

Ajustement d'un système d'équations de volumes marchands pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie

Tahar SGHAIER¹
Youssef AMMARI¹

¹ Université de Carthage
Institut national de recherches en génie rural, eaux et Forêts (INRGREF)
Rue Hédi EL Karray El Menzah IV
BP 10, Ariana 2080
Tunisie

**Auteur correspondant /
Corresponding author:**

Tahar SGHAIER –
sghaier.tahar@iresa.agrinet.tn



Photo 1.
Peuplement pur de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd.
Pure stand of Zea oak, Quercus canariensis Willd.
Photo T. Sghaier

Doi : 10.19182/bft2022.354.a36817 – Droit d'auteur © 2022, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 21 décembre 2021 ; date d'acceptation : 18 août 2022 ; date de publication : 1er décembre 2022.



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

Citer l'article / To cite the article

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 : 19-39. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36817>

RÉSUMÉ

Ajustement d'un système d'équations de volumes marchands pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie

Des tarifs de cubage globaux et des équations de volumes à diamètre et longueur variables ont été ajustés à l'aide d'un système d'équations simultanées pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.), en Tunisie. Les données utilisées proviennent de 75 arbres échantillonnés dans la forêt de chêne zéen localisée dans la région d'Ain Sallem au Nord-Ouest du pays. La méthode d'ajustement adoptée est celle de la régression non linéaire sans corrélation apparente (NSUR : *Non-linear Seemingly Unrelated Regression equations*), basée sur les moindres carrés généralisés. Vu le caractère longitudinal des données utilisées qui engendre une autocorrélation entre les erreurs successives issues des observations en provenance d'une même tige, un processus autorégressif d'ordre 2 sur ces erreurs a été incorporé dans le modèle d'ajustement des paramètres des différentes équations étudiées. Le système d'équations obtenu permet d'estimer avec des degrés de précision qui varient de 97 à 99 % : le volume total du bois fort des arbres entiers et des grumes jusqu'à une découpe quelconque ; le volume entre deux niveaux de la grume ; le diamètre à une hauteur donnée ainsi que la hauteur à un diamètre de découpe donné de la grume. Grâce à ces équations, des tables de cubage d'estimation des volumes globaux et marchands des arbres et des grumes de chêne zéen ont été générées, ce qui représente un outil flexible, précis et pratique pour la gestion adéquate de la forêt de chêne zéen en Tunisie et dans les autres pays méditerranéens.

Mots-clés : *Quercus canariensis*, chêne zéen, tarifs globaux, tarifs marchands, équations simultanées, Tunisie.

ABSTRACT

Adjusting a system of marketable volume equations for *Quercus canariensis* Willd. in Tunisia

Equations for total and commercial volumes of *Quercus canariensis* (zean oak) in Tunisia were adjusted by using a system of simultaneous equations. We used data for 75 sampled trees from the *Quercus canariensis* forest located at Ain Sallem in the north-west of the country. Nonlinear Seemingly Unrelated Regression (NSUR), based on the generalized least squares method, was used to adjust the system of volume equations. To take into account the inherent autocorrelation in the longitudinal data between successive errors from observations of the same stem, we applied a second-order continuous-time autoregressive error structure, which allows equations to be applied to irregularly spaced, unbalanced data. The adjusted system of equations can predict the following with 97 to 99% accuracy: (i) the total volume of sound wood in whole trees and the volume of stems up to a given cut, (ii) the volume between two heights of the stem, and (iii) the diameter at a given height and the height at a given cutting diameter of the stem. Thanks to these equations, volume tables were generated to estimate total and marketable tree and stem volumes for zean oak, which provide an accurate, flexible and practical tool to support sustainable management of zean oak forests in Tunisia and other Mediterranean countries.

Keywords: *Quercus canariensis*, zean oak, equations for total volume, equations for marketable volume, simultaneous equations, Tunisia.

RESUMEN

Ajuste de un sistema de ecuaciones de volumen de mercado para el roble andaluz (*Quercus canariensis* Willd.) en Túnez

Se ajustaron las tasas de cubicación global y las ecuaciones de volumen de diámetro y longitud variables mediante un sistema de ecuaciones simultáneas para el roble andaluz (*Quercus canariensis* Willd.), en Túnez. Los datos utilizados proceden de 75 árboles muestreados en un bosque de roble andaluz situado en la región de Ain Sallem, en el noroeste del país. El método de ajuste adoptado y el de regresión no lineal sin correlación aparente (NSUR: ecuaciones de regresión no relacionadas aparentemente no lineales) se basa en los mínimos cuadrados generalizados. Dado el carácter longitudinal de los datos utilizados, que genera una autocorrélation entre los errores sucesivos provenientes de las observaciones de un mismo tallo, se incorporó al modelo un proceso autorregresivo de segundo orden sobre estos errores para ajustar los parámetros de las distintas ecuaciones estudiadas. El sistema de ecuaciones resultante permite realizar estimaciones con grados de precisión que varían del 97 al 99 %: (i) el volumen total de madera dura de árboles enteros y rollos hasta cualquier corte, (ii) el volumen entre dos niveles del rollo, y (iii) el diámetro a una altura determinada, así como la altura a un diámetro de corte determinado del rollo. Gracias a estas ecuaciones, se han generado tablas de cubicación para estimar los volúmenes globales y de mercado de los árboles y rollos de roble andaluz, lo que representa una herramienta flexible, precisa y práctica para la gestión adecuada del bosque de roble andaluz en Túnez y los países mediterráneos.

Palabras clave: *Quercus canariensis*, roble andaluz, tarifas globales, tarifas comerciales, ecuaciones simultáneas, Túnez.

Introduction

Les tarifs de cubage constituent des outils indispensables pour la gestion et l'aménagement des forêts et forment la base de calcul de la croissance et de la production des espèces forestières ligneuses. Il s'agit des outils d'estimation indirecte du volume (V) d'un arbre par l'intermédiaire des variables ou paramètres faciles à mesurer, tels que le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et la hauteur totale (H) de l'arbre (Rondeux, 1993). On distingue souvent deux principaux types de tarifs : tarif à une entrée qui exprime le volume d'un arbre en fonction de son DHP et tarif à deux entrées qui exprime le même volume en fonction du DHP et de la hauteur totale de l'arbre (Bouchon, 1974). Les tarifs à une entrée sont moins précis que les tarifs à deux entrées, bien qu'ils soient plus simples et plus rapides à mettre en œuvre. La relation entre le DHP et la hauteur de l'arbre peut varier en fonction de l'âge de l'arbre, ce qui limite l'utilisation des tarifs à une entrée (Pardé et Bouchon, 1988). Des tarifs à trois variables peuvent être construits, quoique leur utilisation ne soit pas recommandée car ils utilisent des mesures plus difficiles et plus coûteuses à obtenir (Rondeux, 1993). La troisième variable peut être par exemple la hauteur à une certaine découpe ou le diamètre à une certaine hauteur de l'arbre. Des tarifs dits tarifs paramétrés peuvent également être développés ; ils utilisent une variable supplémentaire décrivant certaines caractéristiques moyennes du peuplement telles que le rapport de la hauteur sur le DHP des arbres dominants. Les tarifs paramétrés permettent d'avoir un aperçu de la forme de la tige à cuber tout en minimalisant les coûts de la prise de mesure (Prégent *et al.*, 2001). Les tarifs de cubage dits tarifs classiques ou tarifs globaux permettent en général d'estimer le volume total bois fort (BF) d'un arbre de la souche jusqu'à une certaine découpe ou diamètre fin-bout de la tige. En Tunisie, le volume marchand BF d'un arbre est généralement calculé de 0,20 m du sol jusqu'à une découpe de 7 cm de diamètre fin-bout. De tels tarifs sont actuellement disponibles en Tunisie pour quelques espèces résineuses telles que le pin d'Alep, *Pinus halepensis* Mill. (Sghaier *et al.*, 2008), le pin pignon, *Pinus pinea* (Sghaier *et al.*, 2013), et le thuya, *Tetraclinis articulata* (Calama *et al.*, 2012).

Pour répondre aux exigences de l'industrie du bois et s'adapter à la diversification de la demande en produits forestiers ligneux, d'autres techniques d'ajustement des équations de cubage plus sophistiquées sont apparues. Il s'agit de tarifs de cubage plus flexibles qui permettent de prédire le volume de bois jusqu'à des découpes variées (Prégent *et al.*, 2001 ; Thibaut *et al.*, 1998 ; Fonweban et Houllier, 1997). Différentes équations permettant d'exprimer le rapport de volume jusqu'à une découpe quelconque (diamètre : d ou hauteur : h) à partir du volume total (V) de la tige, de ses dimensions (diamètre : D ou hauteur : H) et de la dimension à la découpe fixée (d ou h) ont été développées pour le pin à torches, *Pinus taeda*, au sud des États-Unis (Bullock et Burkhart, 2003 ; Cao et Burkhart, 1980 ; Burkhart, 1977). Combinées à une équation d'estimation du volume total (V) de la tige d'un arbre, ces équations de rapport de volume

permettent de calculer le volume de billons de longueur et de diamètre variables (volume de la tige jusqu'à la découpe de diamètre d : $V_d = f(D, H, d)$, ou volume de la tige jusqu'à la découpe de hauteur h : $V_h = f(D, H, h)$), ou de décomposer le volume de la tige en assortiments de produits (Fonweban et Houllier, 1997). Partant du principe que, pour un niveau de coupe donné (d et h fixes), les deux rapports de volume doivent être identiques, des équations de défilement de la tige peuvent être générées. Ces dernières permettent de prédire le diamètre fin-bout pour une hauteur donnée de la tige : $d = f(D, H, h)$ et inversement la hauteur ou la longueur de la tige pour un diamètre fin-bout donné : $h = f(D, H, d)$. Ces fonctions trouvent leurs utilisations dans l'estimation de certains produits (poteaux, bois de mines, etc.) dont les spécifications sont exprimées en termes de dimensions et non en termes de volumes (Fonweban et Houllier, 1997).

Cette étude vise à élaborer des tarifs de cubage globaux et des tarifs à longueur et à diamètre variables d'utilisation pour le chêne zéen, *Quercus canariensis*, en Tunisie. Les données utilisées dans cette étude proviennent des coupes effectuées dans la zénaie d'Ain Sallem (région d'Ain Draham au Nord-Ouest de la Tunisie) au début du mois d'avril 2020, où plus de 400 arbres de chêne zéen dont l'âge dépasse pour certains arbres les 200 ans ont été coupés. Pour étudier les impacts écologiques, biologiques, environnementaux et socio-économiques de ces coupes et proposer un programme de réhabilitation de la zénaie touchée par celles-ci, le ministère de l'Agriculture a désigné un comité scientifique multi-institutionnel et pluridisciplinaire regroupant des représentants de différents ministères et des organisations non gouvernementales (ONG). C'est dans le cadre des travaux de ce comité que tous les arbres coupés ont été inventoriés et géolocalisés. La disponibilité de ces arbres déjà coupés constitue une occasion exceptionnellement rare à saisir afin d'élaborer des tarifs de cubage globaux et marchands pour le chêne zéen en Tunisie. Ces tarifs seront des outils indispensables pour réussir les futurs programmes d'aménagement et de gestion soutenables des différents peuplements de cette espèce en Tunisie et dans les pays voisins.

Matériels et méthodes

La zénaie en Tunisie

Le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) est localisé dans la péninsule Ibérique (Espagne, Portugal) et en Afrique du Nord (Maroc, Tunisie). Il est endémique de l'Afrique du Nord et de la péninsule Ibérique et considéré en Tunisie comme l'une des rares espèces à constituer des forêts de feuillus. En Tunisie, le chêne zéen est une espèce protégée qui se situe essentiellement en Kroumirie avec quelques îlots aux Mogods et une station au Cap Bon (Mechergui *et al.*, 2022). Selon le dernier inventaire forestier tunisien (DGF, 2010), la superficie du chêne zéen en peuplements naturels purs est de l'ordre de 8 332 ha (1,23 % de la superficie fores-

tière totale), répartis sur les deux gouvernorats de Jendouba (7 960 ha) et Béja (372 ha). Le chêne zéen se rencontre également en peuplements mixtes (13 651 ha), essentiellement en mélange avec du chêne-liège, *Quercus suber* L. Les peuplements purs de chêne zéen en Tunisie montrent une densité moyenne à forte, allant de 200 tiges/ha à El Feidja et Oued Zéen, 300-350 tiges/ha à Bni-Mtir, voire plus de 800 tiges/ha à Ain Zana, avec un taux de recouvrement qui peut atteindre 100 %. Du point de vue bioclimatique, le chêne zéen se limite aux variantes tempérée et fraîche du bioclimat humide, et, à un degré moindre, au subhumide (Rabhi, 2011). Toutefois, il peut se développer dans le subhumide frais et il n'est pas absent dans l'humide chaud, son optimum de production étant atteint dans le supra-méditerranéen (Quézel et Médail, 2003). Du point de vue des précipitations, le chêne zéen est très exigeant et nécessite annuellement plus de 800 mm de pluies (Boudy, 1955), et ne prend son développement optimal que dans les zones recevant 1 000 mm et plus (Quézel et Médail, 2003). Les premiers peuplements apparaissent en Tunisie avec des précipitations annuelles supérieures à 800 mm et se localisent surtout dans les hauteurs. Aux basses altitudes, on trouve le chêne zéen dans les dépressions (cuvettes) ou au fond des ravins ou encore sur les versants exposés au Nord et Nord-Ouest. C'est un arbre qui peut vivre plus de 200 ans, atteignant parfois plus de 30 m de hauteur et plus de 2 m de diamètre du tronc à 1,30 m du sol, avec un fût très élancé et un houppier étalé en peuplements clairs

et fastigié dans les formations très denses (Rabhi, 2011). Toutefois, bien que le bois de cette essence, très dur et très dense avec une excellente résistance aux chocs, ne présente pas des qualités appropriées pour certains usages, il garde son utilité pour la confection des poutres de ponts, le bois de service (piquets de mines, perches...), le parquet, les manches d'outils. Il donne aussi un bon bois de chauffage et un charbon de qualité. Pour les traverses de chemin de fer, utilisées par le passé, il ne donne pas entière satisfaction pour cet emploi car les fibres, une fois soumises aux sels de fer et à l'humidité, se désorganisent sous le rail (Mazghrane et Messaoud, 1990).

