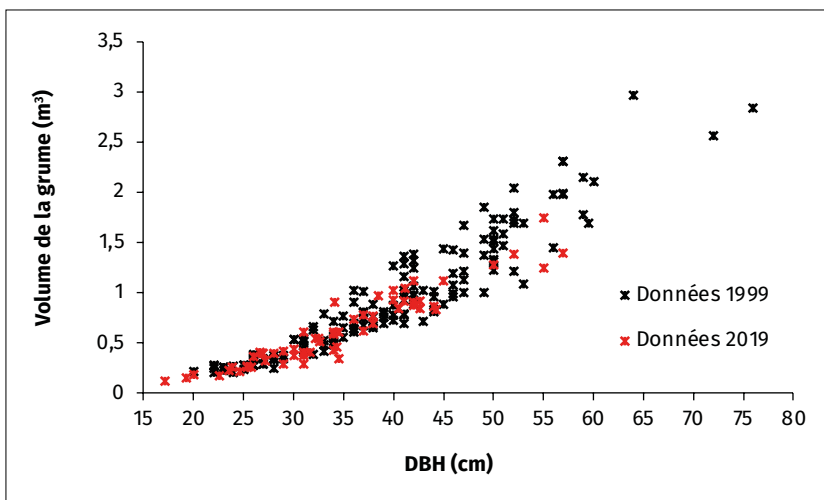


**Figure 1.**  
Localisation géographique de la zone d'étude.  
*Geographical location of the study area.*

**Tableau I.**

Répartition des arbres échantillonnés en fonction de leur diamètre à 1,30 de hauteur (DBH, en cm) et de leur hauteur totale (H, en m).  
*Distribution of sampled trees according to their diameter at 1.30 m height (DBH, in cm) and their total height (H, in m).*

DBH (cm)	Hauteur totale (m)						Total	%
	8-9,9	10-11,9	12-13,9	14-15,9	16-17,9	18		
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	17,7
+ 55				1	2	13	16	7,66
<b>Total</b>	<b>1</b>	<b>12</b>	<b>59</b>	<b>57</b>	<b>34</b>	<b>46</b>	<b>209</b>	<b>100</b>
<b>%</b>	0,48	5,74	28,23	27,27	16,27	22,01	<b>100</b>	

**Figure 2.**

Projection des volumes des grumes déterminés lors des deux phases d'échantillonnage de 1999 puis 2019 en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH).  
*Projected logs volumes determined during the two sampling phases in 1999 and 2019 as a function of diameter at 1.30 m (DBH).*

mais colonise surtout les basses pentes. Le chêne vert est présent dans la strate basse, dans les stations les plus fraîches, alors que le genévrier oxycèdre et le genévrier de Phénicie sont situés dans les stations les plus sèches et les plus dégradées. Le cortège floristique est composé essentiellement des espèces suivantes : globulaire (*Globularia alysum*), filaire (*Phillyrea angustifolia*), diss (*Ampelodesma mauritanica*) et alfa (*Stipa tenacissima*). Le massif est constitué de pinède à chêne vert et de pinède à romarin, généralement sous forme de futaie régulière, avec un sous-bois plus ou moins développé.

## Données collectées

Les données utilisées pour l'élaboration des tarifs de cubage à une et à deux entrées ont été collectées sur des pins d'Alep provenant de coupes d'exploitation définitive (coupe rase). La collecte s'est faite en deux phases : la première en 1999 sur 150 arbres (Belkhir, 1999), et la seconde en 2019 sur 59 arbres. Au total, 209 arbres abattus représentatifs des différentes classes de diamètre et de hauteur (DBH, H) disponibles sur la pinède de Beni Imloul ont été sélectionnés. Le tableau I présente la répartition des arbres échantillonnés selon leur DBH et leur hauteur totale.

Ces deux paramètres ont été systématiquement mesurés. Après l'opération d'ébranchage, le diamètre à la base de la grume (à 0,3 m) a été mesuré, puis les mesures ont été réalisées par pas de 50 cm sur les deux premiers mètres, puis de mètre en mètre jusqu'à la découpe 7 cm. Le volume du bois fort (BF) de la grume a été calculé pour chaque arbre par la méthode des billons successifs (Rondeux, 1993). Le volume total BF de la grume d'un arbre résulte de l'addition des volumes des billons constituant cet arbre, estimés selon la formule de Newton/Simpson.

La figure 2 présente l'estimation des volumes des fûts déterminés lors des deux phases d'échantillonnage de 1999 et 2019 en fonction du DBH. Les deux nuages de points relatifs aux données collectées durant les deux phases d'échantillonnage se superposent. Il ressort de la figure 2 que l'échantillon de 2019 couvre en partie les diamètres de moins de 20 cm tandis que celui de 1999 couvre les classes de diamètre de plus de 50 cm. Ainsi, les données de l'inventaire de 2019 viennent compléter celles de 1999, surtout pour les petits arbres de DBH inférieur à 20 cm.

