

# Développement des équations de volume total et des volumes à diamètre et longueur variables des grumes d'arbres individuels du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie

Iheb ESSOUSSI<sup>1</sup>  
Tahar SGHAIER<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF)  
Rue Hédi EL Karray El Menzah IV  
BP 10 2080 Ariana  
Tunisie

**Auteur correspondant /**  
**Corresponding author:**  
Tahar SGHAIER –  
[sghaiertahar@iresa.agrinet.tn](mailto:sghaiertahar@iresa.agrinet.tn)

**Photo 1.**  
Arbre de pin maritime, *Pinus pinaster*, coupé dans une placette de mesure et débité en billons de 0,50 m de longueur pour le cubage du bois fort de la tige principale. *Maritime pine (Pinus pinaster) tree cut in a measurement plot and cut into 0.50 m long logs for cubing the large timber of the main stem.*  
Photo : I. Essoussi.



**Doi :** 10.19182/bft2024.359.a37165 – Droit d'auteur © 2024, Bois et Forêts des Tropiques – © Cirad – Date de soumission : 29 mai 2023 ; date d'acceptation : 17 octobre 2023 ; date de publication : 29 février 2024.



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

## Citer l'article / To cite the article

Essoussi I., Sghaier T., 2024. Développement des équations de volume total et des volumes à diamètre et longueur variables des grumes d'arbres individuels du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie. Bois et Forêts des Tropiques, 359 : 5-25. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2024.359.a37165>

## RÉSUMÉ

### Développement des équations de volume total et des volumes à diamètre et longueur variables des grumes et longueur variables des grumes d'arbres individuels du pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie

Des tarifs de cubage globaux et marchands ont été développés pour le pin maritime (*Pinus pinaster*) en Tunisie. Les données utilisées proviennent de 90 arbres échantillonnés dans la forêt artificielle de pin maritime localisée dans les régions du Nord et du Nord-Ouest du pays. La technique d'ajustement adoptée est celle de régression non-linéaire sans corrélation apparente (NSUR : *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations*), basée sur les moindres carrés généralisés. Pour corriger l'autocorrélation observée entre les erreurs successives issues des observations en provenance d'une même tige, un processus autorégressif d'ordre 3 sur ces erreurs a été incorporé dans le modèle d'ajustement des paramètres des différentes équations étudiées. Les tarifs de cubage développés permettent de prédire avec un coefficient de corrélation  $R^2$  ajusté variant de 97 à 99 % : (i) le volume total du bois fort des grumes jusqu'à une découpe quelconque, (ii) le volume entre deux niveaux de la grume, et (iii) le diamètre à une hauteur donnée ainsi que la hauteur à un diamètre de découpe donné de la grume. Grâce à ces tarifs, des tables de cubage d'estimation des volumes globaux et marchands des grumes d'arbres individuels de pin maritime ont été générées. Les équations de volume élaborées dans le cadre de cette étude représentent des outils flexibles, précis et pratiques pour la gestion adéquate des forêts de pin maritime en Tunisie et dans le bassin méditerranéen.

**Mots-clés :** *Pinus pinaster*, pin maritime, tarifs globaux, tarifs marchands, régression, Tunisie.

## ABSTRACT

### Development of equations of total volume and volumes of logs with variable diameter and length for individual maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) tree in Tunisia

Equations for total and commercial volumes were developed for maritime pine (*Pinus pinaster*) in Tunisia. The data used are from 90 sampled trees in *P. pinaster* forest plantations located in the north and north-west of the country. Nonlinear Seemingly Unrelated Regression (NSUR), based on the generalized least squares method, was used to fit the system of volume table equations. To take the inherent autocorrelation of the longitudinal data into account, a third-order continuous-time autoregressive error structure was used, which allows equations to be applied to irregularly spaced, unbalanced data. With an adjusted  $R^2$  determination coefficient ranging from 97 to 99%, the fitted volume equations can estimate: (i) the volume of the stem (large timber) before a specified cut, (ii) the volume between two levels of the stem, and (iii) the diameter at a given height as well as the height at a given diameter of the stem. Thanks to these equations, volume tables were generated to estimate total and commercial stem volumes for individual trees of *P. pinaster*. The volume equations developed through this study offer precise, practical, and flexible tools for efficient management of the *P. pinaster* forests in the Tunisian and Mediterranean basin contexts.

**Keywords:** *Pinus pinaster*, total volume equations, commercial volume equations, regression, Tunisia.

## RESUMEN

### Desarrollo de las ecuaciones de volumen total y de volúmenes con diámetro y longitud variables de los troncos de árboles individuales de pino marítimo (*Pinus pinaster* Ait.) en Túnez

Se han calculado tablas volumétricas globales y comerciales para el pino marítimo (*Pinus pinaster*) en Túnez. Los datos utilizados proceden de 90 árboles muestreados en el bosque artificial de pino marítimo situado en las regiones del norte y noroeste del país. Se adoptó como técnica de ajuste la regresión no lineal sin correlación aparente (NSUR: *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations*), basada en los mínimos cuadrados generalizados. Para corregir la autocorrelación observada entre los errores sucesivos provenientes de las observaciones realizadas en un mismo tallo, se incorporó un proceso autorregresivo de tercer orden sobre estos errores al modelo de ajuste de los parámetros de las diferentes ecuaciones estudiadas. Las tablas volumétricas desarrolladas permiten predecir con un coeficiente de correlación  $R^2$  ajustado que varía del 97 al 99 %: (i) el volumen total de madera dura de los troncos hasta un corte especificado; (ii) el volumen entre dos niveles del tronco, y (iii) el diámetro a una altura determinada, así como la altura a un diámetro de corte determinado del tronco. Mediante estas tablas, se generaron las tablas para estimar los volúmenes globales y comerciales de los troncos de árboles individuales de pino marítimo. Las ecuaciones de volumen elaboradas en el marco de este estudio representan herramientas flexibles, precisas y prácticas para la gestión adecuada de los bosques de pino marítimo en Túnez y en la Cuenca del Mediterráneo.

**Palabras clave:** *Pinus pinaster*, pino marítimo, tablas globales, tablas comerciales, regresión, Túnez.

## Introduction

Les équations de volume, appelées encore tarifs de cubage, sont devenues des outils indispensables d'aide à la décision dans le domaine de gestion et d'aménagement des peuplements forestiers. Ce sont des outils de prédiction indirecte du volume total (V) du bois fort (BF) d'un arbre qui recourent à des variables disponibles et faciles à mesurer. Parmi les variables les plus utilisées, on peut citer le diamètre du tronc à hauteur de poitrine (DHP) ou à 1,30 m de hauteur et la hauteur totale (H) de l'arbre (Rondeux, 1993).

Les tarifs de cubage classiques peuvent être groupés en deux catégories. On trouve, d'une part, les tarifs dits à une entrée qui permettent de prédire le volume d'un arbre en tenant compte uniquement de son DHP et, d'autre part, les tarifs à deux entrées qui expriment le volume du même arbre en tenant compte du DHP et de H (Bouchon, 1974). Bien que plus simples et plus rapides à ajuster et utiliser, les tarifs à une entrée sont moins précis que les tarifs à deux entrées. L'un des points faibles des tarifs de cubage à une entrée est que la relation entre le DHP et la hauteur d'un arbre dépend fortement de l'âge, ce qui limite leur utilisation (Pardé et Bouchon, 1988). Même pour des arbres d'âges identiques, la relation entre le DHP et la hauteur peut varier selon les caractéristiques et le système de conduite des peuplements forestiers.

Comme en régression, la précision des tarifs de cubage dépend entre autres du nombre de variables indépendantes ou exogènes utilisées dans cette régression. De ce fait, la précision d'un tarif de cubage peut être améliorée en considérant plus de variables dendrométriques pour l'estimation du volume d'un arbre. Ainsi, des tarifs à trois variables peuvent être ajustés, quoique sur le plan pratique, leur utilisation ne soit pas recommandée car ils demandent des mesures supplémentaires plus coûteuses et plus difficiles à réaliser (Rondeux, 1993). En plus du DHP et de la hauteur, on peut par exemple utiliser une troisième variable dendrométrique telle que la hauteur à un diamètre donné ou le diamètre à une hauteur donnée.

D'autres types de tarifs de cubage, moins connus, peuvent également être développés, tels les tarifs paramétrés. En plus des variables dendrométriques habituelles utilisées dans le cas des tarifs classiques, les tarifs paramétrés utilisent une variable supplémentaire qui décrit certaines caractéristiques moyennes du peuplement, tel le rapport de la hauteur sur le DHP des arbres dominants. D'après Prégent *et al.* (2001), les tarifs paramétrés permettent d'avoir un aperçu de la forme de la tige à cuber tout en minimisant les coûts de la prise de mesures.

Les tarifs de cubage, dits tarifs classiques ou tarifs globaux, permettent en général d'estimer le volume 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 (Sghaier et Ammari, 2022). Des tarifs de cubage globaux ont été développés pour quelques espèces résineuses en Tunisie et ont concerné principalement le pin d'Alep (*Pinus hale-*

*pensis*) (Sghaier *et al.*, 2008), le pin pignon (*Pinus pinea* L.) (Sghaier *et al.*, 2013) et le thuya (*Thuja* sp.) (Calama *et al.*, 2012).

Étant donné que l'utilisation des tarifs de cubage globaux est souvent limitée aux estimations par les gestionnaires forestiers des volumes totaux des arbres dans le cadre des programmes d'aménagement et/ou d'exploitation des peuplements forestiers, d'autres types de tarifs de cubage dits tarifs commerciaux ou marchands ont été développés pour satisfaire des exigences de l'industrie du bois (Sghaier et Ammari, 2022). Ce sont des tarifs de cubage plus flexibles basés sur l'utilisation des fonctions de rapport de volumes et qui permettent de prédire le volume de bois jusqu'à des découpes prédéterminées (Sghaier et Ammari, 2022 ; Prégent *et al.*, 2001 ; Thibaut *et al.*, 1998 ; Fonweban et Houiller, 1997). À ce sujet, plusieurs fonctions permettant d'exprimer le rapport de volumes jusqu'à une découpe voulue (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) et utilisées récemment par Sghaier et Ammari (2022) pour le chêne zéen (*Quercus canariensis*) en Tunisie.

La combinaison des équations des rapports de volumes avec celle relative à l'estimation du volume total (V) de la tige d'un arbre, permet 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 Houiller, 1997). Il est également possible de générer des équations de défilement de la tige à partir des équations des rapports de volumes en considérant l'égalité de ces deux rapports pour un niveau de coupe fixé (d et h connus). 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,  $h = f(D, H, d)$ . Le champ d'application des fonctions de défilement est vaste, et l'on peut citer l'exemple d'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 Houiller, 1997). Pour augmenter la précision des tarifs globaux et ceux à longueur et diamètre variables, le tarif global à deux entrées a été ajusté en premier lieu, puis, les valeurs des paramètres de ce dernier ont été utilisées comme fixes lors de l'ajustement des autres paramètres du système d'équations de défilement.

Cette étude visait à élaborer des tarifs de cubage globaux et des tarifs marchands pour le pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie. Les données utilisées dans cette étude proviennent de 79 placettes temporaires de mesures réparties sur l'ensemble des plantations du pin maritime au nord et au nord-ouest du pays. Ces tarifs serviront comme

outils indispensables pour les gestionnaires forestiers pour optimiser les plans d'aménagement et de gestion soutenable des différents peuplements de cette espèce en Tunisie en particulier et dans les pays voisins de la rive sud de la Méditerranée en général.