La zone d'étude, localisée dans la forêt d'Ain Sallem de la délégation d'Ain Drahem au Nord-Ouest de la Tunisie (figure 1), est caractérisée par un bioclimat humide supérieur (Hasnaoui, 1992). La température moyenne annuelle est de l'ordre de 15,5 °C avec un maximum absolu de 43 °C au cours du mois d'août (Jdaïdi, 2018) et un minimum autour de - 4 °C (Azizi, 2018). La pluviométrie moyenne annuelle est de 800 mm/an (Azizi, 2018). La zone étudiée renferme les forêts les plus denses et les plus riches en composition floristique, constituées par des peuplements purs de chêne-liège et de chêne zéen et sur le reste par des mélanges de chêne-liège et de chêne zéen. Il est possible de rencontrer également un mélange de chêne-liège et de pin maritime, *Pinus pinaster* (Jdaïdi, 2018).

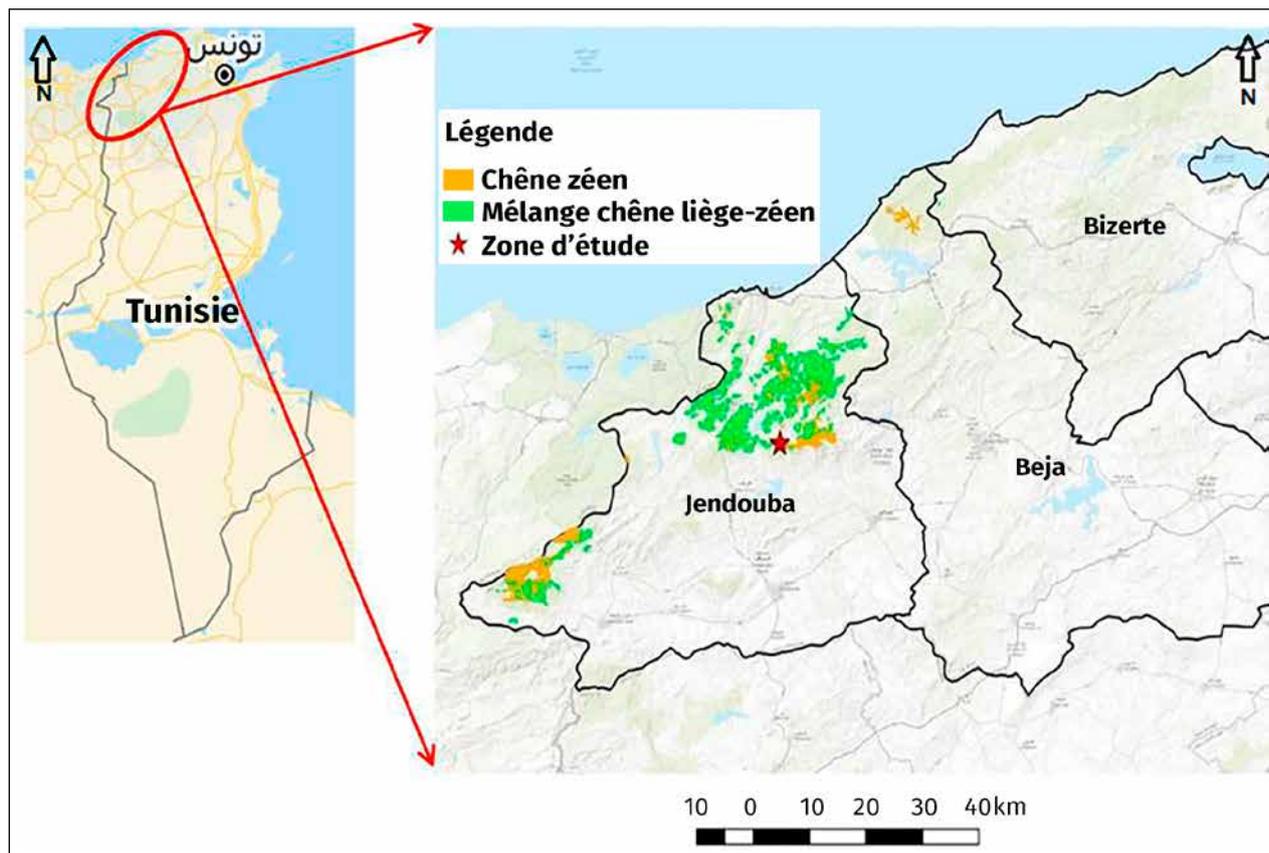


Figure 1.
Carte de répartition géographique du chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie et zone d'étude (Ain Sallem – Nord-Ouest de la Tunisie).
Geographical distribution map of zea oak (*Quercus canariensis* Willd.) in Tunisia and study area (Ain Sallem - North West Tunisia).

Données collectées

Les 432 arbres de chêne zéen coupés ont été inventoriés et géoréférencés. Un premier passage de mesures dendrométriques sommaires a été effectué, par l'équipe de l'INRGREF, sur tous les arbres coupés. Ces mesures dendrométriques sommaires ont concerné le diamètre de la souche à 0,20 m de hauteur (DS), le diamètre à 1,30 m de hauteur (DHP) et la hauteur totale (H) de chaque arbre abattu. Afin d'établir des tarifs de cubage globaux et des tarifs marchands pour le chêne zéen en Tunisie, un échantillon représentatif de 75 arbres parmi ceux coupés a été sélectionné d'une façon plus ou moins proportionnelle au nombre d'arbres de chaque combinaison (classe de diamètre) x (classe de hauteur). Des taux d'échantillonnage un peu plus élevés ont été adoptés pour sélectionner les arbres des classes supérieures qui sont moins représentées. Un second passage de mesures dendrométriques détaillées a concerné les 75 arbres sélectionnés pour le cubage. Les mesures réalisées sur chacun des arbres sélectionnés ont porté sur les diamètres de la grume (tige principale) mesurés à 0,20 m et à 0,80 m de hauteur, puis à des intervalles de 0,5 m jusqu'à la découpe fin-bout de 0,7 cm de diamètre. Les branches de chaque arbre ont été dénombrées et numérotées. Le diamètre au niveau du point d'insertion de chaque branche avec la tige principale a été mesuré puis ceux de la même branche à 0,5 m d'intervalle jusqu'à la découpe fin-bout de 0,7 cm. Le volume de la grume (tige principale) et celui des branches de chaque arbre ont été calculés séparément selon la méthode des billons successifs (Rondeux, 1993). Le volume total bois fort de chaque arbre est égal à la somme du volume de sa tige principale et de celui de ses branches.

Tarifs de cubage globaux

Les tarifs de cubage globaux correspondent aux tarifs bois fort (BF) des grumes (tige principale) et des arbres entiers (tige principale et branches). Deux tarifs de cubage à une et à deux entrées ont été ajustés pour chaque type de volume (grume ou arbre entier). Le tarif de cubage à une entrée, plus facile à utiliser, permet de prédire le volume total BF d'un arbre entier ou de sa grume en fonction de son DHP. Le tarif à deux entrées, généralement plus précis, utilise comme variables exogènes, pour estimer le volume BF d'un arbre ou de sa grume, le DHP et la hauteur totale (H) de l'arbre en question (Rondeux, 1993).



Photo 2.

Arbre de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., coupé.
Zea oak tree, *Quercus canariensis* Willd., cut.
Photo T. Sghaier.

Les fonctions utilisées pour mettre en relation le volume d'un arbre ou de sa grume avec son DHP ou son DHP et sa hauteur H ont fait l'objet de plusieurs études sur diverses essences forestières (Thill et Palm, 1979 ; Palm, 1981 ; Vallet *et al.*, 2006 ; Tran-Ha *et al.*, 2007 ; Sghaier *et al.*, 2008, 2013 ; Goubi *et al.*, 2019).

Au total, 10 fonctions ont été testées pour la sélection des équations qui permettent de prédire le volume de la grume (tige principale) et le volume total d'un arbre *i*. Il s'agit des fonctions suivantes :

$$v_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.1})$$

$$v_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + a_3 D_i^3 + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.2})$$

$$v_i = a_0 D_i^{a_1} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.3})$$

$$v_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + a_3 D_i^2 H_i + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.4})$$

$$v_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + a_3 D_i^3 + a_4 D_i^2 H_i + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.5})$$

$$v_i = a_0 + a_1 D_i + a_2 D_i^2 + a_3 D_i^3 + a_4 H_i + a_5 D_i^2 H_i + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.6})$$

$$v_i = a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.7})$$

$$v_i = D_i^{(a_0 + a_1 H_i)} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.8})$$

$$v_i = a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.9})$$

$$v_i = \frac{\pi D_i^2 H_i}{4 \left(1 - \frac{1,3}{H_i}\right)} \left(a_0 + a_1 \frac{\sqrt{\pi D_i}}{H_i} + a_2 \frac{H_i}{\pi D_i} \right) + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.10})$$

Les trois premières fonctions (Eq.1 à Eq.3) sont relatives aux tarifs à une entrée, tandis que les sept dernières (Eq.4 à Eq.10) sont relatives aux tarifs à deux entrées. Les équations Eq.1 à Eq.7 sont des fonctions classiquement utilisées pour l'élaboration des tarifs de cubage d'arbres individuels (Thill et Palm, 1979 ; Palm, 1981). Les deux fonctions Eq.8 et Eq.9 ont été testées par Patricio *et al.* (2005) pour la modélisation de la biomasse aérienne des arbres individuels de châtaignier commun (*Castanea sativa* Mill.) dans le Nord-Ouest du Portugal. Lesdites fonctions ont été testées aussi pour le cubage du pin d'Alep dans les Aurès algériens par Goubi *et al.* (2019). La fonction Eq.10 a été utilisée par Deleuz *et al.* (2014) pour estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture ou la station.

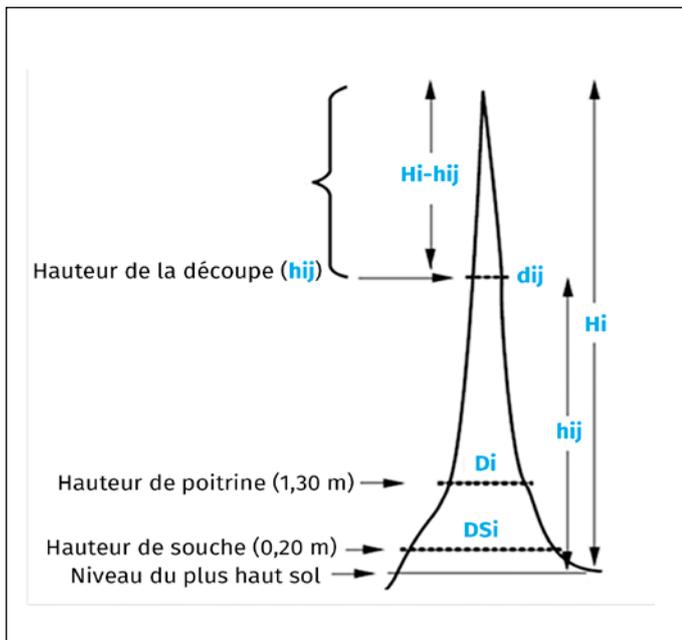


Figure 2.

Schéma d'une tige (i) et désignation des variables associées aux tarifs de cubage des volumes marchands aux différentes découpes (j).
Schematic of a stem (i) and designation of variables associated with cubing rates of merchantable volumes at different cuts (j).

Dans toutes ces équations, v_i représente le volume BF de la grume ou le volume total de l'arbre i (dm^3), D_i et H_i sont respectivement le DHP (en cm) et la hauteur H (en m) de l'arbre i et ε_i est un résidu, variable aléatoire de moyenne nulle et de variance σ^2 .

L'ajustement des différentes équations ou fonctions de cubage étudiées a été effectué à l'aide de la procédure REG du module SAS/STAT (SAS, 2004a) pour les fonctions linéaires (Eq.1, Eq.2, Eq.4 à Eq.6) ainsi que de la procédure MODEL du module SAS/ETS (SAS, 2004b) pour les fonctions non linéaires (Eq.3, Eq.7 à Eq.10).

Tarifs de cubage à diamètre et longueur variables des grumes (tarifs marchands)

Le cubage des grumes (tige principale) des 75 arbres échantillons a été réalisé par la méthode des billons successifs (Rondeux, 1993). Étant donné la faible longueur des billons (0,5 m), ces derniers ont été assimilés à un cylindre dont la base et la hauteur correspondent respectivement au diamètre moyen (moyenne des diamètres des deux bouts du billon) et à la longueur du billon. Le volume total de la grume est la somme des volumes de ses différents billons. La figure 2 décrit la codification et la désignation des variables dendrométriques associées aux tarifs de cubage des volumes marchands (tarifs à diamètre et longueur variables) de la grume d'un arbre.