## Fonctions candidates

De nombreux modèles utilisés 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 :

$$v_i = b_0 + b_1 d_i + b_2 d_i^2 + \varepsilon_i \quad (F 1)$$

$$v_i = b_0 + b_1 d_i + b_2 d_i^2 + b_3 d_i^3 + \varepsilon_i \quad (F 2)$$

$$v_i = b_0 d_i^{b_1} + \varepsilon_i \quad (F 3)$$

$$v_i = b_0 + b_1 d_i + b_2 d_i^2 + b_3 d_i^3 h_i + \varepsilon_i \quad (F 4)$$



$$v_i = b_0 + b_1 d_i + b_2 d_i^2 + b_3 d_i^3 + b_4 d_i^2 h_i + \varepsilon_i \quad (F 5)$$

$$v_i = b_0 + b_1 d_i + b_2 d_i^2 + b_3 d_i^3 + b_4 h_i + b_5 d_i^2 h_i + \varepsilon_i \quad (F 6)$$

$$v_i = b_0 d_i^{b_1} h_i^{b_2} + \varepsilon_i \quad (F 7)$$

$$v_i = d_i^{(b_0 + b_1 h_i)} + \varepsilon_i \quad (F 8)$$

$$v_i = b_1 d_i^{b_2} e^{(b_3 h_i)} + \varepsilon_i \quad (F 9)$$

avec :  $v_i$ , volume bois fort (volume de la grume) en  $m^3$  ;  $d_i$ , diamètre à hauteur de poitrine (DBH) en cm de l'arbre  $i$  ;  $h_i$ , hauteur totale (H) en m de l'arbre  $i$ .

### Méthode d'ajustement et tests d'hypothèses

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

Pour un échantillon d'arbres donné, la variance des volumes tend à augmenter avec les diamètres et habituellement de 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 observées dans les 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  $\sigma_i^2$ . 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 la pondération requise, nous avons utilisé la méthode des variances conditionnelles où l'échantillon de données est réparti par classes de diamètre pour pouvoir calculer une variance du volume  $\sigma_i^2$  pour chaque classe (Sghaier *et al.*, 2008). On calcule par la suite, par régression, la relation existant entre la variance du volume et les dimensions des arbres (par exemple, le diamètre, le carré du diamètre ou toute autre puissance du diamètre).

### Critères d'appréciation de la qualité d'ajustement et choix des meilleurs modèles

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 sur la normalité de la distribution des résidus issus de chaque fonction testée.

### Capacité d'ajustement

• Le coefficient de détermination ajusté  $R_{adj}^2$

Le coefficient de détermination ajusté  $R_{adj}^2$  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 ( $p$ ) 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 ( $S_a$ )

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

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

• La moyenne quadratique des résidus relatifs ( $S_r$ )

La moyenne quadratique des résidus relatifs ( $S_r$ ) est liée davantage aux erreurs commises sur les petits arbres.

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

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 condition 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 ( $\rho_{obs}$ ) 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  $\rho_{obs}$  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  $\rho_{\alpha}$  étant reprises dans une table qui est fonction du nombre d'observations  $n$  (Looney et Gullledge, 1985).

• Le test d'indépendance des résidus

Le test d'indépendance des résidus teste 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. En revanche, une valeur voisine de 2 ne permet pas de rejeter 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 repose 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 %,  $Z_{1-\alpha/2} = 1,96$ .

### Capacité de prédiction

La capacité de prédiction des différentes fonctions étudiées repose 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 :

$$e_i = v_i - \hat{v}_{i,-i} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

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 :

• Le 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

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

• Le coefficient de détermination de prédiction (press R-square)

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

**Tableau II.**

Volume de bois fort des troncs et écarts-types conditionnels du volume par classe de diamètre.

*Volume of strong wood in trunks and conditional standard deviations of volume by diameter class.*

Classes de DBH (cm)	Effectif	$\bar{d}$ (cm)	$v$ (m <sup>3</sup> )	$\sigma_{v/d}$ (m <sup>3</sup> )
<b>15-24,9</b>	17	22,118	0,217	0,045
<b>25-34,9</b>	70	29,839	0,426	0,135
<b>35-44,9</b>	69	39,793	0,874	0,190
<b>45-54,9</b>	37	49,108	1,394	0,287
<b>55 et +</b>	16	59,781	2,027	0,49
<b>Total</b>	<b>209</b>	/	/	/
<b>Moyenne</b>	/	<b>40,13</b>	<b>0,99</b>	<b>0,229</b>

DBH : diamètre du tronc à 1,30 m de hauteur ;  
 $\bar{d}$  : diamètre moyen ;  $v$  : volume moyen ;  
 $\sigma_{v/d}$  : écart-type conditionnel.

**Tableau III.**

Valeurs estimées, test de signification des paramètres et précision des tarifs de cubage à une et à deux entrées des grumes de pin d'Alep.  
*Estimated values, significance test of parameters and accuracy of single-entry and double-entry cubing rates for Aleppo pine logs.*