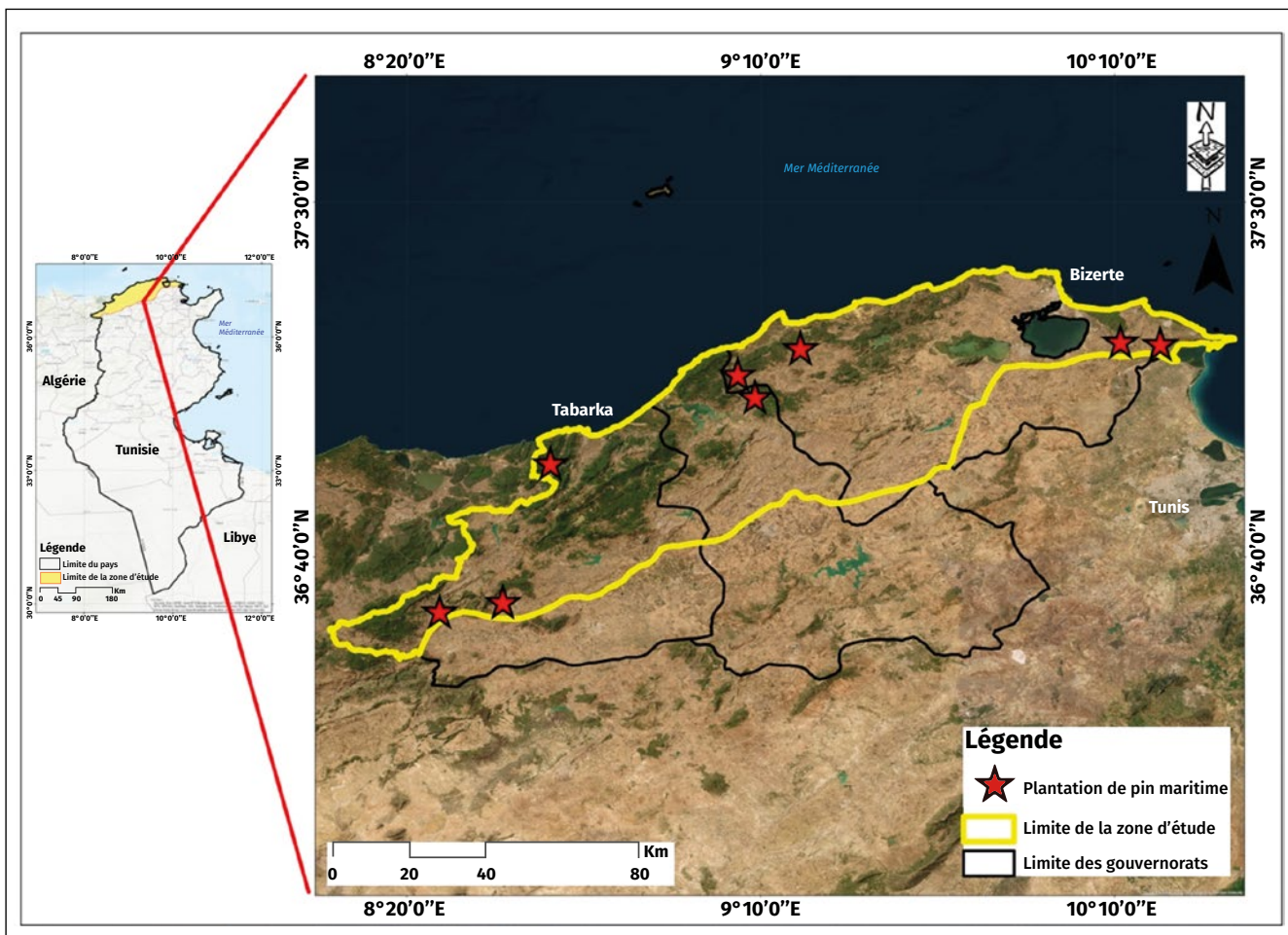
## Matériel et méthodes

### Les forêts de pin maritime en Tunisie

Le pin maritime (*P. pinaster* Ait.) est un conifère de la famille des Pinaceae qui peut atteindre 30 m de hauteur et un diamètre de 1,2 m (Alia et Martin, 2011). Il arrive à maturité vers 40-50 ans, et peut vivre jusqu'à 500 ans (Pépinières de l'Atlantique, 2023). Il s'agit d'une essence forestière originaire du bassin méditerranéen (Tunisie, Maroc, Algérie) qui pousse naturellement dans les zones bioclimatiques subhumides et humides fraîches, avec des hivers doux à chauds et des températures douces tout au long de l'année. Le pin maritime exige des précipitations annuelles de l'ordre de 800 à 1 000 mm et tolère les températures supérieures à 40 °C pendant une longue période, mais supporte mal les froids très rigoureux et durables (Pépinières de l'Atlantique, 2023).

D'après les résultats du premier inventaire forestier national en Tunisie (DGF, 1995), le pin maritime se trouve essentiellement dans la zone littorale du nord et nord-ouest du pays (figure 1) et couvre environ 3 811 ha incluant des forêts naturelles et artificielles. Il occupe à l'état spontané une petite zone (1 185 ha) située entre Tabarka et la frontière algérienne. Les surfaces actuellement couvertes de pin maritime, en dehors de son aire naturelle, sont localisées dans les gouvernorats de Bizerte (1 248 ha), Béja (678 ha) et Jendouba (700 ha). Il a été introduit depuis le début du vingtième siècle, sur les zones côtières de Tabarka, puis à partir des années 1950 comme espèce pour la fixation des dunes littorales de Kroumirie et des Mogods (Shaiek *et al.*, 2010).

La zone d'étude où l'on trouve le pin maritime sous forme de peuplements issus de reboisements est située au nord et nord-ouest de la Tunisie, couvrant les trois gouvernorats (Beja, Jendouba et Bizerte). C'est une zone forestière montagneuse avec des niveaux altitudinaux très contrastés. Les zones forestières les plus élevées se situent du côté de la frontière tuniso-algérienne et peuvent atteindre 1 200 m d'altitude. La partie centrale de la Kroumirie constitue la région des altitudes moyennes tandis que les zones les moins hautes, situées à seulement quelques mètres du niveau de la mer, se trouvent sur les dunes littorales tout le long des côtes nord de Tabarka à Bizerte (Selmi, 1985).



**Figure 1.**

Carte de répartition géographique des peuplements artificiels de pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) en Tunisie.  
Geographical distribution map of artificial stands of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Tunisia.

### Données collectées

Les données de cubage utilisées pour l'ajustement des différents tarifs proviennent de 79 placettes temporaires de forme circulaire et de rayon variable (8,7 à 25 m), comportant chacune 40 tiges avec un DHP > 7 cm. Ces placettes d'échantillonnage sont réparties de façon à couvrir la diversité des milieux biogéographiques dans lesquels le pin maritime existe sous forme de plantations dont l'âge varie de 43 à 69 ans. L'arbre dominant de chaque placette a été coupé au niveau de la souche (0,30 m) puis sa grume a été tronçonnée en billons de 0,50 m de longueur jusqu'à la découpe marchande de 7 cm de diamètre. En outre, le diamètre de l'extrémité supérieure de chaque billon a été mesuré pour calculer le volume des différents billons de la grume (tige principale) en utilisant la méthode des billons successifs (Rondeux, 1993). Le volume total bois fort de chaque grume est égal à la somme du volume de ses billons.

Comme le premier échantillon ne renferme que les arbres dominants des placettes de mesure dont le DHP a varié de 18 à 61 cm et afin de tenir compte de toutes les classes de diamètre disponibles dans l'ensemble des 79 placettes de mesure, un échantillon complémentaire de 11 arbres avec un DHP variant de 13 à 23 cm a été sélectionné dans les mêmes placettes de mesure. Les 11 arbres complémentaires ont été également coupés, tronçonnés en billons de 0,50 m de longueur et cubés. La figure 2 présente la projection, en fonction du DHP, du volume BF et de la hauteur totale des 79 arbres dominants de chaque placette et ceux des 11 arbres complémentaires choisis dans les mêmes placettes de mesure.

### Tarifs de cubage globaux

Les tarifs de cubages totaux correspondent aux tarifs bois fort (BF) des grumes (tige principale). Deux tarifs de cubage à une et à deux entrées ont été ajustés pour prédire le volume BF des grumes de pin maritime.

Pour élaborer des tarifs de cubage totaux qui permettent de prédire le volume bois fort d'un arbre  $i$  ou celui de sa grume (tige principale) pour le pin maritime en Tunisie, nous avons ajusté et testé un total de neuf équations couramment utilisées dans la littérature. Il s'agit des équations suivantes :

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

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

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

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

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

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

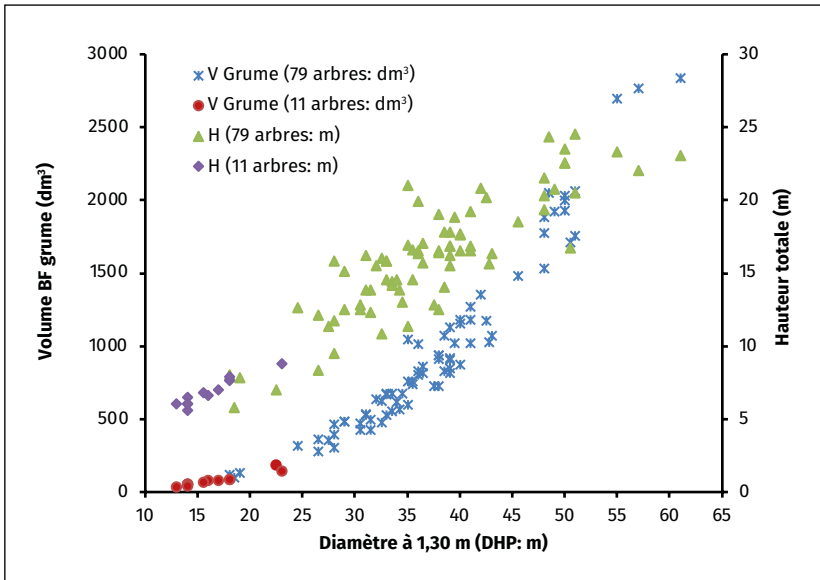
$$V_i = a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2} + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.7})$$

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

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

Dans ces équations,  $V_i$  représente le volume BF de la grume de l'arbre  $i$  ( $\text{dm}^3$ ),  $D_i$  et  $H_i$  sont respectivement le DHP (en cm) et la hauteur  $H$  (en m) de l'arbre  $i$  et  $\varepsilon_i$  est un résidu, variable aléatoire de moyenne nulle et de variance  $\sigma^2$ .

Ces équations ou tarifs peuvent être groupés en deux catégories distinctes, les tarifs à une entrée (Eq.1 à Eq.3) qui expriment le volume en fonction d'une seule caractéristique de l'arbre (DHP), et les tarifs à deux entrées (Eq.4 à Eq.9) qui expriment le volume en fonction de deux caractéristiques de l'arbre (DHP et  $H$ ). 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 ; Sghaier *et al.*, 2008, 2013 ; Sghaier et Ammari, 2022). Les deux fonctions Eq.8 et Eq.9 ont été testées par Tomé *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, puis par Sghaier et Ben Abdallah (2022) pour la modélisation de la biomasse aérienne des arbres individuels de jeunes peuplements de pin pignon et du pin maritime en Tunisie. Les fonctions Eq.8 et Eq.9 ont été également testées pour le cubage du



**Figure 2.**

Projection du volume bois fort (BF) et de la hauteur totale des 79 arbres dominants de pin maritime (*Pinus pinaster*) de chaque placette, et ceux des 11 arbres complémentaires en fonction de leur diamètre à hauteur de poitrine (DHP).

Projection of the large timber volume (BF) and total height of the 79 dominant maritime pine (*Pinus pinaster*) trees in each plot, and those of the 11 additional trees according to their diameter at breast height (DHP).

pin d'Alep dans les Aurès algériens par Goubi *et al.* (2019) et pour le cubage de chêne zéen dans le nord-ouest de la Tunisie par Sghaier et Ammari (2022).

Un autre problème commun inhérent à la construction des équations de volume est l'hétérogénéité élevée de la variance des erreurs qui augmente avec la dimension des arbres cubés (Rondeux, 1993 ; Barrio Anta *et al.*, 2007). Dans ces équations, il est souvent supposé que la variance de l'erreur ( $\sigma_i^2$ ) peut être exprimée comme une fonction puissance de la variable  $D^2$  ou  $D^2H$  (Furnival, 1961 ; Cailliez, 1980) :  $\sigma_i^2 = (D_i^2)^m$ . La valeur du paramètre  $m$  peut être calculée par la méthode suggérée par Harvey (1976, cité par Parresol, 1993) qui consiste à employer les erreurs obtenues par l'équation de cubage ( $\hat{\varepsilon}_i^2$ ), en tant que variable dépendante dans la modélisation de la variance de l'erreur :  $\hat{\varepsilon}_i^2 = \gamma (D_i^2)^m$ . L'homoscédasticité des résidus n'étant pas respectée, la fonction suivante de pondération des erreurs (Barrio Anta *et al.*, 2007) a été incorporée dans la procédure d'ajustement des paramètres de chacune des neuf équations étudiées (Eq.1 – Eq.9) :

$$\hat{\varepsilon}_i = \hat{\varepsilon}_i / \sqrt{(D_i^2)^m}$$

L'ajustement des différentes équations de cubage ainsi que celui de pondération des erreurs a été effectué à l'aide de la procédure MODEL du module SAS/ETS (SAS, 2004) où le volume  $V$  est la variable dépendante du modèle.