Les 75 arbres échantillonnés ont donné naissance à 1 207 billons. Pour chaque arbre cubé, le volume total (v_i) de la grume de l'arbre i et les volumes cumulés vd_{ij} et vh_{ij} pour chaque découpe (j) de la même grume ont été calculés. Par la suite, les rapports Rvd_{ij} et Rvh_{ij} correspondant aux rapports des volumes cumulés vd_{ij} et vh_{ij} par rapport au volume total (v_i) de la grume (i) aux différentes découpes (j) ont été déterminés.

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

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

Les variables D_i et H_i correspondent au DHP et la hauteur H de l'arbre i . Les équations qui décrivent ces deux rapports de volume sont nombreuses dans la littérature (Burkhart, 1977 ; Cao et Burkhart, 1980 ; Van Deusen *et al.*, 1981 ; Fonweban et Houllier, 1997 ; Tasissa *et al.*, 1997 ; Prigent *et al.*, 2001 ; Bullock et Burkhart, 2003 ; Barrio Anta *et al.*, 2007).

Afin de choisir les meilleures fonctions qui permettent de prédire les deux rapports de volume Rvd et Rvh des grumes de chêne zéen en Tunisie, les fonctions suivantes relatives au rapport Rvd (Eq.11 à Eq.13) et celles relatives au rapport Rvh (Eq.14 à Eq.16) ont été ajustées et comparées. Les fonctions Eq.11 à Eq.13 expriment le rapport de volume (Rvd_{ij}) de la grume d'un arbre i jusqu'à un diamètre j en fonction de D_i (DHP) et de d_{ij} . Les fonctions Eq.14 à Eq.16 expriment le rapport de volume (Rvh_{ij}) de la grume d'un arbre i jusqu'à une hauteur j en fonction de la hauteur totale de l'arbre H_i et de h_{ij} . Les fonctions Eq.11 et Eq.15 ont

été utilisées par Fonweban et Houllier (1997) pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun, puis par Prégent *et al.* (2001) pour le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) au Québec. La fonction Eq.12 a été développée par Van Deusen *et al.* (1981) pour le pin à l'encens ou à torches (*Pinus taeda*) au sud des États-Unis, puis modifiée par Tasissa *et al.* (1997) pour la même espèce. La fonction Eq.13 a été développée par Burkhardt (1977) pour le pin à torches dans le sud des États-Unis. Finalement, la fonction Eq.14 a été élaborée par Cao et Burkhardt (1980) et la fonction Eq.16 par Bullock et Burkhardt (2003) toujours pour le pin à torches au sud des États-Unis. On peut vérifier que lorsque $d_{ij} = 0$ ou $h_{ij} = H_i$, c'est-à-dire lorsqu'on considère l'arbre entier, les rapports de volume (Eq.11 à Eq.16) seront égaux à l'unité et les volumes cumulés vd_{ij} et vh_{ij} seront égaux au volume total v_i .

$$Rvd_{ij} = 1 + b_0 \left(\frac{d_{ij}}{D_i} \right)^{b_1} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.11})$$

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

$$Rvd_{ij} = 1 + b_0 \left(\frac{d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.13})$$

$$Rvh_{ij} = 1 + b_0 \left(\frac{(H_i - h_{ij})^{b_1}}{H_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.14})$$

$$Rvh_{ij} = 1 + b_0 \left(\frac{H_i - h_{ij}}{H_i} \right)^{b_1} + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.15})$$

$$Rvh_{ij} = \exp \left(\frac{b_0 (H_i - h_{ij})^{b_1}}{H_i^{b_2}} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.16})$$

Les fonctions Eq.11 à Eq.16 ont été ajustées en considérant les rapports des volumes calculés à partir des volumes cumulés par pas de 0,5 m sur toute la longueur de la grume jusqu'au diamètre fin-bout de 7 cm divisés par le volume total de la grume. Étant donné que les grumes des arbres ont été cubées par billons successifs de faible longueur fixe (0,5 m) jusqu'à la découpe fin-bout 7 cm de diamètre, les diamètres début (à la base) et fin (di1 et di2) de chaque billon peuvent être les mêmes pour quelques billons successifs. Partant du principe que le diamètre du tronc diminue en fonction de la hauteur de l'arbre, et pour pouvoir appliquer les fonctions des rapports de volume, la longueur et le volume des billons successifs dont les deux diamètres début et fin sont égaux (di2 = di1) ont été cumulés de manière à obtenir des billons de longueurs variables avec des diamètres di2 toujours inférieurs à di1.

Vu le caractère longitudinal des données utilisées pour l'ajustement des équations relatives aux rapports des volumes (Eq.11 à Eq.16), c'est-à-dire des données répétées sur les mêmes grumes (arbres), il existe une autocorrélation entre les résidus successifs d'une même grume. Pour contrôler cette autocorrélation et augmenter la précision des estimations des paramètres des fonctions ajustées, un processus autorégressif sur les erreurs issues des observations en provenance d'un même arbre a été incorporé dans le

modèle d'ajustement des paramètres des différentes fonctions étudiées (Diéguez-Aranda *et al.*, 2006). Il s'agit de la fonction « structure autorégressive d'erreurs successives » CAR(x) donnée par :

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

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 $n^{\text{ième}}$ ordre autorégressif à estimer ;
- $h_{ij} - h_{i(j-n)}$ est la longueur du billon (en m) qui sépare la $j^{\text{ième}}$

de la $j^{\text{ième}} - n$ découpe de l'arbre i .

Pour corriger l'autocorrélation des résidus et déterminer l'ordre de la fonction CAR(x) à utiliser, des graphiques présentant les résidus de la variable explicative contre Lag-résidus de l'observation précédente de chaque arbre ont été examinés.

La figure 3 relative à la projection de Lag des résidus des rapports de volume Rvh_{ij} et Rvd_{ij} du bois fort des grumes en fonction des mêmes résidus issus des fonctions Eq.12 (Rvd_{ij}) et Eq.16 (Rvh_{ij}) ajustées sans tenir compte de la structure autorégressive des erreurs (première colonne), et en utilisant la structure autorégressive des erreurs de premier et de second ordre (deuxième et troisième colonnes, respectivement), montre que la structure de second ordre CAR(2) sur les résidus permet un contrôle total de l'autocorrélation entre résidus successifs d'un même arbre. Ainsi, une structure autorégressive de second ordre sur les résidus a été incorporée dans le processus d'estimation des paramètres des différentes fonctions des rapports de volume.

L'ajustement individuel des fonctions Eq.11 à Eq.16 relatives à la prédiction des rapports de volume Rvd_{ij} (rapport du volume jusqu'à un diamètre donné) et Rvh_{ij} (rapport de volume jusqu'à une hauteur donnée) de la grume a permis de retenir les fonctions Eq.12 pour le premier rapport et Eq.16 pour le second. La figure 4 illustre, pour un arbre de caractéristiques dendrométriques moyennes de l'échantillon, les valeurs observées et celles estimées à l'aide des deux fonctions retenues (Eq.12 et Eq.16).

Les tarifs de cubage à diamètre et longueur variables des grumes des arbres de chêne zéen résultent de la combinaison de la fonction retenue pour la prédiction du volume total v_i du bois fort des grumes (Eq.9) et celles relatives à la prédiction des deux rapports du même volume cumulé à diamètre variable Rvd_{ij} (Eq.12) et à hauteur variable Rvh_{ij} (Eq.16). Ainsi, les deux fonctions des rapports de volume Eq.12 et Eq.16 combinées à la fonction Eq.9 relative au volume total du bois fort de la grume donnent les deux fonctions des volumes cumulés vd_{ij} (volume cumulé de la grume jusqu'à un diamètre donné) et vh_{ij} (volume cumulé de la grume jusqu'à une hauteur donnée) suivantes:

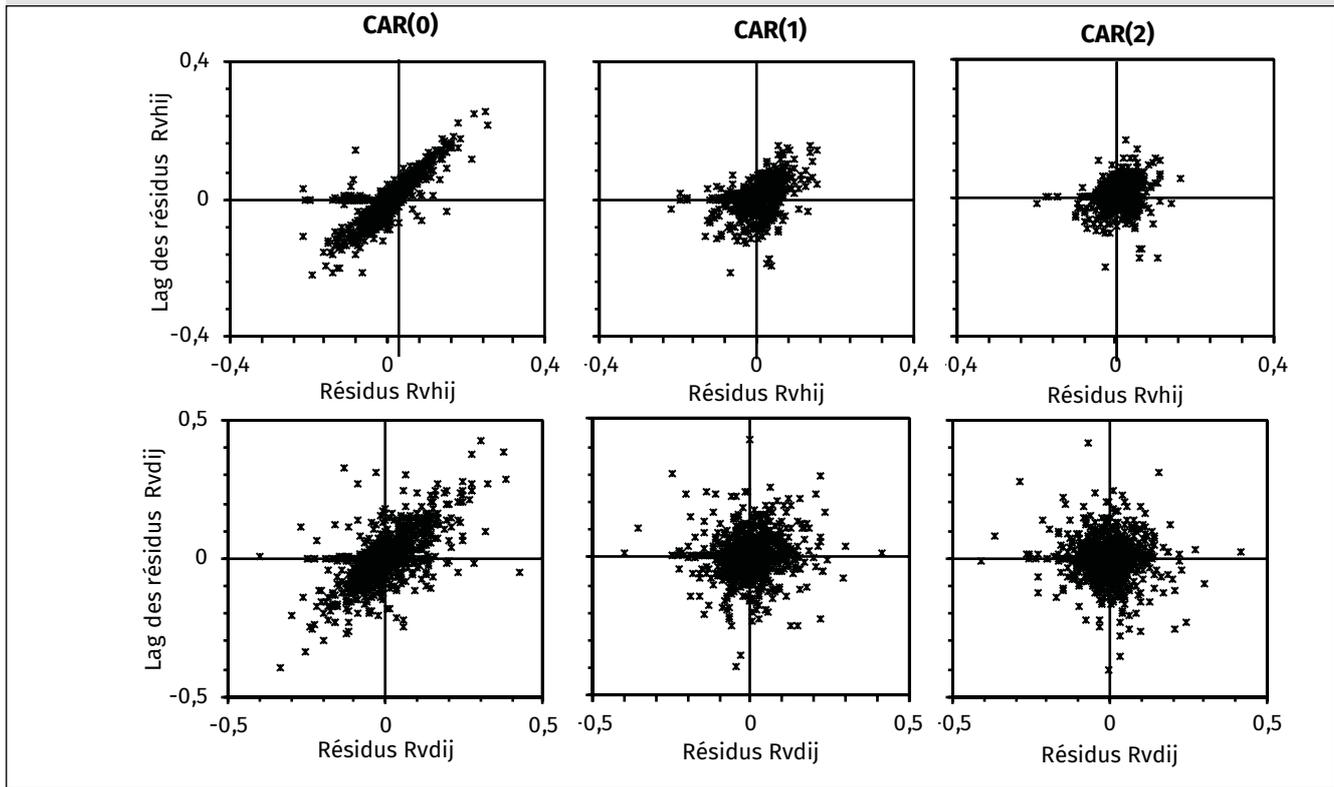


Figure 3.

Lag des résidus des rapports de volume à hauteur variable (Rvhij) et à diamètre variable (Rvdij) du bois fort des grumes d'arbres de chêne zéen, en fonction des résidus issus des fonctions Eq.12 (Rvdij) et Eq.16 (Rvhij) ajustées sans tenir compte de la structure autorégressive des erreurs (première colonne – CAR(0)), et en utilisant la structure autorégressive des erreurs de premier et de second ordre (deuxième : CAR(1) et troisième colonnes : CAR(2), respectivement).

Lag of the residuals of the variable height (Rvhij) and variable diameter (Rvdij) volume ratios of Zea oak logs as a function of the residuals from the functions Eq.12 (Rvdij) and Eq.16 (Rvhij) fitted without taking into account the autoregressive structure of the errors (first column - RAC(0)), and using the autoregressive structure of the errors of the first- and second-order (second: RAC(1) and the third column: RAC(2), respectively).

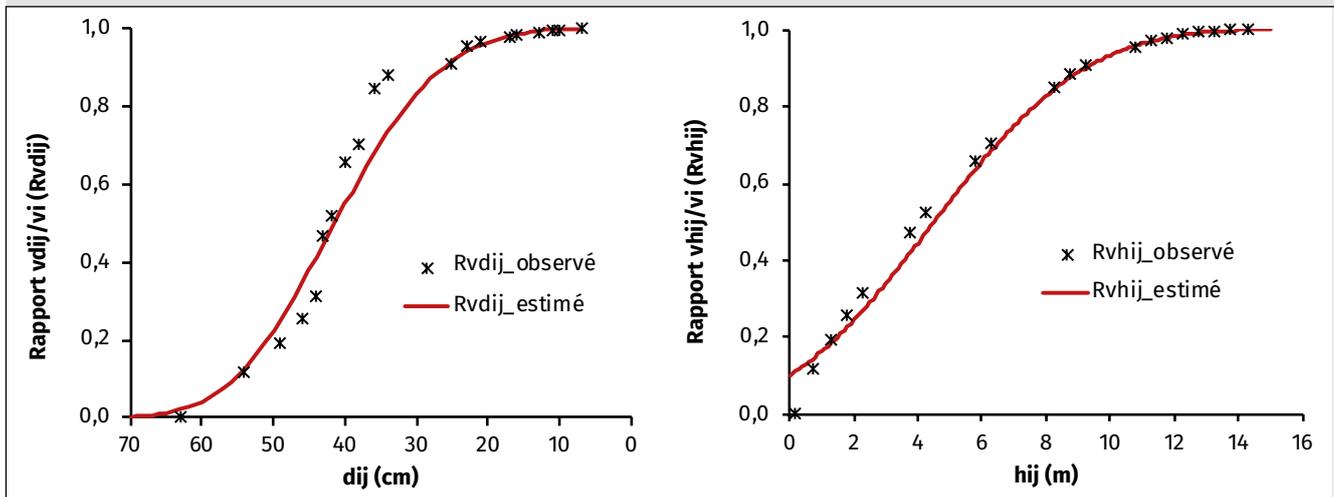


Figure 4.