Type de tarif	Fonction	Par.	Esti.	p >  t	Capacité d'ajustement						Capacité de prédiction					
					Biais	RMSE	S <sub>a</sub>	S <sub>r</sub>	Z <sub>obs</sub>	R <sup>2</sup> <sub>oj</sub>	Biais <sub>p</sub>	RMSE <sub>p</sub>	S <sub>ap</sub>	S <sub>rp</sub>	Z <sub>p</sub> <sub>obs</sub>	R <sup>2</sup> <sub>press</sub>
Une entrée	v = b <sub>0</sub> d <sup>b<sub>1</sub></sup> Non pondéré	b <sub>0</sub> b <sub>1</sub>	3,81.10 <sup>-4</sup> 2,0961	< 0,0001 < 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
	v = b <sub>0</sub> d <sup>b<sub>1</sub></sup> Pondéré	b <sub>0</sub> b <sub>1</sub>	1,79.10 <sup>-4</sup> 2,296	< 0,0001 < 0,0001	-0,003	0,1915	<b>0,1901</b>	<b>0,1852</b>	1,4193	0,8787	0,003	0,1949	<b>0,1935</b>	<b>0,1747</b>	1,2424	0,8798
Deux entrées	v = b <sub>0</sub> d <sup>b<sub>1</sub></sup> h <sup>b<sub>2</sub></sup> Non pondéré	b <sub>0</sub> b <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	1,07.10 <sup>-4</sup> 1,6729 1,0203	< 0,0001 < 0,0001 < 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
	v = b <sub>0</sub> d <sup>b<sub>1</sub></sup> h <sup>b<sub>2</sub></sup> Pondéré	b <sub>0</sub> b <sub>1</sub> b <sub>2</sub>	6,10.10 <sup>-5</sup> 1,8214 1,023	< 0,0001 < 0,0001 < 0,0001	-0,003	0,1374	<b>0,1364</b>	<b>0,1377</b>	1,723	0,9375	0,003	0,1400	<b>0,1390</b>	<b>0,1287</b>	1,9854	0,9357
	Par. : paramètre ; Esti. : valeur estimée ; Biais : moyenne des résidus ; RMSE : écart quadratique moyen ; S <sub>a</sub> : moyenne quadratique des résidus absolus ; S <sub>r</sub> : moyenne quadratique des résidus relatifs ; Z <sub>obs</sub> : valeur observée du test d'indépendance des résidus ; R <sup>2</sup> <sub>oj</sub> : coefficient de détermination ajusté.															

**Précision des tarifs de cubage obtenus**

Pour apprécier la qualité des estimations des tarifs retenus (un tarif à une entrée et un tarif à deux entrées), les écarts moyens absolus relatifs (EMAR) en pour cent seront calculés par classe de diamètre. Pour une classe de diamètre i d'effectif n<sub>i</sub>, l'écart moyen absolu relatif en pour cent s'écrit sous la forme suivante :

$$EMAR_i = \frac{100}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \left| \frac{v_i - \hat{v}_i}{v_i} \right|$$

Ces écarts représentent les erreurs relatives en pour cent commises pour chacun des deux tarifs retenus.

**Résultats**

Pour déterminer le poids de pondération, nous avons regroupé les arbres en cinq classes d'amplitude identique de 10 cm de diamètre. Le tableau II présente, par classe de diamètre, les valeurs moyennes du diamètre et du volume bois fort des arbres cubés ainsi que les écarts-types du volume.

Ces résultats montrent que l'écart-type des volumes augmente avec le diamètre des arbres. Ainsi, pour déterminer la pondération à utiliser pour 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 :

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

avec R<sup>2</sup> = 0,9666

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

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

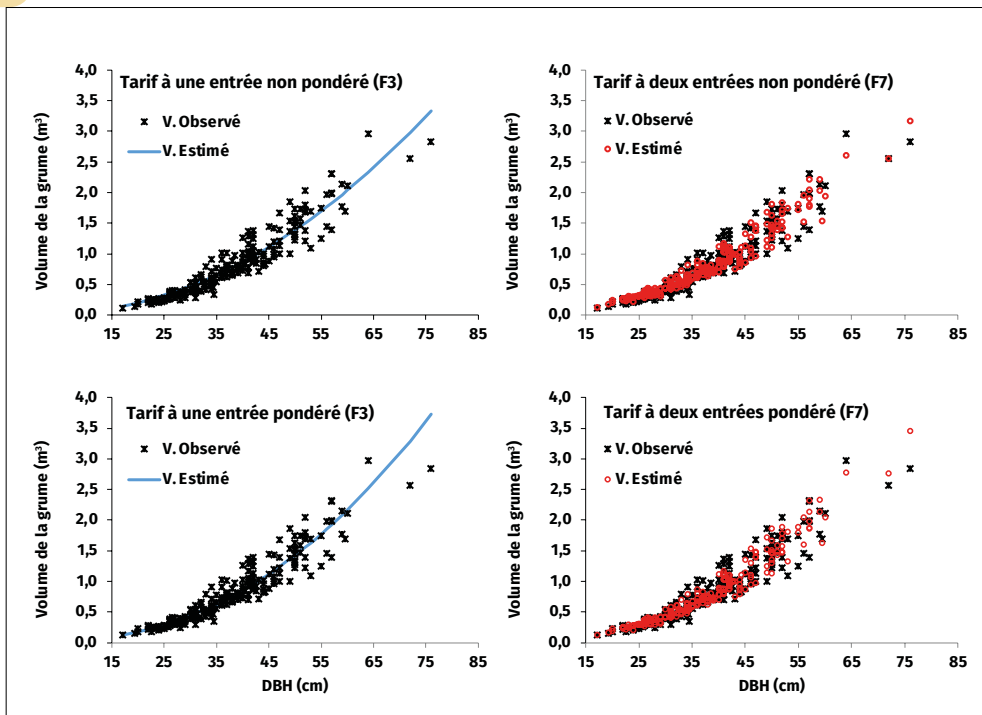
D'après les valeurs des paramètres de cette équation, la valeur de la pondération doit être égale à 4,48. Toutefois, sachant que le volume est lié au carré du diamètre, le poids de pondération w<sub>i</sub> à utiliser est le suivant :

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

Pour choisir les deux fonctions les mieux adaptées pour les tarifs à une et à deux entrées pour le pin d'Alep de la forêt de Beni Imloul, les trois fonctions à une entrée (F1 à F3) et les six fonctions à deux entrées (F4 à F9) relatives aux tarifs de cubage ont été ajustées sur les données issues des arbres cubés, sans et avec pondération en considérant w = 1/d<sup>4</sup> comme poids de pondération. Sur la base des résultats obtenus (valeurs et signification des paramètres) et des valeurs des différents critères de comparaison calculés, les deux fonctions F3 (une entrée) et F7 (deux entrées) sans et avec pondération ont été retenues (tableau III).