### Rapports de volumes

Étant donné la faible longueur des billons (0,5 m) issus des analyses de tiges, ces derniers ont été assimilés à un cylindre dont la base et la hauteur correspondent respectivement au diamètre moyen (moyenne des dia-

mètres 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 3 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 90 arbres échantillonnés ont donné naissance à 2 310 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 volumes pour un arbre ( $i$ ) aux différentes découpes ( $j$ ) ont les formes suivantes :

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

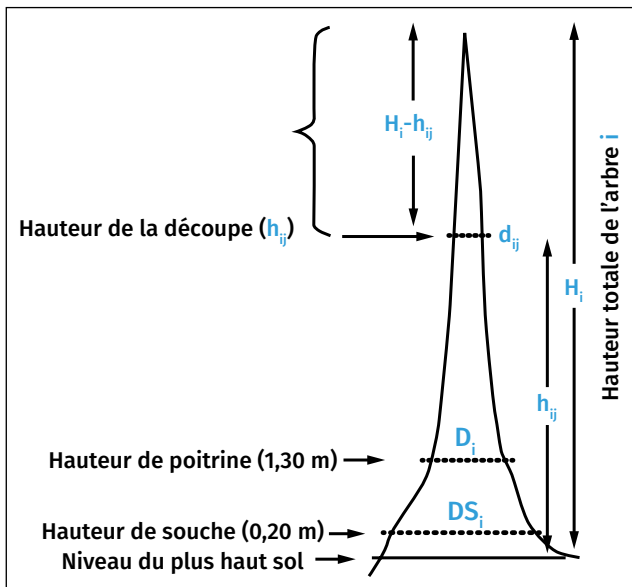
Pour choisir les fonctions qui permettent de mieux prédire les deux rapports de volumes  $Rvd$  et  $Rvh$  des grumes des arbres de pin maritime en Tunisie, trois fonctions relatives au rapport  $Rvd$  (Eq.10, Eq.11 et Eq.12) et trois autres fonctions relatives au rapport  $Rvh$  (Eq.13, Eq.14 et Eq.15) ont été ajustées et comparées. Les trois premières fonctions Eq.10, Eq.11 et Eq.12 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 trois autres fonctions Eq.13, Eq.14 et Eq.15 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.10 et Eq.14 ont été utilisées par Fonweban et Houllier (1997) pour *Eucalyptus saligna* au Cameroun, puis par Prégent *et al.*, (2001) pour le pin gris (*P. banksiana* Lamb.) au Québec. La fonction Eq.11 a été développée par Van Deusen *et al.* (1981) pour le pin à l'encens ou à torches (*P. taeda*) au sud des États-Unis, puis modifiée par Tasissa *et al.* (1997) pour la même espèce. La fonction Eq.12 a été développée par Burkhart (1977) pour le pin à torches dans le Sud des États-Unis. Finalement la fonction Eq.13 a été développée par Cao et Burkhart (1980) et la fonction Eq.15 par Bullock et Burkhart (2003), toujours pour le pin à torches au sud des États-Unis. Plus récemment, Sghaier et Ammari (2022) ont utilisé les équations Eq.11 et Eq.15 pour le chêne zéen en Tunisie.

Il est facile de vérifier que lorsque  $d_{ij} = 0$  ou  $h_{ij} = H_i$ , c'est-à-dire lorsqu'on considère l'arbre entier, les rapports de volumes (Eq.10 à Eq.15) seront égaux à l'unité et les volumes cumulés  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$  seront égaux au volume total  $V_i$  :

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

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

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



**Figure 3.**

Schéma d'une tige  $i$  et désignation des variables associées aux tarifs de cubage des volumes marchands aux différentes découpes  $j$ .

Diagram of a stem  $i$  and designation of the variables associated with the cubage rates of the merchantable volumes at the different cuts  $j$ .

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

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

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

Les fonctions Eq.10 à Eq.15 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. Comme les grumes des arbres ont été cubées par billons successifs de faible longueur fixe (0,5 m) jusqu'à la découpe fin-bout de 7 cm de diamètre, les diamètres début (à la base) et fin ( $d_{i1}$  et  $d_{i2}$ ) 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 volumes, la longueur et le volume des billons successifs dont les deux diamètres début et fin sont égaux ( $d_{i2} = d_{i1}$ ) ont été cumulés de manière à obtenir des billons de longueurs variables avec des diamètres  $d_{i2}$  toujours inférieurs à  $d_{i1}$  (Sghaier et Ammari, 2022).

Pour résoudre le problème d'autocorrélation qui existe entre les résidus successifs d'une même grume à cause des mesures répétées sur le même arbre et augmenter la précision des estimations des paramètres des fonctions ajustées (Eq.10 à Eq.15), 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 de ces fonctions (Diéguez-Aranda *et al.*, 2006). Il s'agit de la fonction « structure autorégressive d'erreurs successives » CAR(x) donnée par l'expression :

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

où :

- $\hat{\varepsilon}_{ij}$  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 la valeur 1 si les mesures correspondent à des découpes différentes pour un même arbre et 0 sinon ;
- $\rho_n$  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  $j^{\text{ème}}$  de la  $(j-n)$  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. Les trois premiers ordres ont été examinés graphiquement avec les Lag-résidus et le troisième ordre CAR(3), qui a permis un contrôle total de l'autocorrélation entre les résidus successifs d'un même arbre, a été choisi.

### Critères de comparaison des fonctions ajustées

La comparaison des capacités d'ajustement et de prédiction des différentes équations ajustées (tarifs de cubage globaux et rapports de volumes) a été basée sur des analyses numériques et graphiques des résidus issus de ces fonctions.

#### Capacité d'ajustement :

- Coefficient de détermination ajusté  $R_{aj}^2$  : il représente la part de variabilité de la variable dépendante qui est expliquée par la régression. Contrairement au coefficient de détermination ordinaire  $R^2$ , le coefficient de détermination ajusté tient compte du nombre de paramètres ( $p$ ) 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) :

$$R_{aj}^2 = 1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)^2}{(n-p) \sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2}$$

$V_i$  et  $\hat{V}_i$  désignent le volume observé et celui estimé de l'arbre  $i$ , et  $\bar{V}$  est le volume moyen de tous les arbres cubés.

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

$$\text{Biais} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_i)$$

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

- Moyenne quadratique des résidus absolus ( $S_a$ ) : elle donne l'ordre de grandeur de l'écart absolu existant en moyenne entre le volume observé et le volume estimé ( $n$  étant le nombre d'observations). Elle est essentiellement fonction des erreurs commises sur les gros arbres.

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

- Moyenne quadratique des résidus relatifs ( $S_r$ ) : elle est liée davantage aux erreurs commises sur les petits arbres.

$$S_r = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{V_i - \hat{V}_i}{\hat{V}_i} \right)^2}$$

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

- Normalité de la distribution des résidus : la normalité de la distribution des erreurs a été examinée à l'aide du test de normalité de Ryan-Joiner (Ryan et Joiner, 1976) et de la représentation graphique des quantiles normaux (*QQ-probability plots*).

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

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (\hat{e}_i - \hat{e}_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n \hat{e}_i^2}$$

avec :  $\hat{e}_i = V_i - \hat{V}_i$ .

Cette caractéristique est comprise entre 0 et 4. Une valeur très inférieure à 2 indique une corrélation positive entre les résidus successifs, et une valeur très supérieure à 2 correspond à une corrélation négative entre ces résidus. Par contre, une valeur voisine de 2 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 Draper et Smith (1981).

Un test approché a été proposé par Von Neumann (Morice et Chartier, 1954). Ce test, basé sur le caractère asymptotiquement normal du quotient :

$$q = \frac{DW}{2}, \text{ consiste à comparer la valeur } Z_{obs} : Z_{obs} = \frac{|q-1|}{\sqrt{\frac{n-2}{n^2-1}}},$$

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 est basée sur le calcul des résidus PRESS (Prediction Sum of Squares) ou erreurs de prédiction. Ces résidus sont équivalents aux résidus obtenus en omettant chaque fois une observation de la liste des données, en ajustant les paramètres de l'équation avec les autres observations restantes, en estimant la réponse de l'observation omise et en comparant la valeur prédite avec celle observée :  $e_i = V_i - \hat{V}_{i,-i}$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) où  $V_i$  est le volume observé,  $\hat{V}_{i,-i}$  est la valeur estimée de l'observation  $i$  (lorsque cette dernière est absente des données utilisées pour l'ajustement des paramètres de l'équation de régression) et  $n$  est le nombre d'observations. Chaque équation ou fonction possède dans ce cas  $n$  résidus PRESS et la quantité PRESS est définie comme suit (Sánchez-González et al., 2005, 2007 ; Sghaier et al., 2019, 2020) :

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

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

- Biais de prédiction :  $Biais_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - \hat{V}_{i,-i})$
- Moyenne quadratique des résidus absolus de prédiction :

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

- Moyenne quadratique des résidus relatifs de prédiction :

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

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

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

Pour identifier les meilleures fonctions à retenir comme tarif de cubage des volumes totaux du bois fort des grumes, nous avons procédé en deux étapes :

- La première étape consistait à repérer les fonctions dont tous les paramètres (coefficients de régression) étaient significatifs et les hypothèses d'indépendance des résidus (résidus d'ajustement et résidus de prédiction) étaient vérifiées ( $Z_{obs} \leq 1,96$ ) ;
- La seconde étape consistait à comparer les fonctions déjà retenues en se basant sur les autres critères d'évaluation relatifs aux capacités d'ajustement et de prédiction de ces fonctions ainsi que sur des représentations graphiques relatives à (i) la répartition des moyennes quadratiques des résidus absolus ( $S_a$ ) et des résidus relatifs ( $S_r$ ) par classe de diamètre, à (ii) l'homoscédasticité et à (iii) la normalité de la distribution des mêmes résidus.

L'application de cette approche de sélection des équations adéquates a permis de retenir les équations Eq.1, Eq.7, Eq.11 et Eq.15.

### Volumes variables et défilement

L'ajustement individuel des fonctions Eq.10 à Eq.15 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.11 (RMSE = 0,0300 ;  $R^2 = 0,9899$ ) pour le premier rapport et Eq.15 (RMSE = 0,0136 ;  $R^2 = 0,9976$ ) pour le deuxième.

Les tarifs de cubage marchands ou à diamètre et longueur variables des grumes des arbres résultent de la combinaison de la fonction retenue pour la prédiction du volume total à deux entrées  $V_i$  du bois fort des grumes (Eq.7) et de celles relatives à la prédiction des deux rapports du même volume cumulé à diamètre variable  $Rvd_{ij}$  (Eq.11) et à hauteur variable  $Rvh_{ij}$  (Eq.15). Ainsi, 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) sont les suivantes :

$$Rvd_{ij} = \frac{vd_{ij}}{V_i} \Rightarrow vd_{ij} = a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2} \times \exp\left(\frac{b_0 d_{ij}^{b_1}}{D_i^{b_2}}\right) + \varepsilon_{ij} \quad \text{Eq.16}$$

$$Rvh_{ij} = \frac{vh_{ij}}{V_i} \Rightarrow vh_{ij} = a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2} \times \exp\left(\frac{b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4}}{b_i}\right) + \varepsilon_{ij} \quad \text{Eq.17}$$



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.16 et Eq.17 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, de déterminer 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.18 et Eq.19 expriment ces deux relations :

$$d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} D_i^{b_2/b_1} \left( (H_i - h_{ij})^{b_4/b_1} / H_i^{b_5/b_1} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.18})$$

$$h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} \left( d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4} \right) + \varepsilon_{ij} \quad (\text{Eq.19})$$

Pour estimer les paramètres des fonctions Eq.16 à Eq.19, 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 :

$$S1: \begin{cases} d_{ij} = (b_3/b_0)^{1/b_1} D_i^{b_2/b_1} \left( (H_i - h_{ij})^{b_4/b_1} / H_i^{b_5/b_1} \right) + \varepsilon_{ij} & (\text{Eq.18}) \\ h_{ij} = H_i - (b_0/b_3)^{1/b_4} (H_i)^{b_5/b_4} \left( d_{ij}^{b_1/b_4} / D_i^{b_2/b_4} \right) + \varepsilon_{ij} & (\text{Eq.19}) \\ vd_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2}) \times \exp(b_0 d_{ij}^{b_1} / D_i^{b_2}) + \varepsilon_{ij} & (\text{Eq.16}) \\ vh_{ij} = (a_0 D_i^{a_1} H_i^{a_2}) \times \exp(b_3 (H_i - h_{ij})^{b_4} / H_i^{b_5}) + \varepsilon_{ij} & (\text{Eq.17}) \end{cases}$$

Étant donné que les différentes équations du système S1 utilisent les mêmes variables indépendantes, les termes d'erreurs issues de ces équations sont dépendants (Sghaier et Ammari, 2022). Pour résoudre ce problème de dépendance entre les termes d'erreurs, la méthode d'ajustement qui a été utilisée est la régression non-linéaire sans corrélations apparentes (NSUR : *Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations*), basée sur les moindres carrés généralisés (Zheng et al., 2015). D'autre part et afin d'en-

lever les autocorrélations entre les résidus successifs issus des observations répétées réalisées sur un même arbre, un modèle autorégressif du troisième ordre CAR(3) sur les résidus de chaque équation du système a été incorporé dans la procédure d'ajustement. Finalement, pour avoir la même estimation du volume total BF de la grume par l'utilisation du tarif global (Eq.7) ou des tarifs à diamètre et longueur variables des volumes cumulés  $vd_{ij}$  et  $vh_{ij}$  (Eq.16 et Eq.17), les valeurs ajustées des paramètres  $a_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$  ont été considérées comme fixes et égales à celles estimées pour la fonction Eq.7 dans le cas du volume de la grume (tableau IV). Dans ce cas, seuls les paramètres  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$  et  $b_5$  des équations du système S1 étaient à estimer.