Rapports de volumes observés et estimés pour un arbre échantillon (DS = 63 ; DHP = 49 cm ; H = 16,41 m ; HBF = 14,3 m). DS : diamètre de la souche ; DHP : diamètre à hauteur de poitrine ; H : hauteur totale de l'arbre ; HBF : hauteur bois fort.

Observed and estimated volume ratios for a sample tree (DS = 63; DBH = 49 cm; H = 16.41 m; HBF = 14.3 m). DS: stump diameter; DBH: diameter at breast height; H: total height of the tree; HBF: height of strong wood.

$$Rvd_{ij} = \frac{vd_{ij}}{v_i} \Rightarrow vd_{ij} = a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)} \times \exp\left(\frac{b_0 d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}}\right) + \varepsilon_{ij}$$

(Eq.17)

$$Rvh_{ij} = \frac{vh_{ij}}{v_i} \Rightarrow vh_{ij} = a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)} \times \exp\left(\frac{b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4}}{H_i^{b_5}}\right) + \varepsilon_i$$

(Eq.18)

Pour un niveau de coupe j donné de la grume d'un arbre i , caractérisé par un diamètre d_{ij} et une hauteur h_{ij} , les deux volumes cumulés vd_{ij} et vh_{ij} doivent être identiques. Ainsi, l'égalité des fonctions Eq.17 et Eq.18 permet de déterminer, d'une part, le diamètre d_{ij} de la grume i pour un niveau de coupe donné j en fonction de H_i , D_i et h_{ij} et, d'autre part, la hauteur h_{ij} de la grume au même niveau de coupe j en fonction de H_i , D_i et d_{ij} . Les fonctions Eq.19 et Eq.20 expriment ces deux relations :

$$d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} D_i^{b_2/b_1} ((H_i - h_{ij})^{b_4/b_1} / H_i^{b_5/b_1}) + \varepsilon_i$$

(Eq.19)

$$h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} (d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4}) + \varepsilon_i$$

(Eq.20)

Pour estimer les paramètres des fonctions Eq.17, Eq.18, Eq.19 et Eq.20 qui expriment les variables vd_{ij} , vh_{ij} , d_{ij} et h_{ij} , ces dernières ont été ajustées à l'aide du système d'équations simultanées S1 suivant :

$$S1: \begin{cases} d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} D_i^{b_2/b_1} ((H_i - h_{ij})^{b_4/b_1} / H_i^{b_5/b_1}) + \varepsilon_d & \text{(Eq.19)} \\ h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} (d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4}) + \varepsilon_{h_{ij}} & \text{(Eq.20)} \\ vd_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)}) \times \exp(b_0 d_{ij}^{b_1} / D_i^{b_2}) + \varepsilon_{vd_{ij}} & \text{(Eq.17)} \\ vh_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)}) \times \exp(b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4} / H_i^{b_5}) + \varepsilon_{vh_{ij}} & \text{(Eq.18)} \end{cases}$$

Pour résoudre le problème des dépendances entre les termes d'erreur des différentes équations du système S1, qui utilisent les mêmes variables indépendantes, la méthode d'ajustement utilisée est celle de régressions non linéaires sans corrélations apparentes (NSUR : *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations*) basée sur les moindres carrés généralisés (Zheng *et al.*, 2015). Un modèle autorégressif du second ordre CAR(2) sur les résidus de chaque équation du système a été incorporé dans la procédure d'ajustement afin de résoudre le problème des autocorrélations entre résidus successifs issus des observations réalisées sur un même arbre. Afin d'obtenir la même estimation du volume total BF de la grume par l'utilisation du tarif global (Eq.9) ou les tarifs à diamètre et longueur variables des volumes cumulés vd_{ij} et vh_{ij} (Eq.17 et Eq.18), les valeurs ajustées des paramètres a_0 , a_1 et a_2 sont considérées comme fixes et sont égales à celles estimées pour la fonction Eq.9 dans le cas du volume de la grume (tableau III). Ainsi, seules les valeurs des paramètres b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 et b_5 sont à esti-

mer par le système S1 d'équations simultanées dont les variables dépendantes sont d_{ij} , h_{ij} , vd_{ij} et vh_{ij} .

Critères de comparaison des fonctions ajustées

Différents critères statistiques basés sur des analyses numériques et graphiques des résidus ont été utilisés pour comparer les différentes équations ajustées (tarifs de cubage globaux et rapports de volume). Les analyses numériques ont concerné le biais qui correspond à la moyenne des résidus (valeurs observées – valeurs estimées), l'écart-type résiduel (RMSE), le coefficient de détermination R^2 ajusté et le test de Ryan-Joiner (Ryan et Joiner, 1976) relatif à la normalité de la distribution des résidus. Les analyses graphiques ont concerné la présentation des quantiles normaux (*QQ-probability plots*) des résidus.

Estimation des volumes totaux des arbres coupés et erreurs d'échantillonnage

Pour estimer les volumes totaux du bois des arbres coupés (volume des arbres entiers, volume des grumes et volume des branches), deux méthodes d'estimation ont été utilisées. Une première méthode basée sur la technique d'échantillonnage stratifié en considérant les classes de diamètre comme des strates, et une seconde méthode basée sur les modèles ajustés (tarifs de cubage globaux à une et à deux entrées et tarifs marchands).

Estimation par échantillonnage stratifié

Pour une population de N arbres répartis en M strates (classes de diamètre) de taille N_i ($i = 1, \dots, M$), un échantillon de taille n arbres répartis dans les M strates à raison de n_i arbres par strate est prélevé aléatoirement. On désigne par V_{ij} le volume mesuré du $j^{\text{ème}}$ arbre ($j = 1, \dots, n_i$) dans la $i^{\text{ème}}$ strate. Le taux d'échantillonnage ou la fraction sondée pour la strate i est le suivant :

$$f_i = \frac{n_i}{N_i}$$

Les estimations de la moyenne, la variance de l'échantillon et la variance de la moyenne au niveau de la strate i sont comme suit (Cochran, 1977) :

$$\bar{v}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} v_{ij}, \quad \hat{\sigma}_i^2 = \frac{1}{n_i - 1} \sum_{j=1}^{n_i} (v_{ij} - \bar{v}_i)^2 \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{\bar{v}_i}^2 = \frac{\hat{\sigma}_i^2}{n_i} (1 - f_i)$$

L'erreur standard de la moyenne au niveau de la strate i correspond à la racine carrée de la variance de la moyenne :

$$\hat{\sigma}_{\bar{v}_i} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_i^2}{n_i} (1 - f_i)}$$

Le volume total et l'erreur standard du volume total des N_i arbres de la strate i sont :

$$\hat{V}_i = N_i \times \bar{v}_i \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{V_i} = N_i \times \hat{\sigma}_{\bar{v}_i}$$

Tableau I.

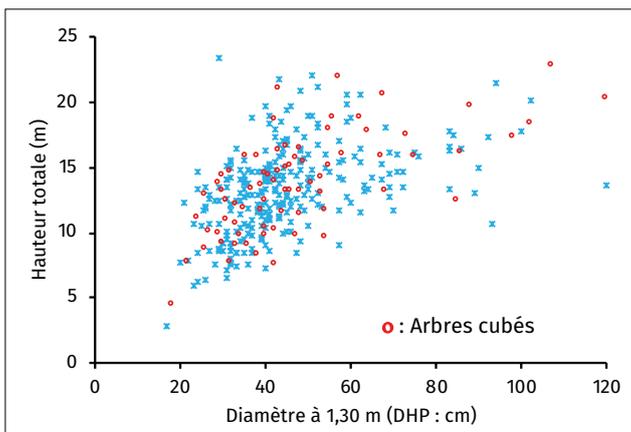
Répartition des 348 arbres de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., coupés par classe de diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m (DHP) et par classe de hauteur.
Distribution of 348 trees of Zea oak, *Quercus canariensis* Willd., cut by diameter class at breast height or 1.30 m (DBH) and by height class.

Classe de DHP (cm)	Classe de hauteur totale (m)								Total	
	< 8	[8-10[	[10-12[	[12-14[	[14-16[	[16-18[	[18-20[	≥ 20		
< 30	9	7	8	10	1				1	36
[30-40[	7	26	19	25	20	1	1			99
[40-50[	2	7	22	26	37	16	7	3		120
[50-60[		2	4	8	13	4	7	4		42
[60-70[			1	7	7	3	3	2		23
[70-80[			1	1	4	3				9
[80-90[				3		5	1			9
≥ 90			1	1	1	2	1	4		10
Total	18	42	56	81	83	34	20	14		348

Tableau II.

Statistiques descriptives des variables dendrométriques mesurées des 75 arbres de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., cubés.
Descriptive statistics of measured dendrometric variables of 75 cubed trees of Zea oak, *Quercus canariensis* Willd.

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Hauteur totale (H en m)	7,5	23,8	14,34	3,741
Hauteur bois fort (HBF en m)	5,8	22,8	13,01	3,724
Nombre de branches	0	50	10,65	9,195
Diamètre à 0,20 m (DS en cm)	30	144	60,24	22,755
Diamètre à 1,30 m (DHP en cm)	22	122	48,21	20,955
Volume des grumes (m ³)	0,138	10,563	1,483	1,740
Volume des branches (m ³)	0,000	4,718	0,475	0,782
Volume total (m ³)	0,145	15,280	1,958	2,470

**Figure 5.**

Projection de la hauteur en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des 348 arbres coupés de chêne zéen dont celle de l'échantillon des 75 arbres cubés (points rouges).
Projection of height versus diameter at breast height (DBH) of 348 cut Zea oak trees including the sample of 75 cubed trees (red points).

Le volume moyen estimé et l'erreur standard du volume moyen d'un arbre pour toute la population (N arbres) issus de l'échantillonnage stratifié se calculent comme suit :

$$\bar{v}_{st} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^M N_i \times \bar{v}_i \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_{\bar{v}_{st}} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^M N_i^2 \frac{\hat{\sigma}_i^2}{n_i} (1 - f_i)}$$

Le volume total estimé (\hat{V}) des N arbres de la population et l'erreur standard ($\hat{\sigma}_V$) du volume total sont les suivants :

$$\hat{V} = N \times \bar{v}_{st} \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_V = N \times \hat{\sigma}_{\bar{v}_{st}}$$

L'erreur d'échantillonnage du volume total (\hat{V}) des N arbres de la population qui correspond également au demi-intervalle de confiance du volume total estimé se calcule comme suit :

$$E = t_{1-\alpha/2} \hat{\sigma}_{\bar{v}_{st}}$$

où $t_{1-\alpha/2}$ est une variable de Student avec n-1 degrés de liberté.

L'erreur d'échantillonnage E peut être exprimée en pourcent du volume total estimé :

$$E\% = \frac{E}{\hat{V}} \times 100$$

Estimation par les modèles ajustés

Pour calculer l'erreur d'échantillonnage des estimations à partir d'un modèle (tarif de cubage) ajusté sur des données observées, on utilise l'écart-type résiduel (RMSE ou $\hat{\sigma}_r$) issu de l'ajustement de ce modèle. Soit \hat{v}_i le volume du bois d'un arbre estimé à partir d'un tarif de cubage dont l'écart-type résiduel estimé est $\hat{\sigma}_r$, le volume moyen calculé à partir des volumes de N arbres estimés à l'aide de ce tarif et l'erreur standard de ce volume moyen se calculent comme suit (Rondeux, 1993) :

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \hat{v}_i \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_v = \frac{\hat{\sigma}_r}{\sqrt{N}}$$

Le volume total (\hat{V}) des N arbres de la population estimé à l'aide du tarif de cubage et l'erreur standard ($\hat{\sigma}_V$) du volume total sont les suivants :

$$\hat{V} = \sum_{i=1}^N \hat{v}_i = N \times \bar{v} \quad \text{et} \quad \hat{\sigma}_V = N \times \hat{\sigma}_v$$

Les erreurs d'échantillonnage E et E% du volume total (\hat{V}) des N arbres de la population se calculent comme précédemment (échantillonnage stratifié).

Tableau III.

Valeurs estimées, signification des paramètres et précision des fonctions retenues pour le cubage à une et à deux entrées des grumes et des arbres entiers de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., en Tunisie.

Estimated values, significance of parameters and accuracy of selected functions for single and double entry cubing of logs and whole trees of Zeus oak, Quercus canariensis Willd., in Tunisia.

Partie de l'arbre	Type de tarif	Fonction	Par.	Estim.	ES	p > |t|	Biais (m ³)	RMSE (m ³)	R ² _{aj}
Grume	Une entrée	Eq.3	a0	1,52E-4	3,4E-5	< 0,0001	- 0,009	0,302	0,966
			a1	2,3087	0,0505	< 0,0001			
	Deux entrées	Eq.9	a0	2,93E-4	2,6E-5	< 0,0001	- 0,006	0,253	0,976
			a1	2,0006	0,0665	< 0,0001			
Arbre entier	Une entrée	Eq.3	a0	1,17E-4	3,0E-5	0,0002	- 0,010	0,447	0,961
			a1	2,4349	0,0573	< 0,0001			
	Deux entrées	Eq.9	a0	2,75E-5	6,0E-5	< 0,0001	0,009	0,342	0,978
			a1	2,0347	0,0683	< 0,0001			
			a2	0,0478	6,71E-3	< 0,0001			
			a2	0,0478	6,71E-3	< 0,0001			

Par. : paramètre ; Estim. : estimation ; ES : erreur standard ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne.