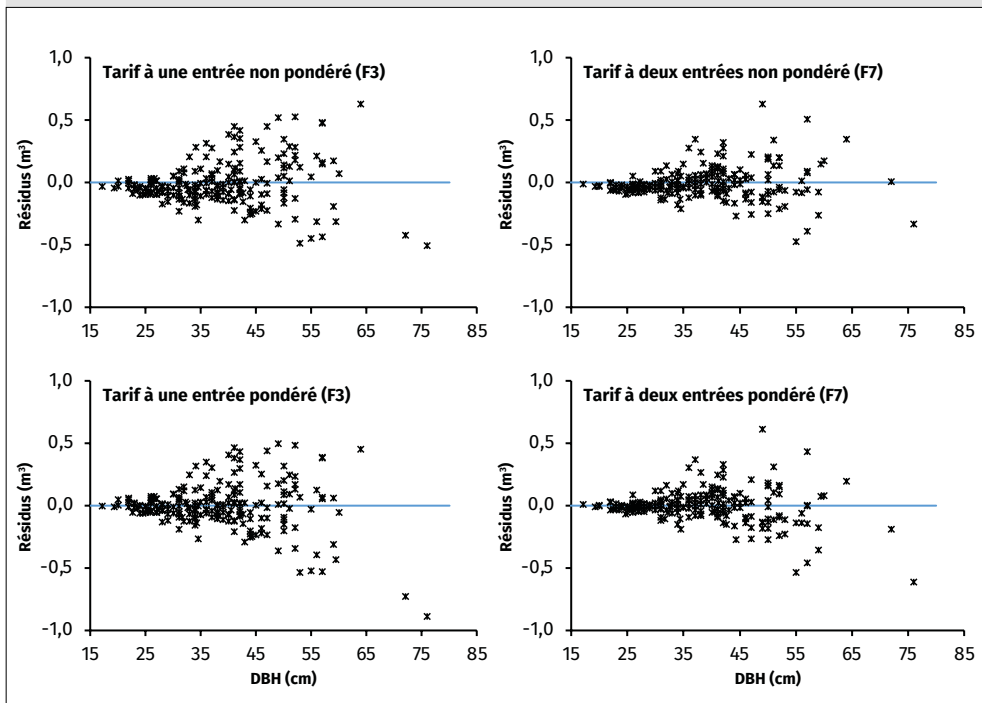
Les résultats du tableau III montrent que la pondération n'a pas amélioré la précision des estimations sauf pour l'estimation des erreurs sur les petits arbres, et ceci pour la capacité d'ajustement (S<sub>a</sub>) comme pour la capacité de prédiction (S<sub>rp</sub>), pour les deux tarifs à une et à deux entrées. L'indépendance des résidus est acceptée pour les deux modèles retenus sous leurs deux formes, pondérée et non pondérée.

Selon les figures 3 et 5, la pondération n'a pas amélioré globalement la précision des estimations ni la normalité de la distribution des résidus. Toutefois, d'après les graphiques de projection des résidus en fonction du DBH (cm)



**Figure 3.**

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.  
*Projection of observed volumes and volumes estimated by functions F3 and F7 as a function of diameter at 1.30 m (DBH) without and with weighting.*



**Figure 4.**

Projection des résidus des volumes (m³) issus des fonctions F3 et F7 ajustées sans et avec pondération en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH).  
*Projection of residual volumes (m³) from functions F3 and F7 adjusted without and with weighting according to diameter at 1.30 m (DBH).*

pour les fonctions pondérées et non pondérées (figure 4), on constate que les volumes estimés par les équations non pondérées sont systématiquement inférieurs aux volumes observés pour les arbres de petites dimensions dont le DBH est inférieur ou égal à 30 cm (sous-estimation), tandis que les tarifs pondérés permettent de corriger cette sous-estimation et donnent une répartition aléatoire des résidus autour de la valeur zéro sur toute l'étendue 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.

Le tableau IV représente les tables de cubage pour les volumes (m³) par classes de diamètre (cm) et de hauteur (m), simulés à l'aide des équations pondérées à une et à deux entrées. Les équations où  $v$  est exprimé en m³,  $d$  en cm et  $h$  en m sont respectivement de la forme suivante :