## Résultats

### Tarifs de cubage des volumes totaux

Le tableau I présente la répartition des 90 arbres de pin maritime cubés par classes de DHP et par classes de hauteur totale. Les caractéristiques dendrométriques et les volumes des grumes des 90 tiges cubées figurent au tableau II.

Sur la base des valeurs des différents critères de comparaison des trois équations de cubage à une entrée (Eq.1 à Eq.3) et à deux entrées (Eq.4 à Eq.9), les équations Eq.1 et Eq.7 présentaient les meilleurs résultats d'ajustement et de prédiction par comparaison aux autres équations. Le tableau III présente les principaux résultats des ajustements de ces deux équations sans et avec l'incorporation d'une fonction de pondération des résidus en fonction du DHP.

**Tableau I.**

Répartition des 90 arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) coupés par classes de diamètre à hauteur de poitrine (DHP) et par classes de hauteur.  
*Distribution of the 90 maritime pine (Pinus pinaster) trees cut by diameter at breast height (DHP) and height classes.*

Classes de DHP (cm)	Centre de classes (cm) ↓ (m →)	Classes de hauteur totale (m)										Total	
		≤ 6	[6-8]	[8-10]	[10-12]	[12-14]	[14-16]	[16-18]	[18-20]	[20-22]	≥ 22		
≤ 17,5	15	3	5										8
]17,5-22,5]	20	1	5										6
]22,5-27,5]	25			2	1	2							5
]27,5-32,5]	30			1	2	6	4	1					14
]32,5-37,5]	35				1	3	8	5	1	1			19
]37,5-42,5]	40					2	1	12	3	2			20
]42,5-47,5]	45						1	1	1			1	4
]47,5-52,5]	50							1	1	4	5		11
> 52,5	55								1	1	1		3
<b>Total</b>	-	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>20</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>7</b>		<b>90</b>

**Tableau II.**

Statistiques descriptives des variables dendrométriques mesurées des 90 arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) cubés. H : hauteur totale ; DHP : diamètre à hauteur de poitrine (1,30 m).  
Descriptive statistics for dendrometric variables measured on 90 trees of maritime pine (*Pinus pinaster*) cubed. H: total height; DHP: diameter at breast height (1.30 m).

Variables	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Hauteur totale (H en m)	5,60	24,50	14,89	4,84
Diamètre à 1,30 m (DHP en cm)	13,00	61,00	34,69	10,786
Volume des grumes (dm <sup>3</sup> )	32,420	2 830,610	852,273	647,185

Pour choisir entre les équations pondérées ou non pondérées à retenir comme tarifs globaux pour le cubage des grumes d'arbres de pin maritime en Tunisie, nous nous sommes basés sur les résultats des ajustements de ces équations (tableau III) et des représentations graphiques de quelques critères de comparaison calculés à partir des résidus (figures 4, 5 et 6). Du point de vue des valeurs des différents critères de comparaison utilisés, le tableau III montre que l'incorporation d'une fonction de pondération des résidus en fonction du DHP dans la procédure d'ajus-

tement des paramètres des équations retenues a permis une nette amélioration pour le tarif à deux entrées (Eq.7). La représentation graphique des moyennes quadratiques des résidus absolus ( $S_a$ ) et des moyennes quadratiques des résidus relatifs ( $S_r$ ) par classe de diamètre (figure 4), montre que la pondération améliore la qualité d'ajustement pour le tarif à une entrée (Eq.1) en ce qui concerne les erreurs commises essentiellement sur les gros arbres ( $S_r$ ). Sur le plan de la constance des erreurs ou homoscedasticité (figure 5) et de la normalité de la distribution (figure 6), la pondération semble avoir un effet positif, cela pour les deux tarifs à une (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7). Ainsi, les tarifs globaux finalement retenus pour le cubage des grumes d'arbres de pin maritime en Tunisie sont ceux issus de l'ajustement des équations Eq.1 et Eq.7 avec pondération des résidus en fonction du DHP.

Les écritures mathématiques des deux équations retenues sont les suivantes :

- tarif à une entrée (Eq.1) :  

$$v = 227,681 - 30,996 \times D + 1,287 \times D^2$$
avec  $R_{aj}^2 = 0,9675$  et  $RMSE = 116,700 \text{ dm}^3$  ;
- tarif à deux entrées (Eq.7) :  

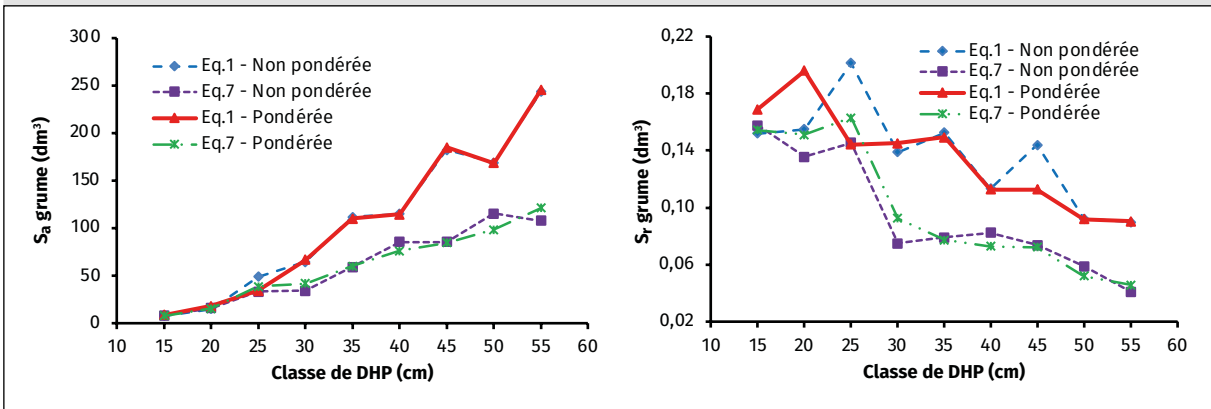
$$v = 5,158 \times 10^{-2} \times D^{2,146} H^{0,6986}$$
avec  $R_{aj}^2 = 0,9890$  et  $RMSE = 67,856 \text{ dm}^3$ .

**Tableau III.**

Valeurs estimées, test de signification des paramètres et précision des tarifs de cubage non pondérés et pondérés : tarif à une entrée (équation Eq.1) et tarif à deux entrées (équation Eq.7) des grumes d'arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) inventoriés en Tunisie.  
Estimated values, significance test of parameters and precision of unweighted and weighted volume equations: single-entry rate (equation Eq.1) and double-entry rate (equation Eq.7) of maritime pine (*Pinus pinaster*) logs inventoried in Tunisia.

Type	Eq.	Par.	Esti.	$p >  t $	Capacité d'ajustement						Capacité de prédiction					
					Biais	RMSE	$S_a$	$S_r$	$Z_{obs}$	$R_{aj}^2$	Biais <sub>p</sub>	RMSE <sub>p</sub>	$S_{op}$	$S_{rp}$	$Z_{p,obs}$	$R_{press}^2$
Tarifs non pondérés	1	$a_0$	228,101	0,0179	0	116,361	114,38	0,137	0,24	0,9677	-0,602	123,615	121,514	0,142	0,44	0,9644
		$a_1$	-30,650	< 0,0001												
		$a_2$	1,280	< 0,0001												
	7	$a_0$	0,04351	< 0,0001	-0,855	71,611	70,393	0,095	0,21	0,9878	-2,084	78,03	76,703	0,097	0,84	0,9858
		$a_1$	2,217	< 0,0001												
		$a_2$	0,6665	< 0,0001												
Tarifs pondérés	1	$a_0$	227,681	< 0,0001	0,006	116,700	114,036	0,139	0,36	0,9675	0,378	125,24	122,393	0,146	0,53	0,9638
		$a_1$	-30,996	< 0,0001												
		$a_2$	1,287	< 0,0001												
	7	$a_0$	0,05158	< 0,0001	-1,183	67,856	66,313	0,099	0,95	0,9890	-2,400	76,216	74,483	0,101	0,93	0,9866
		$a_1$	2,146	< 0,0001												
		$a_2$	0,6986	< 0,0001												

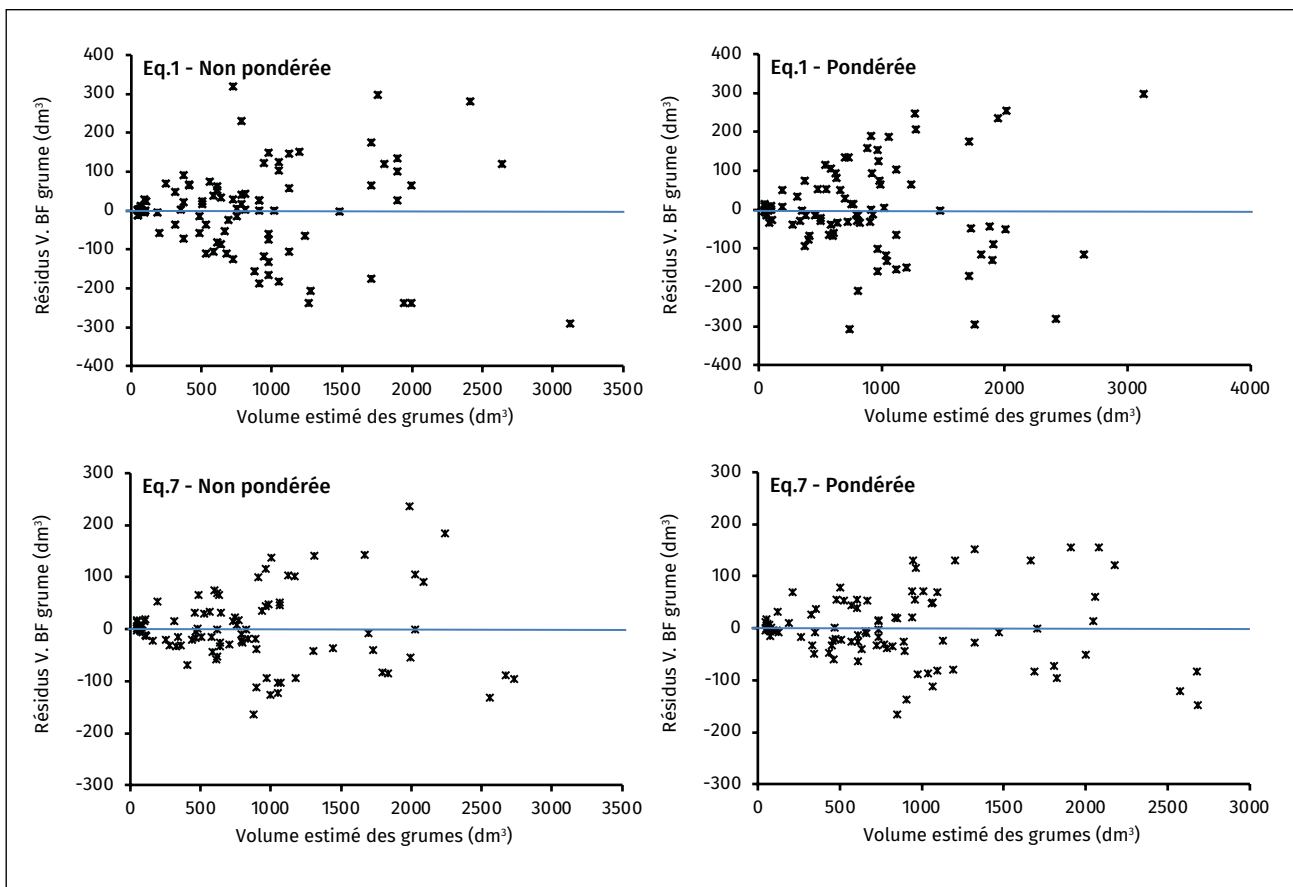
Eq. : équation ; Par. : paramètre ; Esti. : valeur estimée ;  $p > |t|$  : probabilité associée aux estimateurs des paramètres; Biais : le biais basé sur la moyenne des résidus ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne (root-mean-square error) ;  $S_a$  : moyenne quadratique des résidus absolus ;  $S_r$  : moyenne quadratique des résidus relatifs ;  $Z_{obs}$  : valeur du test de Von Neumann ;  $R_{aj}^2$  : coefficient de détermination ajusté ; Biais<sub>p</sub> : biais de prédiction ; RMSE<sub>p</sub> : racine de l'erreur quadratique moyenne de prédiction ;  $S_{op}$  : moyenne quadratique des résidus absolus de prédiction ;  $S_{rp}$  : moyenne quadratique des résidus relatifs de prédiction ;  $Z_{p,obs}$  : valeur du test de Von Neumann de prédiction ;  $R_{press}^2$  : coefficient de détermination de prédiction.