Tableau IV.

Tables de cubage à une et à deux entrées des grumes d'arbres de chêne zéen (volumes en m³).
Single and double entry cubing tables for Zea oak logs (volumes in m³).

Classe de DHP (cm)	DHP (cm)	Grumes Tarif à deux entrées CV% = 17,87										Tarif à une entrée CV% = 21,37
		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	0,077	0,082	0,089	0,096	0,103	0,111	0,119	0,128	0,138	0,149	0,079
20-30	25	0,213	0,229	0,246	0,265	0,286	0,308	0,331	0,356	0,384	0,413	0,257
30-40	35	0,417	0,449	0,483	0,520	0,560	0,603	0,649	0,699	0,752	0,810	0,558
40-50	45	0,689	0,742	0,799	0,860	0,926	0,997	1,073	1,155	1,244	1,339	0,997
50-60	55	1,030	1,109	1,194	1,285	1,383	1,489	1,603	1,726	1,858	2,001	1,584
60-70	65	1,438	1,549	1,667	1,795	1,932	2,080	2,240	2,411	2,596	2,795	2,330
70-80	75	1,915	2,062	2,220	2,390	2,573	2,770	2,982	3,210	3,456	3,721	3,242
80-90	85	2,460	2,649	2,851	3,070	3,305	3,558	3,831	4,124	4,440	4,780	4,328
90-100	95	3,073	3,309	3,562	3,835	4,129	4,445	4,785	5,152	5,546	5,971	5,596
100-110	105	3,754	4,042	4,352	4,685	5,044	5,430	5,846	6,294	6,776	7,295	7,050
110-120	115	4,504	4,849	5,220	5,620	6,051	6,514	7,013	7,550	8,128	8,751	8,698
120-130	125	5,321	5,729	6,168	6,640	7,149	7,697	8,286	8,921	9,604	10,340	10,544
130-140	135	6,207	6,683	7,195	7,746	8,339	8,978	9,665	10,406	11,203	12,061	12,594
140-150	145	7,161	7,710	8,300	8,936	9,620	10,357	11,151	12,005	12,924	13,914	14,853

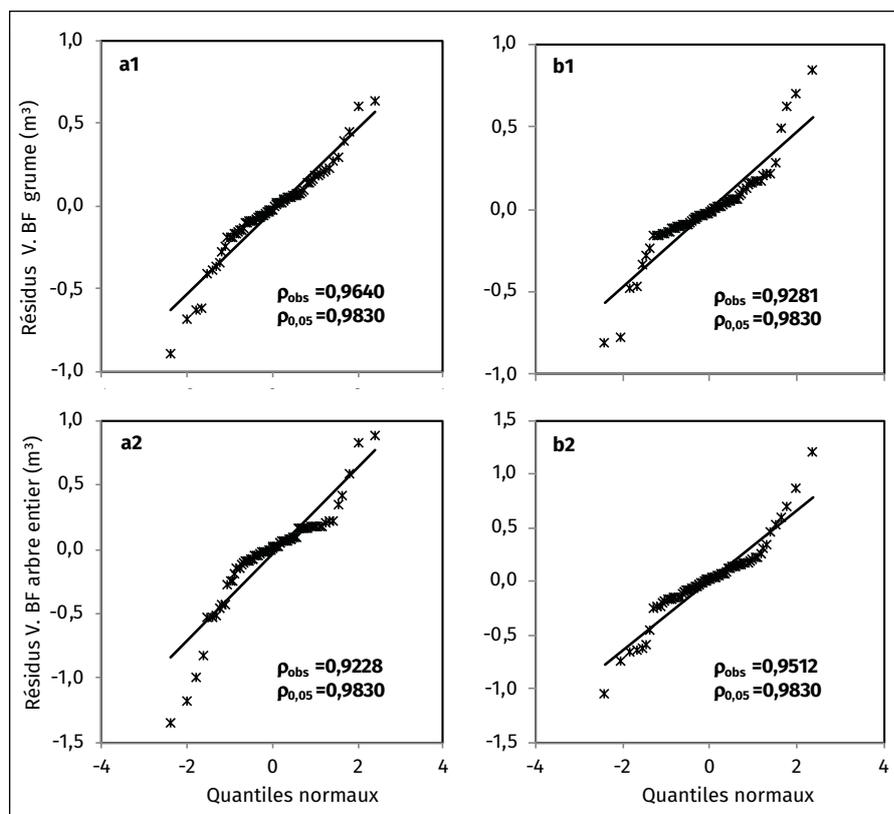
DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.

Tableau V.

Tables de cubage à une et à deux entrées des arbres entiers de chêne zéen (volumes en m³).
Single and double entry cubing tables for whole trees of Zea oak (volumes in m³).

Classe de DHP (cm)	DHP (cm)	Arbres entiers Tarif à deux entrées CV% = 18,23										Tarif à une entrée CV% = 23,86
		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	0,082	0,091	0,100	0,110	0,121	0,133	0,146	0,161	0,177	0,195	0,085
20-30	25	0,233	0,256	0,282	0,310	0,341	0,375	0,413	0,455	0,500	0,550	0,297
30-40	35	0,461	0,508	0,559	0,615	0,677	0,745	0,819	0,902	0,992	1,092	0,673
40-50	45	0,770	0,847	0,932	1,025	1,128	1,242	1,366	1,503	1,654	1,820	1,241
50-60	55	1,158	1,274	1,402	1,542	1,697	1,868	2,055	2,261	2,488	2,738	2,022
60-70	65	1,626	1,790	1,969	2,167	2,384	2,624	2,887	3,177	3,496	3,847	3,037
70-80	75	2,176	2,394	2,635	2,899	3,190	3,510	3,863	4,251	4,677	5,147	4,303
80-90	85	2,807	3,089	3,399	3,740	4,116	4,529	4,983	5,483	6,034	6,640	5,837
90-100	95	3,520	3,873	4,262	4,690	5,161	5,679	6,249	6,876	7,566	8,326	7,652
100-110	105	4,315	4,748	5,225	5,749	6,326	6,961	7,660	8,429	9,275	10,206	9,764
110-120	115	5,192	5,714	6,287	6,918	7,613	8,377	9,218	10,143	11,161	12,282	12,185
120-130	125	6,152	6,770	7,450	8,197	9,020	9,926	10,922	12,018	13,225	14,552	14,928
130-140	135	7,195	7,918	8,713	9,587	10,549	11,608	12,774	14,056	15,467	17,019	18,005
140-150	145	8,322	9,157	10,076	11,087	12,200	13,425	14,773	16,256	17,887	19,683	21,427

DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.

**Figure 6.**

Quantile-Quantile-probability plots et test de normalité (Ryan et Joiner, 1976) des résidus issus des tarifs de cubage à une entrée : Eq.3 (a1, a2) et à deux entrées : Eq.9 (b1, b2) des volumes totaux du bois fort (BF) des grumes et des arbres entiers de chêne zéen en Tunisie. Quantile-Quantile-probability plots and normality test (Ryan and Joiner, 1976) of residuals from single-entry: Eq.3 (a1, a2) and two-entry: Eq.9 (b1, b2) cubing rates of total volumes of Zea oak logs and whole trees in Tunisia.

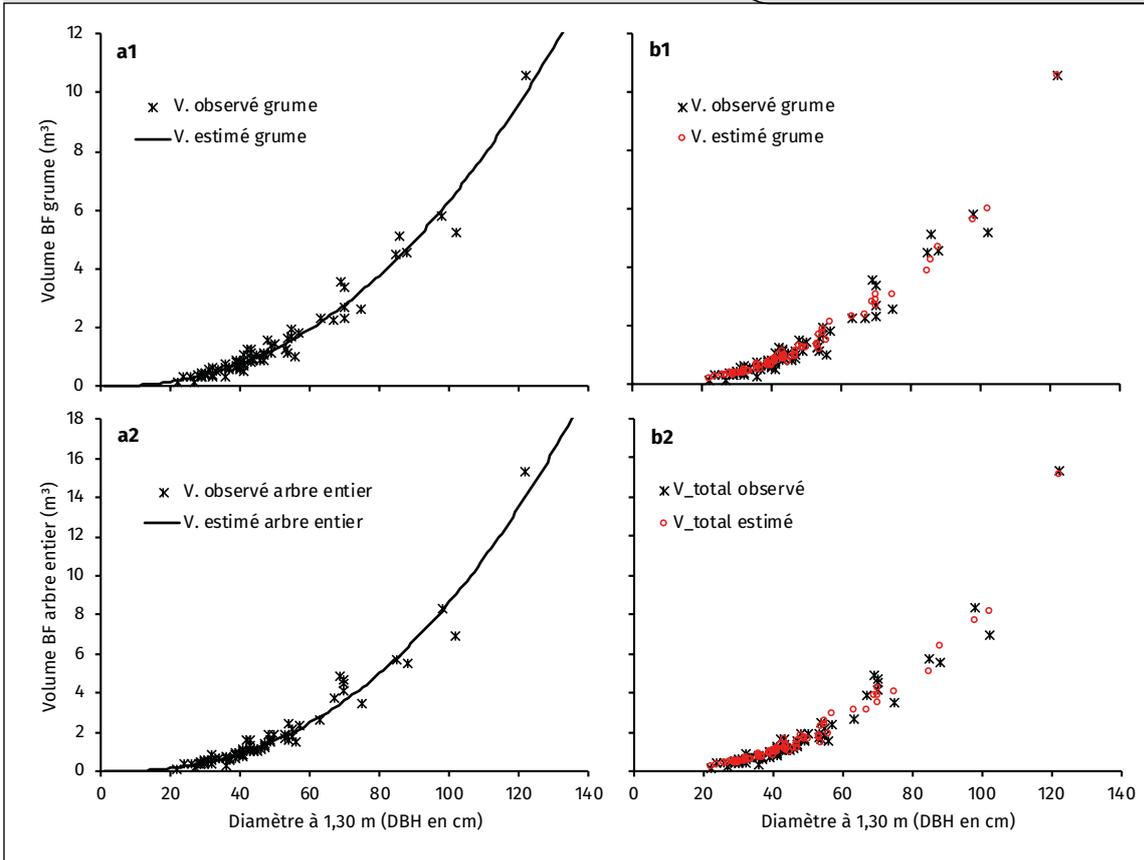


Figure 7. Volumes observés et estimés à l'aide des tarifs de cubage à une entrée (a1 et a2) à l'aide de la fonction Eq.3 et à deux entrées (b1 et b2) à l'aide de la fonction Eq.9 : volumes totaux du bois fort des grumes et des arbres entiers de chêne zéen en Tunisie.
Observed and estimated volumes using single-entry (a1 and a2) cubing rates using Eq.3 and two-entry (b1 and b2) cubing rates using Eq.9: total hardwood volumes of Zean Oak logs and whole trees in Tunisia.

Résultats

Caractérisation des arbres coupés et sélection d'un échantillon d'arbres à cuber

Selon l'inventaire exhaustif des arbres de chêne zéen coupés, 348 arbres entiers non encore abimés ont été recensés. Le tableau I présente la répartition par classe de DHP et par classe de hauteur totale des 348 arbres recensés.

La figure 5 montre la projection des 348 arbres disponibles en fonction de leur hauteur totale et de leur DHP dont celle des 75 arbres sélectionnés pour le cubage.

Les caractéristiques dendrométriques et les volumes des grumes, des branches et des arbres entiers des 75 tiges cubées figurent au tableau II.

Tarifs de cubage globaux : bois fort des grumes et des arbres entiers de chêne zéen

Les trois fonctions à une entrée (Eq.1 à Eq.3) et les six fonctions à deux entrées (Eq.4 à Eq.10) relatives aux tarifs de cubage globaux ont été ajustées sur les données issues des arbres cubés. Les mêmes fonctions ont été ajustées en

considérant une fois le volume total de l'arbre entier comme variable dépendante et une seconde fois en considérant le volume de la grume (tige principale sans tenir compte du volume des branches) comme variable dépendante. Sur la base des résultats obtenus (valeur et signification des paramètres) et des valeurs des différents critères de comparaison calculés (tableau III et figure 6), les deux fonctions Eq.3 (une entrée) et Eq.9 (deux entrées) ont été retenues pour la prédiction du volume BF des grumes et des arbres entiers de chêne zéen en Tunisie.

La projection des résidus issus des tarifs à une et à deux entrées retenue pour l'estimation du volume BF des grumes (figure 6 : a1 et a2) et de celui des arbres entiers (figure 6 : b1 et b2) en fonction des quantiles normaux montre que la distribution de ces résidus ne s'écarte pas trop loin d'une distribution normale.

La figure 7 présente la projection des valeurs observées issues des arbres cubés et celles estimées à l'aide des fonctions Eq.3 (tarifs à une entrée) et Eq.9 (tarifs à deux entrées) retenues pour l'estimation du volume BF des grumes et des arbres entiers.