$$v = 1,79 \times 10^{-4} d^{2,296}$$

$$\text{avec } R_{aj}^2 = 0,8787$$

$$v = 6,10 \times 10^{-5} d^{1,8214} h^{1,023}$$

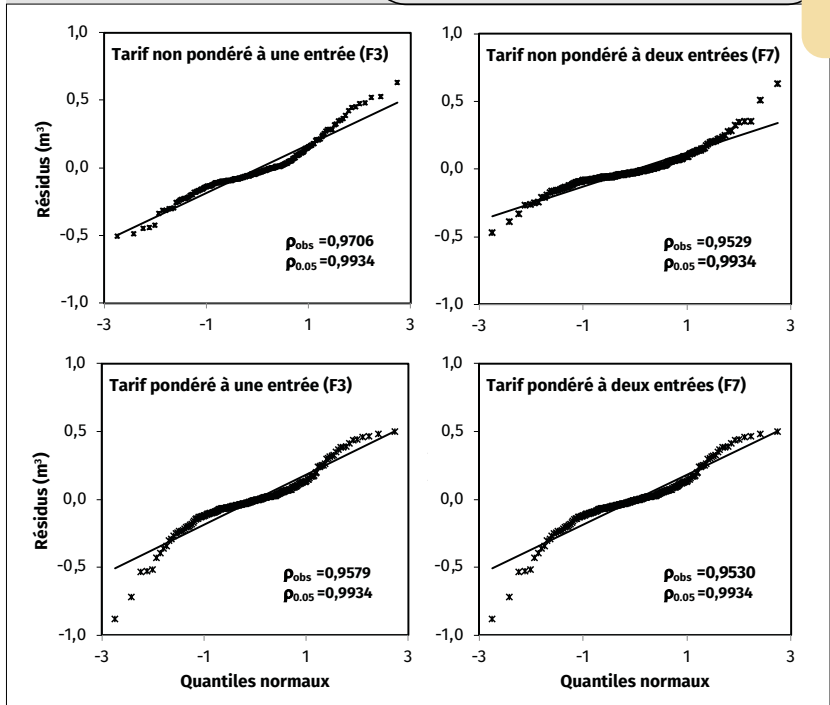
$$\text{avec } R_{aj}^2 = 0,9375$$

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



## Discussion

Les études sur la production du pin d'Alep dans les pays du pourtour méditerranéen sont nombreuses : Montero *et al.* (2001), 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 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 reposé sur les valeurs prédites par ces tarifs et le calcul du biais et des moyennes quadratiques des résidus absolus et relatifs (tableau V). Pour l'Algérie, la comparaison a été faite avec la pinède de Ouled Yaâgoub (un peuplement naturel) où deux tarifs de cubage à une et à deux entrées ont été ajustés sur les données issues de 340 arbres cubés. 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. Il faut préciser que, pour les tarifs de cubage tunisiens, les volumes estimés regroupent le volume de la



**Figure 5.** Diagramme de QQ-probabilité des résidus en (m<sup>3</sup>) et test de normalité de Ryan-Joiner pour les tarifs de cubage à une et à deux entrées sans et avec pondération.  
 QQ-Probability plots of residuals in (m<sup>3</sup>) and Ryan-Joiner normality test for one- and two-input volume tables without and with weighting.

**Tableau IV.**

Tables de cubage à une (F3) et à deux entrées (F7) pondérées : volume du bois fort de la grume d'arbre en m<sup>3</sup> en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH, en cm) et de la hauteur totale (en m) pour le tarif de cubage à deux entrées, et du bois fort de la grume d'arbre en m<sup>3</sup> en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH, en cm) pour le tarif de cubage à une entrée.

*Weighted one-entry (F3) and two-entry (F7) cubage tables: volume of heavy timber in the tree log in m<sup>3</sup> as a function of diameter at 1.30 m (DBH, in cm) and total height (in m) for the two-entry cubage tariff, and heavy timber in the tree log in m<sup>3</sup> as a function of diameter at 1.30 m (DBH, in cm) for the one-entry volume table.*

Classes de DBH (cm)	DBH (cm)	Tarif à deux entrées CV% = 16,15										Tarif à une entrée CV% = 22,43
		Hauteur totale (m)										
		4 ≤ 5	6 5-7	8 7-9	10 9-11	12 11-13	14 13-15	16 15-17	18 17-19	20 19-21	22 21-23	
10-20	15	0,035	0,053	0,071	0,089	0,108	0,126	0,144	0,163	0,181	0,2	0,09
20-30	25	0,089	0,134	0,18	0,226	0,273	0,319	0,366	0,413	0,46	0,507	0,29
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	0,66	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	2,62	2,888	2,602
70-80	75	0,655	0,992	1,332	1,673	2,016	2,361	2,706	3,053	3,4	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	5,23	5,766	6,219

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

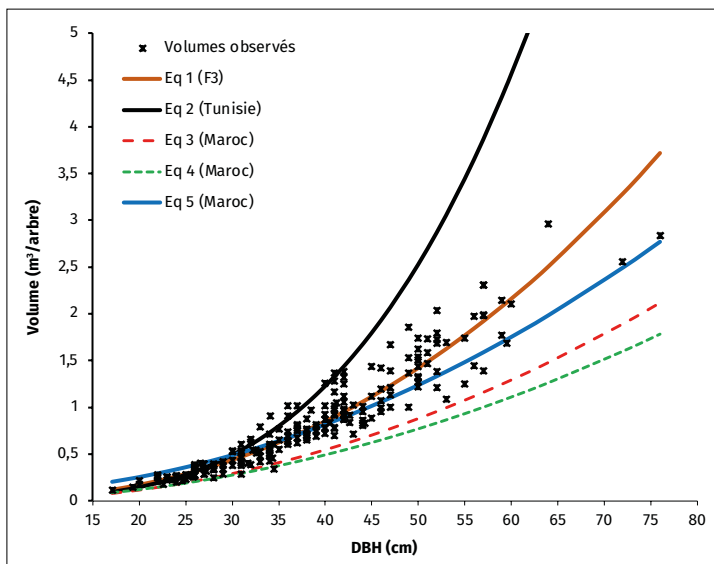
**Tableau V.**

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

*Single-entry and double-entry volume tables established for Aleppo pine in five countries around the Mediterranean, and analysis of residues.*