**Figure 4.**

Répartition des moyennes quadratiques des résidus absolus ( $S_a$ ) et des moyennes quadratiques des résidus relatifs ( $S_r$ ) par classe de diamètre pour les tarifs de cubage de bois fort (BF) des grumes de pin maritime (*Pinus pinaster*) à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7) sans et avec pondération des erreurs au diamètre à hauteur de poitrine (DHP).

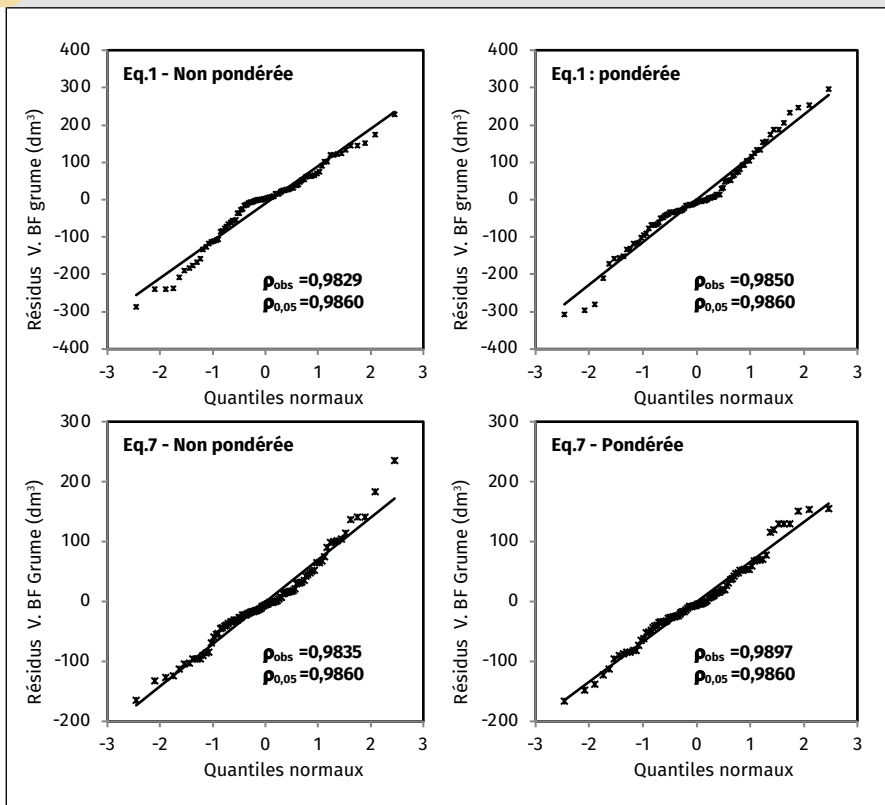
*Distribution of root mean squared absolute residuals ( $S_a$ ) and root mean squared relative residuals ( $S_r$ ) by diameter class for large timber (BF) cubing rates of maritime pine (*Pinus pinaster*) for single-entry (Eq.1) and double-entry (Eq.7) logs without and with error weighting at diameter at breast height (DHP).*



**Figure 5.**

Projection des résidus en fonction des volumes estimés de bois fort (BF) des grumes de pin maritime (*Pinus pinaster*) (homoscédasticité) pour les tarifs à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7) sans et avec pondération des erreurs au diamètre à hauteur de poitrine (DHP).

*Projection of residuals as a function of estimated maritime pine (*Pinus pinaster*) log volumes of large timber (BF) (homoscedasticity) for one-input (Eq.1) and two-input (Eq.7) tariffs without and with error weighting at breast height diameter (DHP).*



**Figure 6.** Normalité de la distribution des résidus (QQ-probability plots) issus des tarifs à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7) sans et avec pondération des erreurs au diamètre à hauteur de poitrine (DHP) de pin maritime (*Pinus pinaster*).  
Normality of the distribution of residuals (QQ-probability plots) from the one-input (Eq.1) and two-input (Eq.7) tariffs without and with error weighting at diameter at breast height (DHP) of maritime pine (*Pinus pinaster*).

La figure 7 présente la projection en fonction du DHP des volumes observés et des volumes estimés à l'aide des tarifs pondérés à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7).

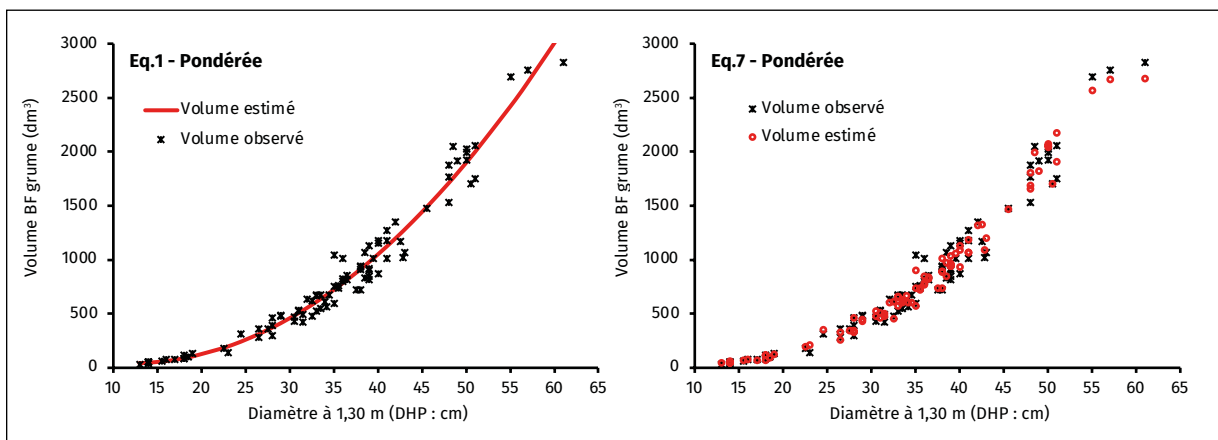
Le tableau IV présente les tables de cubage à une et à deux entrées relatives aux volumes totaux du BF des grumes de pin maritime générées par les tarifs pondérés (Eq.1 et Eq.7) pour des classes de 10 cm de DHP et de 2 m de hauteur.

### Tarifs de cubage à diamètre et longueur variables

Le tableau V présente les valeurs et les tests de signification des paramètres estimés ( $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$  et  $b_5$ ) et le tableau VI montre les précisions statistiques des différentes équations du système S1 ajusté (équations Eq.16 à Eq.19). Les valeurs des paramètres  $a_0, a_1$  et  $a_2$  étant fixes, elles sont égales à celles estimées pour la fonction pondérée Eq.7 dans le cas du volume de la grume (tableau III).

La figure 8, présentant 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.

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  $vh_{ij}$ ). Deux cas de simulation sont possibles à l'aide



**Figure 7.** Projection en fonction du diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des volumes observés et des volumes estimés de pin maritime (*Pinus pinaster*) à l'aide des tarifs pondérés à une entrée (Eq.1) et à deux entrées (Eq.7) retenus pour le cubage des grumes du pin maritime en Tunisie.  
Projection as a function of diameter at breast height (DHP) of observed volumes and estimated volumes of maritime pine (*Pinus pinaster*) using the weighted one-entry (Eq.1) and two-entry (Eq.7) tariffs adopted for the cubing of maritime pine logs in Tunisia.

**Tableau IV.**

Tables de cubage à une (Eq.1 pondérée) et à deux entrées (Eq.7 pondérée) des grumes d'arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) en Tunisie : volumes totaux de bois fort (BF) en dm<sup>3</sup>.  
 Single-entry (Eq.1 weighted) and double-entry (Eq.7 weighted) volume tables for logs of maritime pine (*Pinus pinaster*) trees in Tunisia: total volumes of large timber (BF) in dm<sup>3</sup>.

Classes de DHP (cm)	DHP (cm)	Grumes : tarif à deux entrées CV% = 7,96										Tarif à une entrée CV% = 13,69
		Hauteur totale (m)										
		5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	
		≤ 6	]6-8]	]8-10]	]10-12]	]12-14]	]14-16]	]16-18]	]18-20]	]19-21]	≥ 21	
≤ 17,5	15	53,049	67,106	79,985	92,022	103,413	114,285	124,728	134,806	144,569	154,055	52,316
]17,5-22,5]	20	98,354	124,416	148,295	170,612	191,731	211,889	231,251	249,936	268,037	285,624	122,561
]22,5-27,5]	25	158,767	200,838	239,384	275,409	309,501	342,041	373,295	403,458	432,676	461,067	257,156
]27,5-32,5]	30	234,792	297,009	354,011	407,287	457,704	505,826	552,046	596,652	639,861	681,847	456,101
]32,5-37,5]	35	326,852	413,463	492,816	566,981	637,165	704,156	768,498	830,594	890,746	949,193	719,396
]37,5-42,5]	40	435,314	550,665	656,351	755,125	848,600	937,820	1 023,514	1 106,214	1 186,327	1 264,169	1 047,041
]42,5-47,5]	45	560,500	709,024	845,102	972,282	1 092,638	1 207,516	1 317,853	1 424,337	1 527,488	1 627,715	1 439,036
]47,5-52,5]	50	702,702	888,907	1 059,509	1 218,956	1 369,846	1 513,869	1 652,200	1 785,699	1 915,020	2 040,676	1 895,381
> 52,5	55	862,184	1 090,649	1 299,970	1 495,604	1 680,740	1 857,450	2 027,175	2 190,973	2 349,644	2 503,818	2 416,076

**Tableau V.**

Valeurs et tests de signification des estimations des paramètres du système S1 d'équations simultanées relatives aux tarifs de cubage des grumes de pin maritime (*Pinus pinaster*) à diamètre et longueur variables.

Values and significance tests of the estimates of the parameters of the S1 system of simultaneous equations relating to the volume equations for maritime pine (*Pinus pinaster*) logs of variable diameter and length.

Paramètre	Estimation	E.S.	p >  t
b <sub>0</sub>	-0,3622	0,0438	<0,0001
b <sub>1</sub>	4,4838	0,0336	<0,0001
b <sub>2</sub>	4,1062	0,0420	<0,0001
b <sub>3</sub>	-2,0030	0,1363	<0,0001
b <sub>4</sub>	3,5347	0,0230	<0,0001
b <sub>5</sub>	3,4768	0,0315	<0,0001

E.S.: erreur-standard.

**Table VI.**

Précisions des tarifs de cubage à diamètre et longueur variables pour le pin maritime (*Pinus pinaster*).