Les tableaux IV et V présentent les tables de cubage à une et à deux entrées relatives aux volumes BF des

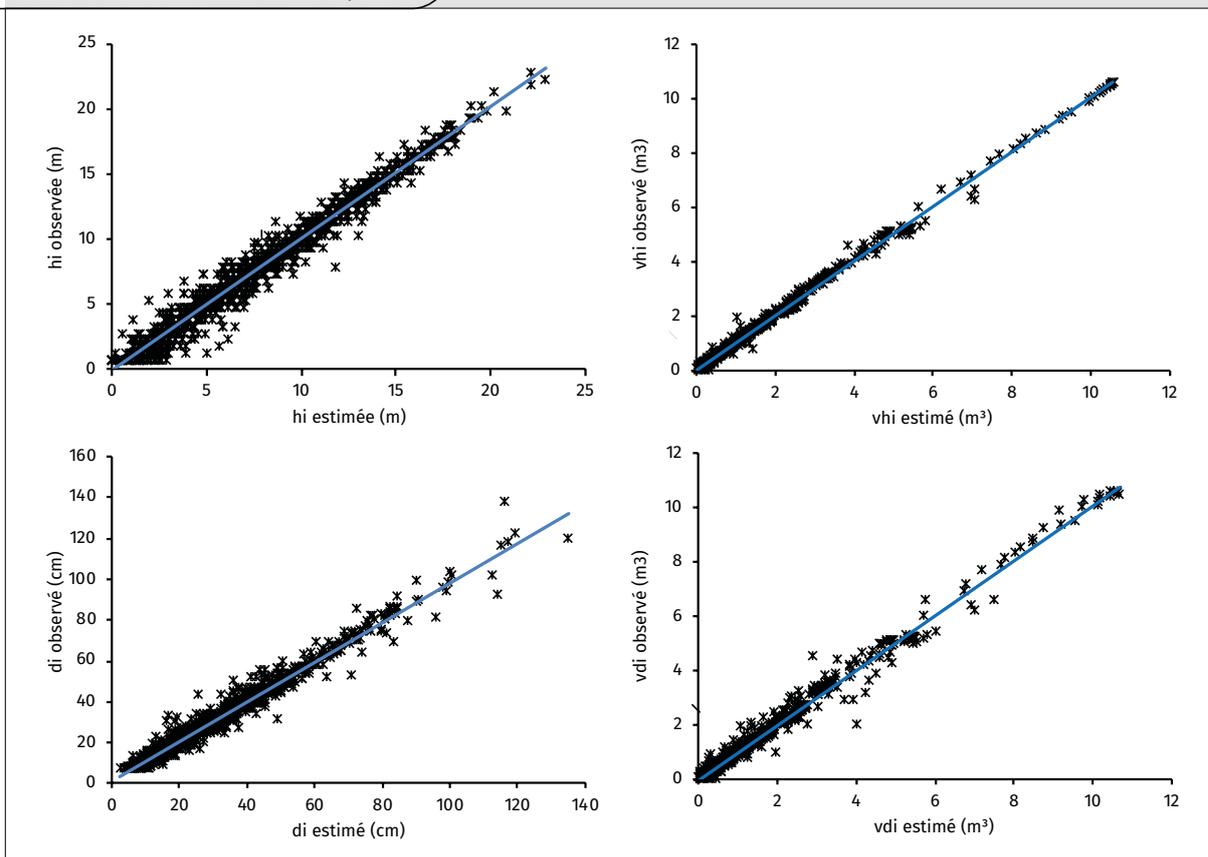


Figure 8.

Projection des valeurs observées en fonction des valeurs estimées à l'aide des différentes fonctions ajustées par le système d'équations simultanées (S1) relatives aux tarifs de cubage à diamètre et longueur variables. La droite bleue représente la droite de régression linéaire simple des valeurs observées en fonction des valeurs estimées.

Projection of observed values against estimated values using the different functions fitted by the simultaneous system of equations (S1) for variable diameter and length cubing rates. The blue line represents the simple linear regression line of the observed values against the estimated values.

grumes et des arbres entiers de chêne zéen générées par les fonctions Eq.3 et Eq.9 pour des classes de 10 cm de diamètre et de 2 m de hauteur.

Tarifs de cubage à diamètre et longueur variables

Le tableau VI fait apparaître les valeurs et les tests de signification des paramètres estimés (b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 et b_5) ; cependant, le tableau VII indique les précisions statistiques des différentes équations du système S1 ajusté (équations Eq.17 à Eq.20).

La figure 8 qui montre la relation entre les valeurs observées et celles estimées par les fonctions du système S1 relatives aux tarifs de cubage à diamètre et longueur variables permet d'apprécier la qualité des ajustements. La parfaite linéarité entre les valeurs observées et celles estimées confirme la bonne qualité des ajustements effectués.

Comme pour les tarifs de cubage globaux, des tables de cubage à diamètre et longueur variables des grumes peuvent être générées à partir des équations ajustées du système S1 (d_{ij} , h_{ij} , vd_{ij} et vh_{ij}). Les valeurs des paramètres de ces équations étant celles qui figurent dans le tableau III (tarif global à deux entrées de la grume : Eq.9)

pour les paramètres a_0 , a_1 et a_2 et le tableau VI pour les paramètres b_0 , b_1 , b_2 , b_3 , b_4 et b_5 . Deux cas de simulation sont possibles à l'aide de ces équations. On peut soit fixer le diamètre fin-bout de la grume d_{ij} et calculer la hauteur h_{ij} et le volume vh_{ij} correspondants, soit fixer la hauteur h_{ij} et calculer le diamètre fin-bout d_{ij} et le volume vd_{ij} correspondants. Dans la pratique, on adopte la première approche qui permet de fixer un diamètre marchand donné d_{ij} et de calculer la longueur ou la hauteur jusqu'à ce diamètre et le volume du bois de cette partie de la grume. Pour déterminer la longueur et le volume d'une portion de la grume située entre deux diamètres d_{i1} et d_{i2} ($d_{i1} > d_{i2}$), les hauteurs et les volumes de la grume aux deux niveaux de coupe h_{i1} , h_{i2} , vh_{i1} et vh_{i2} doivent être déterminés séparément, puis on calcule la différence entre les deux niveaux de mesure ($h_{i2} - h_{i1}$ et $vh_{i2} - vh_{i1}$). Il est à noter que, pour un même niveau de coupe j , les deux volumes vh_{ij} et vd_{ij} sont identiques. Le tableau VIII, qui peut être généré pour n'importe quel diamètre fin-bout de la grume, donne un exemple de table de cubage à longueur variable pour un diamètre fin-bout fixé à 20 cm. Deux conditions ont été imposées à la procédure de simulation :

- seules les grumes estimées dont la longueur h_{ij} est au moins égale à 10 cm apparaissent dans la table de cubage ;
- lorsque $d_{ij} \leq 7$ cm (diamètre fin-bout limite utilisé pour indiquer le bois fort de la grume d'un arbre), d_{ij} sera nul (0) et la table de cubage estimée sera identique à la table 3 relative au volume total du bois fort de la grume (tarif à deux entrées cas des grumes).

L'algorithme ci-après résume la procédure de simulation des tables de cubage pour des diamètres fin-bout variables :

Début :

- entrer les caractéristiques dendrométriques de l'arbre i , DS_i , Di , Hi ;
- entrer le diamètre fin-bout d_{ij} souhaité ;
- vérifier que $DS_i > Di$ et $d_{ij} \leq DS_i$.
- Si $d_{ij} \leq 7$ cm alors $d_{ij} = 0$;

○ calculer :

$$h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} (d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4})$$

- Si $h_{ij} \geq 10$ cm,

○ calculer : le volume jusqu'à h_{ij} :

$$vh_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)}) \times \exp(b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4} / H_i^{b_5})$$

○ ou le volume jusqu'à d_{ij} :

$$vd_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} e^{(a_2 H_i)}) \times \exp(b_0 d_{ij}^{b_1} / D_i^{b_2})$$

- Si non : $h_{ij} - v_{hij} = \ll * \gg$

Fin.

Discussion

Les tarifs à une entrée retenus pour l'estimation du volume BF de la grume et de l'arbre entier de chêne zéen en Tunisie ont tous les deux la forme d'une fonction puissance (Eq.3) qui exprime le volume en fonction du DHP avec des précisions de l'ordre de 97 % pour la grume et 96 % pour l'arbre entier. La même fonction puissance a été utilisée pour élaborer des tarifs de cubage à une entrée pour le pin pignon (*P. halepensis*) en Tunisie avec une précision de 93 % (Sghaier et al., 2013) et pour les plantations de pin maritime (*P. pinaster*) dans la région de Tazekka au Maroc avec une précision de 94 % (Alaoui et al., 2011). Toutefois et bien que le volume d'un arbre augmente généralement avec le diamètre du tronc, mesuré à 1,30 m du sol, le choix de ce type de tarifs à une entrée, plus simples et plus rapides à utiliser, est très délicat car la relation entre le volume et le diamètre pour une essence donnée évolue en fonction de la station, du type de peuplement et du stade de développement ou encore de l'âge des arbres (Prégent et al., 2001 ; Deleuze et al., 2014). Ainsi, des tarifs de cubage plus précis, dits à deux entrées, qui utilisent comme variables indépendantes

Tableau VI.

Valeurs et tests de signification des estimations des paramètres du système S1 d'équations simultanées relatives aux tarifs de cubage à diamètre et longueur variables. *Values and significance tests of parameter estimates of the S1 system of simultaneous equations for variable diameter and length cubing rates.*

Paramètre	Estimation	ES	p > |t|
b0	- 0,2055	0,0270	< 0,0001
b1	3,1706	0,0487	< 0,0001
b2	2,6823	0,0474	< 0,0001
b3	- 1,2171	0,1669	< 0,0001
b4	3,0470	0,0449	< 0,0001
b5	2,8569	0,0601	< 0,0001

ES : erreur standard.

pour estimer le volume BF d'un arbre le DHP et la hauteur totale de ce dernier ont été élaborés. Les deux tarifs à deux entrées, relatifs à l'estimation du volume BF des grumes et des arbres entiers du chêne zéen en Tunisie, proviennent de la fonction Eq.9 avec une précision de l'ordre de 98 % pour les deux tarifs (grume et arbre entier). La même fonction a été adoptée pour ajuster un tarif de cubage à deux entrées pour le pin d'Alep dans les Aurès algériens avec une précision de l'ordre de 98 % (Goubi et al., 2019) et pour les plantations de pin gris, *Pinus banksiana*, au Québec avec une précision de l'ordre de 99 % (Prégent et al., 2001). Du point de vue de l'utilisation, les tarifs à une entrée, moins précis mais plus faciles à mettre en œuvre, peuvent être utilisés en aménagement, tandis que les tarifs à deux entrées, plus précis et qui sont appelés également tarifs d'exploitation,

Tableau VII.

Précisions des tarifs de cubage à diamètre et longueur variables. *Precisions of cubing rates for variable diameter and length.*

Variable	Fonction	Paramètres	Biais	RMSE	R ² _{aj}
vdij (m ³)	Eq.17	a0, a1, a2, b0, b1, b2	0,0136	0,1823	0,9878
vhij (m ³)	Eq.18	a0, a1, a2, b3, b4, b5	0,0138	0,0997	0,9963
dij (cm)	Eq.19	b0, b1, b2, b3, b4, b5	0,2796	3,3170	0,9703
hij (m)	Eq.20	b0, b1, b2, b3, b4, b5	0,0453	0,8128	0,9702

RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne.

Tableau VIII.

Table de cubage : volumes marchands (m^3) bois fort (BF) des grumes d'arbres de chêne zéen pour un diamètre fin-bout $d_{ij} = 20$ cm. Longueur des grumes ≥ 10 cm.

Cubage table: market volumes (m^3) of strong wood (SW) logs of Zea oak trees for an end-to-end diameter $d_{ij} = 20$ cm. Log length ≥ 10 cm.

Classe de DHP	DHP (cm)	hij (m) vhij (m^3)	Hauteur totale des arbres (m)									
			4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
10-20	15	hij	*	*	*	*	*	0,21	0,37	0,54	0,73	0,93
		vhij	*	*	*	*	*	0,016	0,017	0,019	0,020	0,022
20-30	25	hij	1,28	2,03	2,79	3,58	4,39	5,20	6,03	6,87	7,71	8,56
		vhij	0,131	0,141	0,152	0,163	0,176	0,189	0,204	0,219	0,236	0,254
30-40	35	hij	1,98	3,04	4,13	5,23	6,34	7,46	8,59	9,72	10,86	12,01
		vhij	0,343	0,369	0,397	0,427	0,460	0,495	0,533	0,574	0,618	0,666
40-50	45	hij	2,38	3,63	4,90	6,18	7,46	8,76	10,06	11,36	12,67	13,99
		vhij	0,624	0,672	0,723	0,779	0,838	0,903	0,972	1,046	1,126	1,213
50-60	55	hij	2,64	4,01	5,40	6,79	8,20	9,61	11,02	12,44	13,86	15,29
		vhij	0,972	1,047	1,127	1,213	1,306	1,406	1,514	1,630	1,755	1,889
60-70	65	hij	2,83	4,29	5,76	7,23	8,72	10,21	11,70	13,20	14,70	16,20
		vhij	1,388	1,494	1,608	1,732	1,864	2,007	2,161	2,326	2,504	2,696
70-80	75	hij	2,97	4,49	6,02	7,56	9,11	10,66	12,21	13,77	15,33	16,89
		vhij	1,870	2,013	2,167	2,333	2,512	2,705	2,912	3,135	3,375	3,633
80-90	85	hij	3,07	4,65	6,23	7,82	9,41	11,00	12,61	14,21	15,81	17,42
		vhij	2,420	2,605	2,805	3,020	3,251	3,500	3,768	4,056	4,367	4,702
90-100	95	hij	3,16	4,77	6,39	8,02	9,65	11,28	12,92	14,56	16,21	17,85
		vhij	3,037	3,270	3,520	3,790	4,080	4,393	4,729	5,092	5,482	5,901
100-110	105	hij	3,23	4,88	6,53	8,19	9,85	11,51	13,18	14,85	16,53	18,20
		vhij	3,723	4,008	4,315	4,645	5,001	5,384	5,796	6,240	6,718	7,233
110-120	115	hij	3,29	4,96	6,64	8,33	10,01	11,70	13,40	15,09	16,79	18,49
		vhij	4,476	4,819	5,188	5,585	6,013	6,474	6,969	7,503	8,078	8,697
120-130	125	hij	3,34	5,04	6,74	8,44	10,15	11,87	13,58	15,30	17,02	18,74
		vhij	5,297	5,703	6,140	6,610	7,116	7,662	8,248	8,880	9,560	10,292

DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.

peuvent l'être pour la vente du bois sur pied (Sghaier *et al.*, 2013).