N°	Équation	Pays	Région	Biais	S <sub>a</sub>	S <sub>r</sub>
1	$v = 1,79 \times 10^{-4} d^{2,296}$	Algérie (F3)	Beni Imloul	-0,003	0,19	0,185
2	$v = -47,820 + 3,287c + 6,078.10^{-2}c^2 + 9,193.10^{-4}c^3$	Tunisie (Sghaier et al., 2008)	/	-0,522	0,98	0,329
3	$v = 0,00334 - 7.10^{-4}c + 4.10^{-5}c^2$	Maroc (Alaoui et al., 2011)	Haut Atlas Zekren et Amezmiz	0,312	0,41	0,624
4	$v = -2,36.10^{-3} + 3,134.10^{-5}c^2$	Maroc (Alaoui et al., 2011)	Oriental Oujda	0,368	0,478	0,776
5	$v = 0,0678 + 47,49.10^{-6}c^2$	Maroc (Alaoui et al., 2011)	Haut Atlas (Tamga)	0,048	0,215	0,235
6	$v = 6,10 \times 10^{-5} d^{1,8214} h^{1,023}$	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 et al., 2014)	/	-0,334	0,454	0,29
8	$v = 0,077186 d^{1,84818} h^{0,88012}$	Espagne (Martínez-Millán et al., 1993)*	/	0,049	0,144	0,157
9	$v = 0,011 + 3,07.10^{-6}c^2 h$	Maroc (Alaoui et al., 2011)	Oriental Oujda	0,059	0,152	0,184
10	$v = -36,220 + 2,663c - 5,666.10^{-2}c^2 + 5,023.10^{-3}c^3 + 3,000.10^{-3}c^2 h$	Tunisie (Sghaier et al., 2008)	/	-0,393	0,697	0,275

Biais : moyenne des résidus ; S<sub>a</sub> : moyenne quadratique des résidus absolus ; S<sub>r</sub> : moyenne quadratique des résidus relatifs ;  
\* : in Montero et al., 2001.

**Figure 6.**

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 (Eq : équation) à une entrée établis pour le pin d'Alep de trois pays méditerranéens.

*Observed volumes for trees sampled in the Beni Imloul forest as a function of diameter at 1.30 m (DBH) and curves simulated using single-entry volume tables (Eq: equation) established for Aleppo pine in three Mediterranean countries.*

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), 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 ; il s'agit d'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. La comparaison

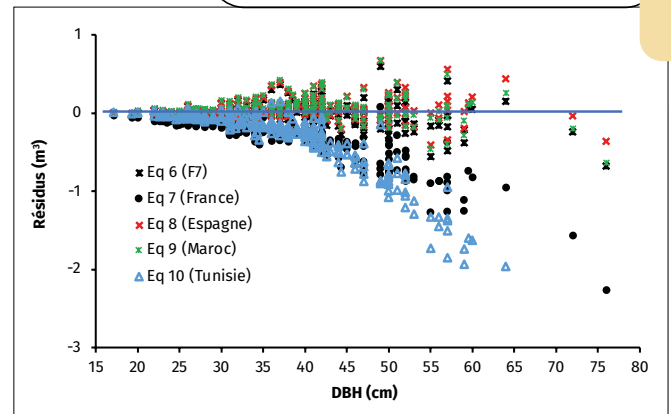
avec l'Espagne a été faite avec un tarif à deux entrées, utilisé par Montero *et al.* (2001) et précédemment élaboré par Martínez-Millán *et al.* (1993).

Pour les tarifs à une entrée, le tableau V montre que le tarif tunisien (Eq. 2) et les trois tarifs marocains (Eq. 3, Eq. 4 et Eq. 5) donnent globalement les erreurs les plus élevées. Le tarif tunisien (Eq. 2) donne la valeur la plus élevée des erreurs commises sur les gros arbres ( $S_a$ ) et celui du Maroc (Eq. 4) la plus élevée des erreurs commises sur les petits arbres ( $S_p$ ).

Pour les tarifs à deux entrées, le tableau V 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  $S_p$  la plus élevée. Le tarif de l'Espagne (Eq. 8) présente les erreurs les plus faibles. D'après les valeurs des erreurs d'estimation par les différents tarifs présentés dans le tableau V, le tarif qui offre les erreurs les plus faibles est celui à deux entrées, développé par Martínez-Millán *et al.* (1993) et mentionné par Montero *et al.* (2001) en Espagne (Eq. 8).

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 V (figure 6) montre qu'à l'exception du tarif tunisien (Eq. 2), qui surestime les volumes, l'ensemble des tarifs marocains représentant les peuplements naturels du Haut Atlas (Zerkten, Amez Miz et Tamga) et le reboisement (Oriental Oujda) sous-estime ce paramètre (Eq. 3, Eq. 4 et Eq. 5).

La projection des résidus issus des différents tarifs à deux entrées (figure 7) montre que les tarifs de la Tunisie (Eq. 10) et de la France (Eq. 7) surestiment en général les volumes des arbres cubés de la forêt de Beni Imloul, objet de cette étude. Ces deux 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, la surestimation des volumes peut être due aux tarifs utilisés. Les tarifs tunisien et français donnent les volumes totaux (grume plus les branches).



**Figure 7.** Projection des résidus en fonction du diamètre à 1,30 m (DBH) obtenus par les tarifs de cubage à deux entrées établis pour le pin d'Alep de cinq pays méditerranéens. *Projection of residues as a function of diameter at 1.30 m (DBH) obtained by two-entry volume tables established for Aleppo pine in five Mediterranean countries.*

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.