Precision of the volume equations for maritime pine (*Pinus pinaster*) of variable diameter and length.

Variable	Fonction	Paramètres	Biais	RMSE	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>
Volume global	Eq.7	a <sub>0</sub> , a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub>	-1,1830	67,856	0,9890
Volume cumulé vd <sub>ij</sub> (dm <sup>3</sup> )	Eq.17	a <sub>0</sub> , a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , b <sub>0</sub> , b <sub>1</sub> , b <sub>2</sub>	0,3844	45,2295	0,9942
Volume cumulé vh <sub>ij</sub> (dm <sup>3</sup> )	Eq.18	a <sub>0</sub> , a <sub>1</sub> , a <sub>2</sub> , b <sub>0</sub> , b <sub>1</sub> , b <sub>5</sub>	3,6078	22,8937	0,9985
d <sub>ij</sub> (cm)	Eq.19	b <sub>0</sub> , b <sub>1</sub> , b <sub>2</sub> , b <sub>3</sub> , b <sub>4</sub> , b <sub>5</sub>	0,0980	1,1781	0,9881
h <sub>ij</sub> (m)	Eq.20	b <sub>0</sub> , b <sub>1</sub> , b <sub>2</sub> , b <sub>3</sub> , b <sub>4</sub> , b <sub>5</sub>	0,0195	0,5010	0,9905

Eq. : équation ; vd<sub>ij</sub> : volume cumulé ; vh<sub>ij</sub> : volume cumulé. Biais : le biais basé sur la moyenne des résidus ; d<sub>ij</sub> : diamètre de l'arbre i au niveau de coupe j ; h<sub>ij</sub> : hauteur de l'arbre i au niveau de coupe j ; RMSE : racine de l'erreur quadratique moyenne (root-mean-square error) ; R<sup>2</sup><sub>aj</sub> : coefficient de détermination ajusté.

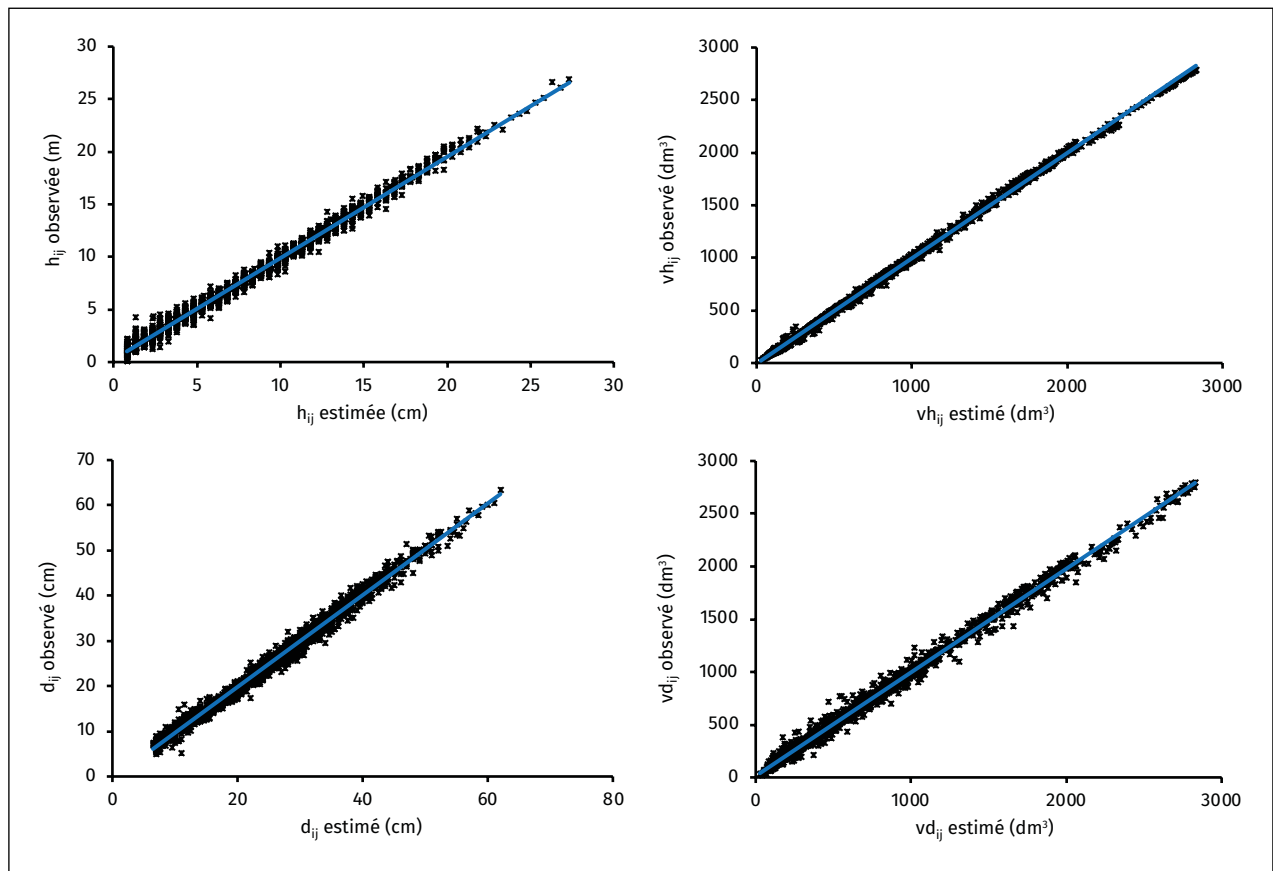
de ces équations. On peut, soit fixer le diamètre fin-bout de la grume  $d_{ij}$  et calculer la hauteur  $h_{ij}$  et le volume  $vh_{ij}$  correspondants, soit fixer la hauteur  $h_{ij}$  et calculer le diamètre fin-bout  $d_{ij}$  et le volume  $vd_{ij}$  correspondants. Dans la pratique, on utilise 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 il s'agit de calculer par la suite la différence entre les deux niveaux de mesures ( $h_{i2} - h_{i1}$  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 VII, pouvant 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 0,5 m 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 au tableau IV relatif au volume total du bois fort de la grume (tarif à deux entrées).

## Discussion

Le tarif à une entrée retenu pour l'estimation du volume BF de la grume d'arbre individuel de pin maritime en Tunisie a la forme d'une fonction quadratique ou encore d'une fonction polynomiale de second degré (Eq.1) qui exprime le volume en fonction du DHP avec un  $R^2$  de l'ordre de 97 %. Alaoui *et al.* (2011) ont utilisé cette même fonction pour élaborer un tarif de cubage à une entrée pour les plantations du pin maritime dans la région de Mâamoura au Maroc avec un  $R^2$  de l'ordre de 93 %. De leur côté, Kitikidou *et al.* (2017) ont ajusté la même fonction pour élaborer un tarif de cubage pour le pin de Calabre (*Pinus brutia*), une espèce très proche du pin maritime, dans les plantations des forêts périurbaines en Grèce avec un  $R^2$  de l'ordre de 79 %.

Comme le volume d'un arbre augmente généralement avec le DHP, le recours aux tarifs à une entrée, plus simples et plus faciles à manipuler, 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 de l'âge des arbres (Prégent *et al.*, 2001 ; Deleuze *et al.*, 2014). De ce fait, des tarifs de cubage plus précis, dits à deux entrées, qui utilisent



**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 de pin maritime (*Pinus pinaster*).  
Projection of the observed values as a function of the values estimated using the various functions fitted by the simultaneous system of equations (S1) relating to the variable diameter and length cubing rates for maritime pine (*Pinus pinaster*).

**Tableau VII.**

Table de cubage : volumes marchands ( $vh_{ij}$ ;  $dm^3$ ) bois fort (BF) des grumes d'arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) pour un diamètre fin-bout  $d_{ij} = 20$  cm et une longueur des grumes  $\geq 0,5$  m. DHP : diamètre à hauteur de poitrine.  
 Cubage table: merchantable volumes ( $vh_{ij}$ ,  $dm^3$ ) of large timber (BF) from maritime pine (*Pinus pinaster* logs) for an end-to-end diameter  $d_{ij} = 20$  cm and a log length  $\geq 0.5$  m. DHP: diameter at breast height (DBH).

Classe de DHP	DHP (cm)	$h_{ij}$ (m)	Hauteur totale des arbres (m)										
			5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	
≤ 17,5	15	$h_{ij}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
		$vh_{ij}$	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17,5-22,5	20	$h_{ij}$	0,87	1,24	1,63	2,02	2,42	2,82	3,22	3,63	4,04	4,45	
		$vh_{ij}$	72,207	91,340	108,871	125,255	140,759	155,559	169,773	183,491	196,779	209,691	
22,5-27,5	25	$h_{ij}$	1,81	2,56	3,31	4,07	4,83	5,6	6,37	7,14	7,91	8,69	
		$vh_{ij}$	140,305	177,484	211,547	243,383	273,511	302,267	329,887	356,542	382,363	407,452	
27,5-32,5	30	$h_{ij}$	2,42	3,41	4,4	5,39	6,39	7,39	8,4	9,4	10,41	11,42	
		$vh_{ij}$	221,457	280,140	333,905	384,155	431,708	477,097	520,692	562,764	603,520	643,121	
32,5-37,5	35	$h_{ij}$	2,84	4	5,15	6,31	7,48	8,64	9,81	10,98	12,15	13,32	
		$vh_{ij}$	316,860	400,823	477,750	549,647	617,686	682,628	745,004	805,200	863,514	920,174	
37,5-42,5	40	$h_{ij}$	3,15	4,43	5,71	6,99	8,27	9,56	10,84	12,13	13,42	14,71	
		$vh_{ij}$	427,572	540,872	644,678	741,696	833,508	921,141	1 005,311	1 086,541	1 165,229	1 241,687	
42,5-47,5	45	$h_{ij}$	3,39	4,76	6,13	7,5	8,87	10,25	11,63	13,01	14,39	15,77	
		$vh_{ij}$	554,333	701,223	835,804	961,585	1 080,616	1 194,230	1 303,354	1 408,666	1 510,682	1 609,807	
47,5-52,5	50	$h_{ij}$	3,57	5,01	6,46	7,9	9,35	10,8	12,25	13,7	15,15	16,6	
		$vh_{ij}$	697,677	882,550	1 051,932	1 210,237	1 360,049	1 503,042	1 640,383	1 772,927	1 901,324	2 026,081	
52,5-57,5	55	$h_{ij}$	3,72	5,22	6,72	8,23	9,73	11,24	12,75	14,25	15,76	17,27	
		$vh_{ij}$	858,010	1 085,369	1 293,677	1 488,363	1 672,603	1 848,457	2 017,361	2 180,365	2 338,268	2 491,696	
57,5-62,5	60	$h_{ij}$	3,85	5,39	6,94	8,49	10,05	11,6	13,16	14,71	16,27	17,82	
		$vh_{ij}$	1 035,666	1 310,101	1 561,540	1 796,538	2 018,925	2 231,191	2 435,068	2 631,823	2 822,421	3 007,617	
62,5-67,5	65	$h_{ij}$	3,95	5,54	7,13	8,72	10,31	11,9	13,5	15,09	16,69	18,28	
		$vh_{ij}$	1 230,927	1 557,103	1 855,948	2 135,251	2 399,566	2 651,852	2 894,167	3 128,018	3 354,551	3 574,662	
67,5-72,5	70	$h_{ij}$	4,04	5,66	7,28	8,91	10,53	12,16	13,79	15,41	17,04	18,67	
		$vh_{ij}$	1 444,040	1 826,687	2 177,271	2 504,931	2 815,008	3 110,972	3 395,239	3 669,577	3 935,330	4 193,550	

$h_{ij}$  : hauteur de l'arbre i au niveau de coupe j ;  $vh_{ij}$  : volume cumulé de l'arbre i jusqu'à la hauteur au niveau de coupe j.

comme variables indépendantes pour estimer le volume BF d'un arbre le DHP et la hauteur totale de ce dernier sont souvent élaborés. Le tarif à deux entrées, relatif à l'estimation du volume BF des grumes d'arbre individuel du pin maritime en Tunisie, découle de la fonction Eq.7 avec une précision de l'ordre de 99 %. La même fonction (Eq.7) a été utilisée pour ajuster des tarifs de cubage à deux entrées sur et sous écorce pour le pin de Calabre dans le Kurdistan de l'Iraq (Sagvan *et al.*, 2018) avec des précisions de l'ordre de 96 % pour le tarif sur écorce et 90 % pour celui sous écorce. Sghaier *et al.* (2013) ont également ajusté la même fonction (Eq.7) comme tarif de cubage à deux entrées pour l'estimation du bois fort des arbres individuels dans les plantations du pin pignon du nord-ouest de la Tunisie avec

une précision de l'ordre de 96 %. Du point de vue de leur utilisation, les tarifs à une entrée sont moins précis mais plus faciles à mettre en œuvre et peuvent être utilisés en aménagement, tandis que les tarifs à deux entrées, plus précis et également appelés tarifs d'exploitation, peuvent être utilisés pour la vente du bois sur pied (Sghaier *et al.*, 2013).