Étant donné les besoins très variables en ce qui concerne la connaissance de la longueur et la grosseur des grumes à transformer par l'industrie, l'utilisation des tarifs traditionnels devient insuffisante. Ainsi, d'autres tarifs basés sur des équations de défilement qui décrivent mathématiquement le profil des tiges d'arbres, connus aussi sous le nom de tarifs à « diamètre et longueur variables », ont été développés pour le chêne zéen dans le cadre de cette étude. Des tarifs similaires ont été élaborés ces deux dernières décennies pour différentes espèces forestières (Prégent *et al.*, 2001 ; Crecente-Campo *et al.*, 2009 ; Heidarsson et Pukala, 2011 ; Burkhart et Tomé, 2012 ; Calama *et al.*, 2012 ; Hjelm, 2013 ; Özcelik et Göçeri, 2015 ; Sghaier *et al.*, 2015 ; Lumbres *et al.*, 2016 ; Doyog *et al.*, 2017 ; Özcelik et Crecente-Campo, 2016 ; Tang *et al.*, 2017 ; Shahzad *et al.*, 2021). Grâce à un

système d'équations simultanées, quatre équations permettant d'estimer le diamètre de la grume jusqu'à une hauteur donnée, la hauteur de la grume jusqu'à un diamètre fin-bout donné, le volume cumulé de la grume jusqu'à un diamètre donné et enfin le volume cumulé de la grume jusqu'à une hauteur donnée ont été ajustées avec des précisions de l'ordre de 99 % pour les deux premières et de 97 % pour les deux dernières. La précision du tarif à hauteur/longueur variable (99,6 %) est légèrement meilleure que celle à diamètre variable (98,8 %). Néanmoins, les précisions obtenues dans cette étude s'apparentent à celles obtenues par Fonweban et Houllier (1997) pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun et par Prégent *et al.* (2001) pour les plantations de pin gris au Québec.

Pour illustrer les utilisations de ce système d'équations, nous avons choisi quelques arbres représentatifs mesurés dans la zénaie étudiée. Nous avons utilisé les quatre équations ajustées pour cette forêt pour l'estimation des différentes grandeurs de la grume (volume total et partiel, diamètre et lon-

gueur des billons). Le tableau IX contient les résultats de ces estimations qui concernent : le volume observé et le volume estimé de la grume jusqu'aux découpes 7 cm (découpe bois fort) ; les volumes jusqu'à différentes découpes de diamètre (Eq.17) ; les volumes jusqu'à différentes découpes en hauteur (Eq.18) ; le diamètre fin-bout pour une longueur de tige de 5 m (Eq.19) ; la longueur de la tige pour un diamètre fin-bout de 15 cm (Eq.20).

La figure 9 illustre la possibilité de prédire le profil des tiges avec la fonction de défilement ajustée (Eq.19).

La première valorisation pratique du système d'équations ajustées dans le cadre de cette étude a été sollicitée par l'administration forestière tunisienne. En effet, pour estimer la valeur du bois coupé avant de le mettre en vente par adjudication, l'administration forestière a demandé au comité scientifique de lui présenter des données chiffrées sur le volume total BF des arbres coupés ainsi que

les volumes et les caractéristiques (diamètre et longueur) des grumes qui peuvent intéresser les industriels du bois. Pour ce faire, les 348 arbres coupés ont été examinés arbre par arbre et leurs tiges principales ont été classées en deux catégories selon la qualité de bois, la forme de la tige et la présence ou l'absence des défauts qui affectent la qualité du bois, tels que l'attaque par des insectes xylophages, la pourriture du tronc, le nombre et le diamètre des nœuds par rapport à la longueur de la grume. Ainsi, une première catégorie de 301 arbres dont les tiges peuvent produire, en totalité ou en partie, du bois qui peut être valorisé par l'industrie a été identifiée. Les 47 arbres de la seconde catégorie, caractérisés par des tiges de mauvaise qualité de bois, seront utilisés pour le chauffage ou la production de charbon de bois. Les dimensions (diamètre et longueur) des billons qui peuvent donner un bois utile pour l'industrie ont été repérées et notées sur chacune des 301 tiges de la première catégorie.

Deux méthodes d'estimation des volumes totaux BF des grumes (tiges principales), des branches et des arbres entiers ont été utilisées (tableau X). Il s'agit d'une première estimation basée sur la technique d'échantillonnage strati-

Tableau IX.

Illustration des fonctionnalités du système d'équations pour sept arbres représentatifs de chêne zéen issus de la base de données étudiée : volumes observé et estimé de la tige ; volumes jusqu'à différentes découpes de diamètre (Eq.17) ; volumes jusqu'à différentes découpes en hauteur (Eq.18) ; diamètre fin-bout pour une longueur de tige de 5 m (Eq.19) ; longueur de la tige pour un diamètre fin-bout de 15 cm (Eq.20).
Illustration of the functionalities of the system of equations for seven representative Zea oak trees from the studied database: observed and estimated stem volumes; volumes up to different diameter cuts (Eq.17); volumes up to different height cuts (Eq.18); butt diameter for a stem length of 5 m (Eq.19); stem length for a butt diameter of 15 cm (Eq.20).

N° arbre	DHP (cm)	H (m)	V _{obs} (m³)	V _{Est.} (m³)	V _{d15} (m³)	V _{d35} (m³)	V _{d15-35} (m³)	V _{h5} (m³)	V _{h10} (m³)	V _{h5-10} (m³)	d _{h5} (cm)	h _{d15} (m)
108	122	22,8	10,563	10,144	10,116	9,737	0,379	3,596	6,939	3,343	96,99	20,25
112	70	17,3	2,308	2,725	2,692	2,272	0,419	1,300	2,343	1,043	54,50	14,09
187	67	15,3	2,264	2,319	2,287	1,890	0,397	1,257	2,139	0,882	49,47	12,32
126	57	19,8	1,814	1,981	1,939	1,445	0,494	0,818	1,540	0,722	48,45	15,43
122	41	14,3	0,726	0,837	0,794	0,390	0,404	0,486	0,794	0,309	31,46	10,00
12	36	12,4	0,612	0,601	0,559	0,204	0,355	0,400	0,593	0,193	25,72	8,18
20	30	11,3	0,480	0,401	0,356	0,069	0,287	0,290	0,400	0,110	20,54	6,76

V_{obs.} : volume observé ; V_{Est.} : volume estimé ; V_{d15} : volume jusqu'à 15 cm de diamètre ; V_{d35} : volume jusqu'à 35 cm de diamètre ; V_{d15-35} : volume du billon entre les découpes 15 et 35 cm ; V_{h5} : volume jusqu'à 5 m de hauteur ; V_{h10} : volume jusqu'à 10 m de hauteur ; V_{h5-10} : volume du billon entre 5 et 10 m de hauteur ; d_{h5} : diamètre de la tige à une hauteur de 5 m ; h_{d15} : hauteur de la tige jusqu'à la découpe 15 cm ; DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.

tifié en considérant les classes de diamètre comme des strates, et d'une seconde estimation à l'aide des deux tarifs globaux de cubage à une et à deux entrées développés dans cette étude. Pour l'estimation par les tarifs de cubage globaux, le volume des branches est obtenu par différence entre le volume des arbres entiers et celui des grumes. Le tableau X montre que les volumes estimés et les précisions des estimations dépendent de la méthode de prédiction utilisée. Les volumes totaux estimés par la méthode d'échantillonnage stratifié dépassent d'environ 5 % et 3 % ceux estimés par le tarif à une entrée, 10 % et 7 % ceux estimés par le tarif à deux entrées, pour respectivement les arbres entiers et les grumes (tiges principales). Les erreurs relatives des estimations des volumes BF des arbres entiers et des grumes sont respectivement de l'ordre de 2,44 % et 2,29 % pour le tarif à deux entrées ; 3,06 % et 2,65 % pour le tarif à une entrée ; 9,45 % et 8,84 % pour l'échantillonnage stratifié. Les tarifs à deux

Tableau X.

Volumes bois fort des 348 arbres entiers de chêne zéen coupés illicitement, estimés selon trois méthodes : échantillonnage stratifié, tarif global à une entrée et tarif global à deux entrées.

Timber volumes of 348 whole trees of Zea oak felled illegally, estimated by three methods: stratified sampling, single-entry block rate and two-entry block rate.

Composantes de volume	Échantillonnage stratifié		Tarif à une entrée		Tarif à deux entrées	
	Volume BF (m³)	Erreur relative (%)	Volume BF (m³)	Erreur relative (%)	Volume BF (m³)	Erreur relative (%)
Grumes	441,701	8,84	424,727	2,65	411,509	2,29
Branches	133,197	17,3	120,768	-	110,904	-
Arbres entiers	574,894	9,45	545,495	3,06	522,413	2,44

BF : bois fort.

Tableau XI.

Répartition par classe de DHP des volumes BF des grumes des 348 arbres entiers coupés estimés à l'aide du tarif global à deux entrées et des volumes et longueurs des billons formés par un bois de qualité estimés à l'aide des tarifs marchands.
Distribution by DBH class of the BF volumes of the logs of the 348 whole felled trees estimated using the global two-entry tariff and the volumes and length of the logs formed by quality timber estimated using the merchantable tariffs.

Classe de DHP (cm)	Nombre de tiges	Volume BF des grumes (m ³)	Caractéristiques des billons des grumes de qualité				
			Nombre de tiges	Longueur moyenne (m)	Longueur minimum (m)	Longueur maximum (m)	Volume (m ³)
< 30	36	10,638	32	5,7	1,0	9,0	6,331
[30 ; 40[	99	54,289	95	6,9	2,0	12,0	36,368
[40 ; 50[	120	113,753	114	7,6	3,3	15,0	71,447
[50 ; 60[	42	64,412	36	7,9	4,0	14,0	34,593
[60 ; 70[	23	50,754	14	8,8	3,0	14,8	20,337
≥ 70	28	117,664	10	11	7,5	14,0	26,416
Total	348	411,509	301	7,4*	1,0*	15,0*	195,492

DHP : diamètre à hauteur de poitrine ou 1,30 m.
* : longueur moyenne, minimale et maximale de l'ensemble des 301 billons formés par un bois de qualité.

entrées donnent les estimations les plus précises, et pour cela on recommande leur utilisation lorsque les deux paramètres dendrométriques (DHP et H) des arbres à cuber sont disponibles.

Le tableau XI présente, par classe de diamètre, le nombre et le volume total estimés par le tarif à deux

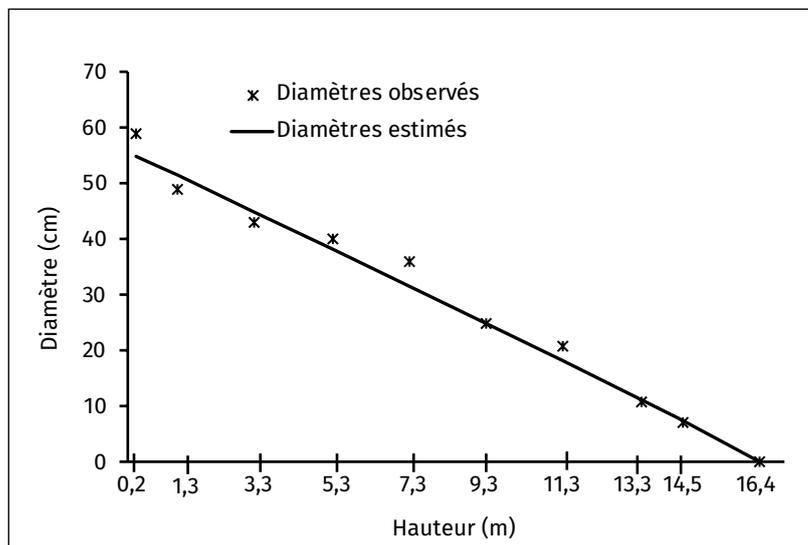
entrées du BF des grumes (Eq.9) des 348 arbres, ainsi que le nombre des grumes qui présentent un bois utile pour l'industrie du bois, les dimensions et le volume des billons de bois de qualité estimés à l'aide des tarifs marchands (Eq.17 à Eq.20).

Conclusion

Les tarifs de cubage traditionnels permettent en général de prédire le volume total bois fort (BF) d'un arbre entier ou de sa tige principale en fonction de son diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et de sa hauteur totale (H). En plus de ces paramètres, les tarifs de cubage élaborés dans le cadre de cette étude, grâce à un système d'équations simultanées, permettent de répondre à diverses exigences des utilisateurs de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., en Tunisie. Ces tarifs marchands sont aptes à prédire le BF jusqu'à n'importe quelle découpe sur la tige ou par assortiments (portions de tiges ou billons de diamètres limites différents). Il est également possible de prédire le diamètre fin-bout pour une longueur fixée de billon ou la longueur de billon pour un diamètre fin-bout fixé. Les exemples donnés illustrent ces possibilités. Les tarifs ajustés sont valables pour des tiges dont le DHP est situé entre environ 20 et 120 cm et dont la hauteur H se trouve entre environ 8 et 24 m.