Pour les Aurès, et comme un cas spécifique, nous avons choisi de faire une comparaison entre nos tarifs, à une et à deux entrées, obtenus pour la pinède des Beni Imloul, avec ceux élaborés pour le peuplement de Ouled Yaâgoub 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 VI. 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. La pinède de Beni Imloul donne des volumes plus importants par rapport à celle de Ouled Yaâgoub (le volume moyen des arbres de Beni Imloul dépasse environ deux fois celui des arbres de

**Tableau VI.**

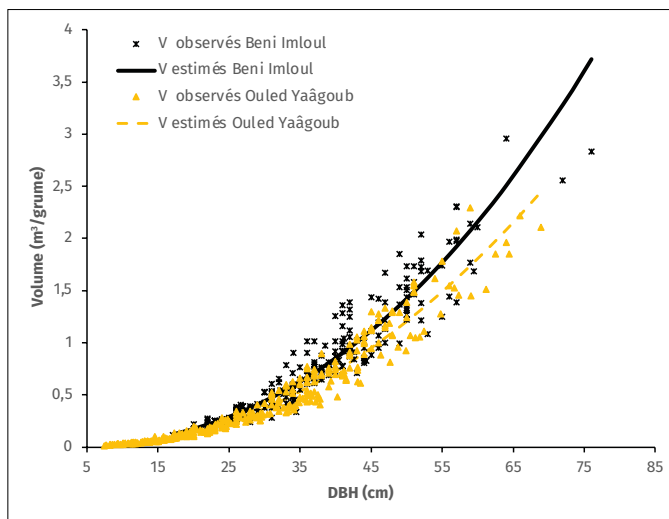
Caractéristiques dendrométriques et volumes des arbres cubés dans les massifs de Beni Imloul et Ouled Yaâgoub. *Dendrometric characteristics and volumes of trees cubed in the Beni Imloul and Ouled Yaâgoub massifs.*

Station	Taille de l'échantillon	Variable	Moyenne	Minimum	Maximum	Coefficient de variation 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 <sup>3</sup> )	0,85	0,12	2,7	50,42
Ouled Yaâgoub (Goubi <i>et al.</i> , 2019)	340	Diamètre (cm)	29,08	7,4	68,9	39,04
		Hauteur (m)	11,52	4,9	18,69	24,31
		Volume (m <sup>3</sup> )	0,46	0,015	2,3	78,22

Ouled Yaâgoub). En comparant la répartition des arbres cubés en fonction du diamètre à 1,30 m de hauteur (cm) et de la hauteur totale (m) pour les deux peuplements, nous constatons que, pour la pinède de Beni Imloul, la majorité des arbres est située 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.

Par comparaison au peuplement de Ouled Yaâgoub, 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 peut être à l'origine des volumes élevés en faveur de la pinède des Beni Imloul.

Pour les deux peuplements de Beni Imloul et celui de Ouled Yaâgoub, la figure 8 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. Cette figure montre que les volumes observés des Beni Imloul sont supérieurs aux volumes de la pinède de Ouled Yaâgoub pour des caractéristiques dendrométriques similaires. La différence est peu marquée jusqu'à 25 cm de diamètre. Les arbres de la pinède des Beni Imloul, caractérisés par des hauteurs plus élevées, ont des volumes plus importants par rapport aux arbres ayant le même diamètre au sein de la pinède de Ouled Yaâgoub ; ceci reflète un potentiel de production dépassant celui de la pinède de Ouled Yaâgoub malgré sa situation dans l'étage bioclimatique subhumide.



**Figure 8.**

Projection des volumes observés des grumes 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.

*Projection of observed volumes of sampled tree logs as a function of diameter at 1.30 m (DBH) and curves simulated using the single-entry volume table for the Beni Imloul and Ouled Yaâgoub pine forests.*

## Conclusion

Le présent travail porte sur le test et l'ajustement de plusieurs équations linéaires et non linéaires pour prédire le volume bois fort des pins d'Alep de la forêt de Beni Imloul en Algérie. Le choix des meilleures équations repose principalement sur la précision des estimations et l'étude numérique et graphique des résidus. L'utilisation de la pondération a amélioré la précision des équations testées, surtout pour les gros arbres, et par conséquent a conduit à de meilleurs résultats.

Sur la base des résultats obtenus, les équations pondérées F3 (tarif de cubage à une entrée) et F7 (tarif de cubage à deux entrées) ont été retenues pour le cubage des pins d'Alep de la forêt de Beni Imloul en Algérie.

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. 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.

La comparaison des résultats obtenus dans le cadre de cette étude avec ceux issus d'autres études réalisées dans quelques pays du pourtour méditerranéen a montré des écarts importants quant aux volumes estimés. Ces écarts peuvent être expliqués par la variabilité entre les échantillons d'arbres qui ont servi aux ajustements des différents tarifs. Cette variabilité dans la forme et la dimension des pins d'Alep peut être liée aux conditions des milieux qui diffèrent entre les stations et les pays.

Les deux tarifs élaborés dans le cadre de cette étude peuvent être utilisés pour l'estimation du volume bois fort des grumes des arbres dont le diamètre à hauteur de poitrine (DBH, à une hauteur de 1,30 m) varie entre 15 et 80 cm, et la hauteur entre 9 et 23 m. En dehors de ces limites, ces tarifs doivent être utilisés avec prudence.

### Financement

L'étude a été financée en grande partie par le premier auteur, Khedidja Zeghichi (40 %), ainsi que par une contribution de deux organismes : Université Batna 1 et Conservation des forêts de Khenchela.

### Conditions d'accès aux données

Les données de cette étude sont disponibles gratuitement et accessibles à partir de ce lien : <https://zenodo.org/records/8367806>

Il est demandé de prévenir l'auteur et de citer cet article pour toute utilisation des données.