Pour situer et comparer les deux tarifs globaux à une et à deux entrées élaborés dans le cadre de cette étude par rapport à d'autres tarifs ajustés pour la même espèce, nous nous sommes basés sur trois études similaires réalisées au Maroc (Alaoui *et al.*, 2011), au Portugal (Freire *et al.*, 2003) et en Iran (Yousefpour *et al.*, 2012). Il s'agit de deux tarifs à une et à deux entrées développés à l'échelle de l'arbre pour les

plantations de pin maritime dans la région de Mâmoura au Maroc, d'un tarif à deux entrées élaboré pour un reboisement de la même espèce situé dans le noyau forestier de la

Oitava (Serra da Lousã) au Portugal, et finalement de deux tarifs à une et à deux entrées ajustés pour les plantations de pin maritime de la région de Kiashahr (nord de l'Iran). Le

tableau VIII présente la forme et la valeur des paramètres et la précision de ces équations utilisées comme base de comparaison avec nos deux tarifs de cubage.

La figure 9 présente les résultats de comparaison des deux tarifs de cubages de pin maritime développés en Tunisie avec ceux des autres tarifs élaborés et utilisés comme base de comparaison (tableau VIII). La figure 9a présente la projection des arbres échantillonnés en fonction du DHP et les courbes simulées à l'aide des tarifs de cubage à une entrée ajustés en Tunisie, au Maroc et en Iran. D'après cette figure, les deux tarifs tunisien et marocain donnent des estimations très proches jusqu'à environ 45 cm de diamètre ; au-delà de cette dimension des tiges, le tarif marocain donne des valeurs estimées plus faibles. Le tarif iranien s'écarte quant à lui d'une façon remarquable des deux tarifs précédents à partir

**Table VIII.**

Équations de volume de bois fort (BF) à une et à deux entrées développées pour le cubage de pin maritime (*Pinus pinaster*) au Maroc, au Portugal et en Iran.

*One- and two-input large timber (BF) volume equations developed for maritime pine (Pinus pinaster) cubing in Morocco, Portugal and Iran.*

Type de tarif	Équation	Paramètres	Unités	R2	Pays	Référence
Une entrée	$v = b_0 + b_1 C + b_2 x C^2$	$b_0 = 1,49$ $b_1 = -1,63$ $b_2 = 0,077$	C : cm V : dm <sup>3</sup>	0,93	Maroc	Alaoui et al. (2011)
	$v = b_0 D + b_1 x D^2$	$b_0 = -2,7 \times 10^{-4}$ $b_1 = 3,46 \times 10^{-4}$	D : cm V : m <sup>3</sup>	0,89	Iran	Yousefpour et al. (2012)
Deux entrées	$v = b_0 C^2 + b_1 H + b_2 C^2 H$	$b_0 = 0,0115$ $b_1 = -0,02$ $b_2 = 0,0031$	C : cm H : m V : dm <sup>3</sup>	0,95	Maroc	Alaoui et al. (2011)
	$v = b_0 D^{b_1} (H^2 / (H - 1,3))^{b_2}$	$b_0 = 1,677 \times 10^{-5}$ $b_1 = 1,984$ $b_2 = 1,211$	D : cm H : m V : m <sup>3</sup>	0,98	Iran	Yousefpour et al. (2012)
	$v = \exp(b_0 + b_1 H + b_2 \log(D))$	$b_0 = -7,9411$ $b_1 = 0,0538$ $b_2 = 1,8659$	D : cm H : m V : m <sup>3</sup>	0,98	Portugal	Freire et al. (2003)

**Tableau IX.**

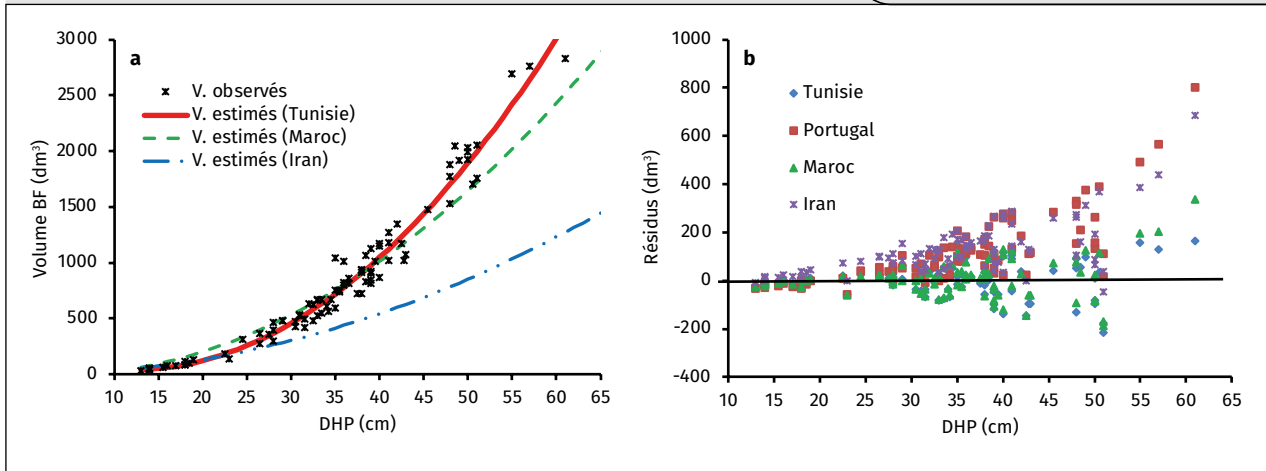
Application des équations du système S1 pour sept arbres représentatifs de pin maritime (*Pinus pinaster*) issus de la base de données étudiée : volumes observé et estimé de la tige ; volumes jusqu'à différentes découpes de diamètre (Eq.16) ; volumes jusqu'à différentes découpes en hauteur (Eq.17) ; diamètre fin-bout pour une longueur de tige de 5 m (Eq.18) et longueur de la tige pour un diamètre fin-bout de 15 cm (Eq.19).

*Application of the equations of system S1 for seven representative maritime pine (Pinus pinaster) trees from the database studied: observed and estimated stem volumes; volumes up to different diameter cuts (Eq.16); volumes up to different height cuts (Eq.17); end-to-end diameter for a stem length of 5 m (Eq.18) and stem length for an end-to-end diameter of 15 cm (Eq.19).*

Parcelle	N° arbre	DHP (cm)	H (m)	V <sub>obs</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>est</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>d15</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>d35</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>d15-35</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>h5</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>h10</sub> (dm <sup>3</sup> )	V <sub>h5-10</sub> (dm <sup>3</sup> )	d <sub>h5</sub> (cm)	h <sub>d15</sub> (m)
70	26	57	22	2 759,810	2 620,627	2 609,667	2 173,264	436,403	1 000,442	1 978,364	977,922	50,43	18,35
75	2	49	20,7	1 918,510	1 815,428	1 801,325	1 281,483	519,842	739,292	1 440,005	700,713	43,24	16,60
48	31	43	16,3	1 069,560	1 160,751	1 145,376	639,897	505,479	609,089	1 069,617	460,527	35,63	12,53
27	29	39	15,5	812,890	908,807	890,891	373,497	517,395	502,488	855,652	353,164	31,97	11,48
16	22	36	16,5	823,110	799,541	777,731	232,478	545,252	414,225	732,536	318,311	30,41	11,81
67	20	31	13,8	523,360	511,992	486,483	52,238	434,245	318,289	499,636	181,347	24,67	9,12
12	20	24,5	12,6	314,520	289,968	253,525	0,720	252,805	196,631	287,438	90,807	19,01	6,97

V<sub>obs</sub> : volume observé ; V<sub>est</sub> : volume estimé ; V<sub>d15</sub> : volume jusqu'à 15 cm de diamètre ; V<sub>d35</sub> : volume jusqu'à 35 cm de diamètre ; V<sub>d15-35</sub> : volume du billon entre les découpes 15 et 35 cm ; V<sub>h5</sub> : volume jusqu'à 5 m de hauteur ; V<sub>h10</sub> : volume jusqu'à 10 m de hauteur ; V<sub>h5-10</sub> : volume du billon entre 5 et 10 m de hauteur ; d<sub>h5</sub> : diamètre de la tige à une hauteur de 5 m ; h<sub>d15</sub> : hauteur de la tige jusqu'à la découpe 15 cm.





**Figure 9.**

(a) : projection des volumes de bois fort (BF) observés des arbres de pin maritime (*Pinus pinaster*) échantillonnés en fonction du diamètre à hauteur de poitrine DHP et courbes simulées à l'aide du tarif de cubage à une entrée ajusté en Tunisie (cette étude), au Maroc et en Iran ; (b) : projection des résidus en fonction du DHP obtenus par l'utilisation des tarifs à deux entrées ajustés en Tunisie, au Portugal, au Maroc et en Iran.

(a): projection of observed volumes of large timber (BF) from sampled maritime pine (*Pinus pinaster*) trees as a function of diameter at breast height (DHP) and curves simulated using the adjusted single-entry cubing tariff in Tunisia (this study), Morocco and Iran;

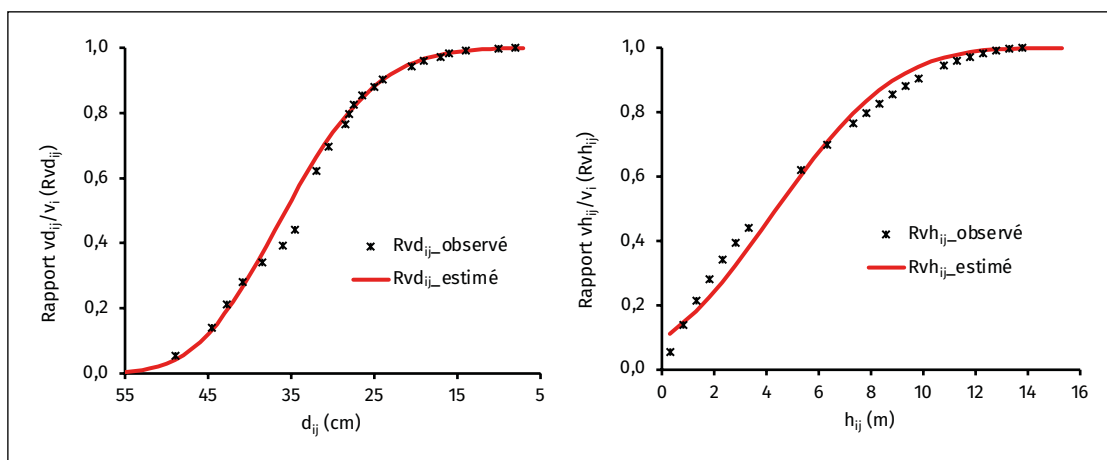
(b): projection of residuals as a function of DHP obtained using the adjusted two-entry tariffs in Tunisia, Portugal, Morocco and Iran.

d'environ 28 cm de diamètre. Pour comparer les tarifs à deux entrées, ces derniers ont été utilisés pour faire des estimations du volume des arbres échantillonnés et calculer les résidus issus de chaque tarif (Tunisie, Maroc, Portugal, et Iran). La figure 9b présente la projection de ces résidus en fonction du DHP. Il ressort de la figure 9b que les deux tarifs tunisien et marocain sont les plus proches et donnent des résidus comparables jusqu'à environ 50 cm de diamètre. Les deux autres tarifs portugais et iranien sous-estiment quant à eux le volume et donnent des résidus positifs à partir de 25 cm de diamètre environ. Comme les tarifs de cubage dépendent fortement des caractéristiques dendrométriques des arbres cubés et que ces dernières dépendent des conditions édaphiques et climatiques, la similitude observée entre les tarifs développés en Tunisie et au Maroc pour les tiges de moins de 50 cm de diamètre peut être expliquée par les conditions édaphiques et climatiques qui se ressemblent, étant donné que les deux pays se trouvent au nord de l'Afrique et dans la rive sud de la Méditerranée. La figure 9b montre également un ressemblance entre les deux tarifs à deux entrées développés au Portugal et en Iran, surtout pour les tiges de plus de 25 cm de diamètre environ où on observe une parfaite superposition des résidus issus de ces deux tarifs. Cette similitude dans le comportement des deux tarifs à deux entrées développés au Portugal et en Iran peut être expliquée d'une part par le caractère jeune des peuplements étudiés qui avaient 25 et 16 ans respectivement au moment des mesures (l'âge des plantations de pin maritime étudiées en Tunisie varie de 43 à 69 ans), et d'autre part par des caractéristiques pédoclimatiques probablement semblables des zones d'étude dans les deux pays.