Remerciements

Les auteurs remercient vivement tous les techniciens de l'Institut national de recherches en génie rural, eaux et forêts (INRGRF), de la Régie

**Figure 9.**

Profil d'une tige de chêne zéen issue de la base de données étudiée (DHP = 46 cm ; H = 16,41 m ; HBF = 14,5 m) : comparaison entre observations et prédictions (équation Eq.19). DHP : diamètre à hauteur de poitrine ; H : hauteur totale de l'arbre ; HBF : hauteur bois fort. Profile of a Zean Oak stem from the studied database (DBH = 46 cm ; H = 16.41 m ; DBH = 14.5 m) : comparison between observations and predictions (equation Eq.19). DBH : diameter at breast height ; H : total height of the tree ; HBF : height of strong wood.



Photos 3 et 4.

Mesures dendrométriques et cubage d'un arbre de chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd., coupé.
Dendrometric measurements and cubing of a cut Quercus canariensis Willd. tree.
Photos T. Sghaier.

d'exploitation forestière (REF) et de la Direction générale des forêts (DGF), ainsi que les agents de l'arrondissement forestier d'Ain Draham qui ont participé activement aux différents travaux de terrain (collecte de données, martelage et cubage des arbres coupés, etc.). Les auteurs remercient également les collègues H. Khachouri (REF), M. El Aieb (INRGREF), F. Aloui (ISPT) et N. Albouchi (CETIBA), qui ont contribué aux travaux de terrain par la classification du bois des grumes des arbres coupés selon la qualité.

Financement

Cette étude a été entièrement financée par les moyens propres de l'Institut national de recherches en génie rural, eaux et forêts (INRGREF), de la Direction générale des forêts (DGF) et de la Régie d'exploitation forestière (REF).

Conditions d'accès aux données

Les données de cette étude sont accessibles en adressant

préalablement une demande raisonnable auprès de l'auteur correspondant et en citant cet article.

Références

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 Üniversitesi, Orman Fakültesi Dergisi / Journal of Forestry Faculty*, 11 (1): 68-84. <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/159639>

Azizi T. G., 2018. Caractéristiques morphologiques et moléculaires en relation avec le milieu chez plusieurs variétés de cerisiers. Thèse de doctorat, Faculté des sciences de Tunis, 245 p. + annexes.

Barrio Anta M., Sixto Blanco H., Cañellas Rey de Viñas I.,

- González Antoñanzas F., 2007. Sistema de cubicación con clasificación de productos para plantaciones de *Populus x euramericana* (Dode) Guinier cv. 'I-214' en la meseta norte y centro de España. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 16 (1): 65-75. <https://doi.org/10.5424/srf/2007161-00998>
- Bouchon J., 1974. Les tarifs de cubage. Nancy, France, Engref, 57 p. + annexes
- Boudy P., 1955. Économie forestière nord-africaine. Tome 4 : Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Paris, France, Larose, 878 p.
- Bullock B. P., Burkhart H. E., 2003. Equations for predicting green weight of loblolly pine trees in the south. Southern Journal of Applied Forestry, 27 (3): 153-159. <https://doi.org/10.1093/sjaf/27.3.153>
- Burkhart H. E., 1977. Cubic-foot volume of loblolly pine to any merchantable top limit. Southern Journal of Applied Forestry, 1: 7-9. <https://doi.org/10.1093/sjaf/1.2.7>
- Burkhart H. E., Tomé M., 2012. Tree Form and Stem Taper. In: Burkhart H. E., Tomé M. (eds). Modeling Forest Trees and Stands. Dordrecht, Netherlands, Springer, 9-41. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-9_2
- Calama R., Sánchez-González M., Garchi S., Ammari Y., Cañellas I., Sghaier T., 2012. Towards the sustainable management of *Thuja (Tetraclinis articulata)* (Vahl.) Mast.) forests in Tunisia: models for main tree attributes. Forest Systems, 21 (2): 210-217. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2012212-02532>
- Cao Q. V., Burkhart H. E., 1980. Cubic-foot volume of loblolly pine to any height limit. Southern Journal of Applied Forestry, 4 (4): 166-168. <https://doi.org/10.1093/sjaf/4.4.166>
- Cochran W. G., 1977. Sampling techniques. 3rd ed. New York, USA, Wiley, 413 p.
- Crecente-Campo F., Rojo Alboreca A., Diéguez-Aranda U., 2009. A merchantable volume system for *Pinus sylvestris* L. in the major mountain ranges of Spain. Annals of Forest Science, 66: 808. <https://doi.org/10.1051/forest/2009078>
- 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>
- DGF, 2010. Inventaire des forêts par télédétection – Résultats du deuxième inventaire forestier et pastoral national. Tunis, Tunisie, Ministère de la Défense nationale, Ministère de l'Agriculture, des Ressources hydrauliques et de la Pêche et Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique, 195 p.
- Diéguez-Aranda U., Grandas-Arias J. A., Alvarez-Gonzalez J. G., Gadow K. V., 2006. Site quality curves for Birch Stands in North-Western Spain. Silva Fennica, 40 (4): 631-644. <https://doi.org/10.14214/sf.319>
- Doyog N. D., Lee Y. J., Lee S., 2017. Stem taper equation analysis for *Larix kaempferi* species in the Central Region of South Korea. Journal of Sustainable Forestry, 36 (8): 747-63. <https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1356737>
- Fonweban J. N., Houllier F., 1997. Tarifs de cubage et fonctions de défilement pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun. Annals of Forest Science, 54 : 513-528. <https://doi.org/10.1051/forest:19970602>
- 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 : 45-59. <https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31715>
- Hasnaoui B., 1992. Chênaies du Nord de la Tunisie : écologie et régénération. Thèse de doctorat en sciences naturelles, Université de Provence Aix-Marseille I, France, 186 p.
- Heidarsson L., Pukkala T., 2011. Taper functions for lodgepole pine (*Pinus contorta*) and Siberian larch (*Larix sibirica*) in Iceland. Icelandic Agricultural Sciences, 24: 3-11. https://ias.is/wp-content/uploads/Icelandic_Agricultural_Sciences_24_2011/Taper-functions-for-lodgepole-pine-Pinus-contorta.pdf
- Hjelm B., 2013. Stem taper equations for poplars growing on farmland in Sweden. Journal of Forestry Research, 24: 15-22. <https://doi.org/10.1007/s11676-012-0270-4>
- Jdaïd N., 2018. Structure des peuplements de la subéraie tunisienne : situation actuelle et devenir d'un écosystème. Institut sylvo-pastoral de Tabarka, Tunisie, 66 p. <https://www.memoireonline.com/06/12/5897/Structure-des-peuplements-de-la-suberaie-tunisiennesituation-actuelle-et-devenir-dun-eac.html>
- Lumbres R. I. C., Abino A. C., Pampolina N. M., Calora F. G., Lee Y. J., 2016. Comparison of stem taper models for the four tropical tree species in Mount Makiling, Philippines. Journal of Mountain Science, 13: 536-545. <https://doi.org/10.1007/s11629-015-3546-2>
- Mazeghrane O., Messaoud N., 1990. Contribution à l'analyse dendrométrique d'un peuplement naturel de chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans la forêt expérimentale de Tizi Oufellah (Beni-Ghobri). Mémoire d'ingénieur agronomie, Université Mouloud Mammeri, Algérie, 54 p.
- Mechergui K., Jaouadi W., Ammari Y., 2022. Le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) en Tunisie : Écologie, production, état de dégradation et les pratiques d'aménagement. Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires, 10 (1). https://www.agrimaroc.org/index.php/Actes_IAPH2/article/view/1075
- Özcelik R., Crecente-Campo F., 2016. Stem taper equations for estimating merchantable volume of Lebanon cedar trees in the Taurus Mountains, Southern Turkey. Forest Science, 62 (1): 78-91. <https://doi.org/10.5849/forsci.14-212>
- Özcelik R., Göçeri M. F., 2015. Compatible merchantable stem volume and taper equations for eucalyptus plantations in the Eastern Mediterranean Region of Turkey. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 39 (6): 851-863. <https://doi.org/10.3906/tar-1501-27>
- Palm R., 1981. Calcul et choix des équations de cubage d'arbres. Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux, 16 (4) : 351-370.
- Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie. Nancy, France, Engref, 328 p.
- Patrício M. S., Monteiro M. L., Tomé M., 2005. Biomass Equations for *Castanea sativa* High Forest in the Northwest of Portugal. In: Abreu C. G., Rosa E., Monteiro A. A. (eds). Proceedings of the IIIrd International Chestnut Congress. ISHS Acta Horticulturae 693. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.693.98>
- Prégent G., Savard F., Désaulniers G., 2001. Tarif de cubage à diamètre et hauteur variables d'utilisation pour le pin gris en plantation au Québec. Forêt Québec, Direction de la recherche forestière, Mémoire de recherche forestière, n° 139, 42 p. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/recherche/Memoire139.pdf>
- Quézel P., Médail F., 2003. Écologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Cachan, France, Lavoisier, 571 p.
- Rabhi K., 2011. Ajustement de modèles hauteur-circonférence-âge pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans la forêt d'Akfadou (Tizi Ouzou) ; effet de la densité et de la station. Mémoire de magister en foresterie. Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 68 p. <https://www.semanticscholar.org/paper/Ajustement-de-mod%C3%A8les-hauteur-%E2%80%93-circonf%C3%A9rence-%E2%80%93-%C3%A2ge-Rabhi/ca10d4afcf37126d14f29a45fd2b02680b629e06>
- Rondeux J., 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Gembloux, Belgique, Presses agronomiques de Gembloux, 521 p.
- Ryan T. A., Joiner B. L., 1976. Normal probability plots and tests for normality. Pennsylvania State University, 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., 2004a. SAS/STAT 9.1 Users's Guide. Cary, NC, USA, SAS Institute Inc.

SAS Institute Inc., 2004b. SAS/ETS 9.1 User's Guide. Cary, NC, USA, SAS Institute Inc.

Sghaier T., Sánchez-González M., Garchi S., Ammari Y., Cañellas I., Calama R., 2015. Developing a stand-based growth and yield model for Thuya (*Tetraclinis articulata* (Vahl) Mast.) in Tunisia. *iForest*, 9 (1): 79-88. <https://doi.org/10.3832/ifer1389-008>

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://search.emarefa.net/en/detail/BIM-356173-tables-de-cubage-pour-les-plantations-du-pin-pignan-pinus-pi>

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.academia.edu/34304033/ETUDE_ET_CHOIX_D_EQUATIONS_DE_CUBAGE_D_ARBRES_POUR_LE_PIN_D_ALEP_Pinus_halepensis_Mill_EN_TUNISIE

Shahzad M. K., Hussain A., Burkhart H. E., Li F., Jiang L., 2021. Stem taper functions for *Betula platyphylla* in the Daxing'an Mountains, northeast China. *Journal of Forestry Research*, 32: 529-541. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01152-4>

Tang C., Wang C. S., Pang S. J., Zhao Z. G., Guo J. J., Lei Y. C., et al., 2017. Stem taper equations for *Betula alnoides* in South China. *Journal of Tropical Forest Science*, 29: 80-92. <https://www.jstor.org/stable/44028277>

Tasissa G., Burkhart H. E., Amatesi R. L., 1997. Volume and taper equations for thinned and unthinned loblolly pine trees in cutover, site-prepared plantations. *Southern Journal of Applied Forestry*, 21 (3): 146-152. <https://doi.org/10.1093/sjaf/21.3.146>

Thibaut A., Rondeux J., Claessens H., 1998. Tarifs de cubage pour l'Aulne glutineux (*Alnus glutinosa*) en Belgique méridionale. *Revue Forestière Française*, 50 (3) : 244-250. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03443633/document>

Thill A., Palm R., 1979. Étude dendrométrique des chênes indigènes (*Quercus robur* L. et *Quercus petraea* (Mttuschka) Lieblein). *Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux*, 14 (3-4) : 267-284. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/117068>

Tran-Ha M., Perrotte G., Cordonnier T., Duplat P., 2007. Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France. *Revue Forestière Française*, 59 (6) : 609-624. <https://dx.doi.org/10.4267/2042/16781>

Vallet P., Dhôte J.-F., Le Moguédec G., Ravart M., Pignard G., 2006. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 229 (1-3): 98-110. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.03.013>

Van Deusen P. C., Sullivan A. D., Matvey T. G., 1981. A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. *Southern Journal of Applied Forestry*, 5 (4): 186-189. <https://doi.org/10.1093/sjaf/5.4.186>

Zheng C., Mason E. G., Jia L., Wei S., Sun C., Duan J., 2015. A single-tree additive biomass model of *Quercus variabilis* Blume forests in North China. *Trees*, 29: 705-716. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1148-1>

Sghaier et Ammari – Contribution des auteurs

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	T. Sghaier, Y. Ammari
Gestion des données	T. Sghaier
Analyse formelle	T. Sghaier
Acquisition du financement	T. Sghaier, Y. Ammari
Enquête et investigation	T. Sghaier, Y. Ammari
Méthodologie	T. Sghaier
Gestion de projet	T. Sghaier, Y. Ammari
Ressources	• INNRGREF. • Ministère de l'Agriculture des Ressources hydrauliques et de la Pêche
Logiciels	T. Sghaier
Supervision	T. Sghaier, Y. Ammari
Validation	T. Sghaier
Visualisation	T. Sghaier
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	T. Sghaier
Écriture – Révision et édition	T. Sghaier, Y. Ammari

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 - ISSN : L-0006-579X