## Références bibliographiques

- Alaoui A., Laariby 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>
- 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-Imloul. Mémoire d'ingénieur, Université EL-Hadj Lakhdar – Batna – Faculté des sciences, Département d'agronomie, Algérie, 66 p.
- Bensaïd 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., 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>
- Daoui A., Douet J., Marchel R., Zerizer A., 2007. Valorisation du bois de pin d'Alep par déroulage : optimisation de son étuvage. Bois et Forêts des tropiques, 294 (4) : 52-64. <https://revues.cirad.fr/index.php/BFT/article/view/20334>
- 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, la station. Rendez-vous Techniques de l'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>
- Draper N. R., Smith H., 1981. Applied regression analysis. New York, USA, Wiley, 709 p.
- Fonweban J. N., Houllier F., 1997. Tarifs de cubage et fonctions de défilement pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun. Annales des Sciences Forestières, 54 : 513-528. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00883166/document>
- Goubi M., 2011. Croissance et productivité du pin d'Alep dans quelques stations du massif des Aurès. Thèse de magister, Université El-Hadj Lakhdar - Batna, Institut des sciences vétérinaires et des sciences agronomiques, Département d'agronomie, Algérie, 63 p. <http://www.secheresse.info/spip.php?article14390>
- 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>



**Photo 2.**

Peuplement naturel du pin d'Alep dans la forêt de Beni Imloul. Natural stand of Aleppo pine in the Beni Imloul forest. Photo k. Zeghichi.

- Kadik B., 1987. Contribution à l'étude du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Algérie : Écologie, dendrométrie, morphologie. Alger, Algérie, Office des publications universitaires, 585 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). Sécheresse, 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](https://www.researchgate.net/publication/281450794_Croissance_et_ecologie_du_pin_d%27Alep_Pinus_halepensis_Mill_dans_le_massif_des_Beni-Imloul_Aures_Algerie)
- Looney S. W., Gullidge 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](https://www.researchgate.net/publication/239799316_Use_of_the_Correlation_Coefficient_with_Normal_Probability_Plots)
- Martínez-Millán J., Ara Lázaro P., González-Doncel I., 1993. Ecuaciones alométricas de tres variables : estimación del volumen, crecimiento y porcentaje de corteza de las principales especies maderables Españolas. Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales, 2 (2): 211-218. <https://>



[www.researchgate.net/publication/277191165\\_Ecuaciones\\_alometricas\\_de\\_tres\\_variables\\_estimacion\\_del\\_volumen\\_crecimiento\\_y\\_porcentaje\\_de\\_corteza\\_de\\_las\\_principales\\_especies\\_maderables\\_espanolas](https://www.researchgate.net/publication/277191165_Ecuaciones_alometricas_de_tres_variables_estimacion_del_volumen_crecimiento_y_porcentaje_de_corteza_de_las_principales_especies_maderables_espanolas)

Montero G., Cañellas I., Ruíz-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>

Morice E., Chartier F., 1954. Méthode statistique (2<sup>e</sup> vol.). Paris, France, Imprimerie nationale, 555 p.

Palm R., 1981. Calcul et choix des équations de cubage d'arbres. Bulletin des Recherches Agronomiques de 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. Gembloux, Belgique, Faculté des sciences agronomiques, 13 p.

Palm R., 1988. Les critères de validation des équations de régression linéaire. Gembloux, Belgique, Faculté des sciences agronomiques, Notes de Statistique et d'Informatique, 88 (1), 27 p. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/113726/1/88-1-CritValidEqRégLin.pdf>

Rondeux J., 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les Presses agronomiques de Gembloux, 521 p.

Ryan T. A., Joiner B. L., 1976. Normal probability plots and tests for normality. Pennsylvania State University, USA, 12 p. <https://docplayer.net/21494161-Normal-probability-plots-and-tests-for-normality.html>

SAS Institute Inc., 2004a. SAS/STAT 9.1 User's Guide. Cary, NC, USA, SAS Institute Inc., 5121 p. [https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc\\_91/stat\\_ug\\_7313.pdf](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.

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: 633-643. <https://hal.science/hal-00883925/document>

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](https://www.researchgate.net/publication/28251727_Generalized_height-diameter_and_crown_diameter_prediction_models_for_cork_oak_forests_in_Spain)

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](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., Ammari Y., 2013. Tables de cubage pour 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](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., Claustriax 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](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](https://www.researchgate.net/publication/348807288_Modelisation_de_la_croissance_et_de_la_production_du_liège_en_Tunisie)

### Zeghichi et al. – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	K. Zeghichi, T. Sghaier, A. Bentouati
Gestion des données	K. Zeghichi
Analyse formelle	K. Zeghichi, T. Sghaier
Acquisition du financement	K. Zeghichi, D. Kherchouche, Conservateur des forêts de Khenchela
Enquête et investigation	K. Zeghichi, L. Belkhiri
Méthodologie	T. Sghaier, A. Bentouati, K. Zeghichi
Gestion de projet	K. Zeghichi, A. Bentouati, D. Kherchouche
Ressources	K. Zeghichi, D. Kherchouche, Conservateur des forêts de Khenchela
Logiciels	K. Zeghichi, T. Sghaier
Supervision	A. Bentouati, T. Sghaier, D. Kherchouche
Validation	K. Zeghichi, D. Kherchouche
Visualisation	K. Zeghichi, T. Sghaier, A. Bentouati
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	K. Zeghichi, T. Sghaier, A. Bentouati, D. Kherchouche
Écriture – Révision et édition	K. Zeghichi, T. Sghaier, D. Kherchouche, A. Bentouati

Bois et Forêts des Tropiques - Revue scientifique du Cirad -  
© Bois et Forêts des Tropiques © Cirad



Cirad - Campus international de Baillarguet,  
34398 Montpellier Cedex 5, France  
Contact : [bft@cirad.fr](mailto:bft@cirad.fr) - ISSN : L-0006-579X