En plus du type ou de la qualité du bois à transformer, les industriels de bois sont devenus de plus en plus exigeants en ce qui concerne les caractéristiques dendro-

métriques (diamètre et longueur des grumes) du bois à procurer. De ce fait, le recours à des tarifs traditionnels n'est plus suffisant. Pour répondre aux besoins des industriels, 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 », peuvent être élaborés. C'est dans ce contexte que des tarifs de cubage dits « tarifs marchands » ont été développés pour le pin maritime dans le cadre de cette étude en Tunisie. Des tarifs similaires ont été développés ces deux dernières décennies pour différentes espèces forestières (Prégent *et al.*, 2001, 2016 ; Crecente-Campo *et al.*, 2009 ; Heidarsson et Pukkala, 2011 ; Burkhart et Tomé, 2012 ; Calama *et al.*, 2012 ; Hjelm, 2013 ; Özçelik et Göçeri, 2015 ; Sghaier *et al.*, 2015 ; Lumbres *et al.*, 2016 ; Doyog *et al.*, 2017 ; Özçelik et Crecente-Campo, 2016 ; Tang *et al.*, 2017 ; Shahzad *et al.*, 2020 ; Sghaier et Ammari, 2022). L'ajustement simultané des quatre équations du système S1 a permis de prédire pour le pin maritime en Tunisie, avec des précisions de l'ordre de 99 %, (i) le diamètre de la grume jusqu'à une hauteur donnée, (ii) la hauteur de la grume jusqu'à un diamètre fin-bout donné, (iii) le volume cumulé de la grume jusqu'à un diamètre donné et (iv) le volume cumulé de la grume jusqu'à une hauteur donnée.

Afin d'illustrer l'application de ce système d'équations pour la prédiction des volumes et des longueurs des grumes d'arbres individuels de pin maritime en Tunisie, nous avons choisi quelques arbres représentatifs des différentes classes de diamètre des arbres échantillonnés. Les variables estimées concernent les différentes grandeurs de la grume (volume total et partiel, diamètres et longueur des billons). Le tableau IX contient les résultats de ces estimations qui concernent le volume observé et le volume estimé de la grume jusqu'à découpe de 7 cm de diamètre fin-bout (découpe bois fort) ; les volumes jusqu'aux différentes



**Figure 10.**

Rapports de volumes observés et estimés pour un arbre échantillon de pin maritime (*Pinus pinaster*) (arbre n° 1; placette n° 14) de caractéristiques dendrométriques moyennes (DS = 49 cm ; DHP = 42,8 cm ; H = 15,6 m ; HBF = 13,8 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 of maritime pine (*Pinus pinaster*) (tree no. 1; plot no. 14) with average dendrometric characteristics (DS = 49 cm ; DHP = 42.8 cm ; H = 15.6 m ; HBF = 13.8 m). DS: diameter of the stump; DHP: diameter at breast height (DBH); H: total height of the tree; HBF: height of large timber.

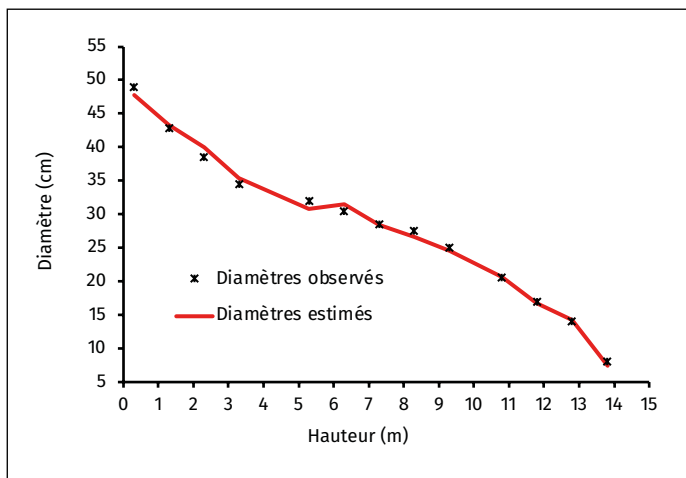
découpes de diamètre (Eq.16) ; les volumes jusqu'aux différentes coupes en hauteur (Eq.17) ; le diamètre fin-bout pour une longueur de tige de 5 m (Eq.18) et la longueur de la tige pour un diamètre fin-bout de 15 cm (Eq.19).

Finalement et afin d'illustrer graphiquement la qualité d'ajustement des équations de défilement élaborées, la figure 10 présente pour un arbre de caractéristiques den-

drométriques moyennes de l'échantillon les valeurs observées et celles estimées à l'aide de deux fonctions de rapports de volume (Eq.11 et Eq.15). La figure 11 illustre pour le même arbre la possibilité de prédire le profil de la tige avec la fonction de défilement ajustée (Eq.18).

## Conclusion

Deux tarifs de cubage dits « tarifs globaux » à une et deux entrées qui permettent de prédire le volume total bois fort (BF) des grumes d'arbres individuels de pin maritime, *Pinus pinaster* Ait., en Tunisie ont été élaborés dans le cadre de cette étude. Ces tarifs utilisent comme variables d'entrées le diamètre du tronc à hauteur d'homme (DHP) pour le premier et le DHP et la hauteur totale pour le deuxième. Pour répondre à la demande des industriels de transformation du bois qui exigent la connaissance préalable des caractéristiques dendrométriques des grumes du bois à acquérir, des tarifs de cubage dits « tarifs marchands » ou « tarifs à diamètre et longueur variables » ont été développés grâce à l'ajustement d'un système d'équations simultanées. Ces tarifs marchands permettent de prédire le volume 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 tarifs globaux et marchands élaborés pour le pin maritime en Tunisie doivent être appliqués pour des tiges dont le DHP est situé entre environ 15 et 65 cm et dont la hauteur H varie de 6 à 25 m. En dehors de ces limites, les mêmes tarifs doivent être utilisés avec plus de prudence.



**Figure 11.**

Profil d'une tige de pin maritime (*Pinus pinaster*) (arbre n° 1; placette n° 14) issue de la base de données étudiée (DS = 49 cm ; DHP = 42,8 cm ; H = 15,6 m ; HBF = 13,8 m). DS : diamètre de la souche ; DHP : diamètre à hauteur de poitrine ; H : hauteur totale de l'arbre ; HBF : hauteur bois fort.

Profile of a maritime pine (*Pinus pinaster*) stem (tree no. 1; plot no. 14) from the database studied (DS = 49 cm ; DHP = 42.8 cm ; H = 15.6 m ; HBF = 13.8 m). DS: diameter of the stump; DHP: diameter at breast height (DBH); H: total height of the tree; HBF: height of large timber.

## Financement

Cette étude a été entièrement financée par les moyens propres du Laboratoire d'Écologie forestière (LEF) de l'Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et forêts (INRGREF) en Tunisie.

## Conditions d'accès aux données

Les données utilisées pour l'élaboration des tarifs de cubage globaux de cette étude sont disponibles gratuitement et accessibles à partir de ce lien: <https://doi.org/10.57760/sciencedb.17025>. Les données utilisées pour l'ajustement des tarifs commerciaux et qui font encore l'objet d'autres travaux de modélisation dans le cadre de la thèse en cours de Monsieur Iheb Essoussi, peuvent être obtenues 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 Üni., Orman Fakültesi iDergisi*, 11 (1) : 68-84. [https://www.researchgate.net/publication/317317813\\_Production\\_croissance\\_et\\_modeles\\_de\\_conduite\\_sylvicoles\\_des\\_principales\\_essences\\_le\\_pin\\_maritime\\_et\\_le\\_pin\\_d%27Alep\\_de\\_reboisement\\_au\\_Maroc](https://www.researchgate.net/publication/317317813_Production_croissance_et_modeles_de_conduite_sylvicoles_des_principales_essences_le_pin_maritime_et_le_pin_d%27Alep_de_reboisement_au_Maroc)
- Alia R., Martin S., 2011. Fiche technique pour la conservation génétique et l'utilisation du pin maritime (*Pinus pinaster*). *EUFORGEN*, 6 p. [https://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Countries/France/Technical\\_guidelines/Pinus\\_pinaster\\_FRA.pdf](https://www.euforgen.org/fileadmin/templates/euforgen.org/upload/Countries/France/Technical_guidelines/Pinus_pinaster_FRA.pdf)
- 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://www.researchgate.net/profile/Isabel-Canellas/publication/28251726\\_Sistema\\_de\\_cubicacion\\_con\\_clasificacion\\_de\\_productos\\_para\\_plantaciones\\_de\\_Populus\\_x\\_euramericana\\_Dode\\_Guinier\\_cv\\_%27I-214%27\\_en\\_la\\_meseta\\_norte\\_y\\_centro\\_de\\_Espana/links/00b7d514311a3dda82000000/Sistema-de-cubicacion-con-clasificacion-de-productos-para-plantaciones-de-Populus-x-euramericana-Dode-Guinier-cv-I-214-en-la-meseta-norte-y-centro-de-Espana.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Isabel-Canellas/publication/28251726_Sistema_de_cubicacion_con_clasificacion_de_productos_para_plantaciones_de_Populus_x_euramericana_Dode_Guinier_cv_%27I-214%27_en_la_meseta_norte_y_centro_de_Espana/links/00b7d514311a3dda82000000/Sistema-de-cubicacion-con-clasificacion-de-productos-para-plantaciones-de-Populus-x-euramericana-Dode-Guinier-cv-I-214-en-la-meseta-norte-y-centro-de-Espana.pdf)
- Bouchon J., 1974. Les tarifs de cubage. *Engref, Nancy*, 57 p. + annexes.
- Bullock B. P., Burkhardt 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://academic.oup.com/sjaf/article/27/3/153/4782424>
- Burkhardt 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>
- Burkhardt H. E., Tomé M., 2012. Tree Form and Stem Taper Modeling Forest Trees and Stands. In: *Modeling Forest Trees and Stands*, Burkhardt H. E., Tomé M. (eds). Springer Science & Business Media, Netherlands, 9-41. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3170-2>
- Cailliez F., 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento – Vol. 1 - estimación del volumen. *FAO*, 22/1, 100 p. <https://www.fao.org/3/ap353s/ap353s.pdf>
- Calama R., Sánchez-González M., Garchi S., Ammari Y., Cañellas I., Sghaier T., 2012. Towards the sustainable management of Thuya (*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., Burkhardt H. E., 1980. Cubic-foot volume of loblolly pine to any height limit. *Southern Journal of Applied Forestry*, 4: 166-168. <https://doi.org/10.1093/sjaf/4.4.166>
- 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: 808-808. <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 ONF*, 22-32. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01143797>
- DGF, 1995. Résultats du premier inventaire forestier national en Tunisie. *Ministère de l'Agriculture, Tunisie*, 88 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. <http://dx.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>
- Draper N. R., Smith H., 1981. *Applied regression analysis*. Wiley, 709 p.
- 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>
- Furnival G. M., 1961. An index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science*, 7: 337-341.
- Freire J., Tomé M., Tavares M., 2003. Equação de Volume Local para a *Pinus pinaster* Aiton na Serra da Lousã. *Silva Lusitana*, 11 (2): 207-215. [https://www.researchgate.net/publication/238096570\\_Equacao\\_de\\_Volume\\_Local\\_para\\_a\\_Pinus\\_pinaster\\_Aiton\\_na\\_Serra\\_da\\_Lousa](https://www.researchgate.net/publication/238096570_Equacao_de_Volume_Local_para_a_Pinus_pinaster_Aiton_na_Serra_da_Lousa)
- 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>

- Harvey A. C., 1976. Estimating regression models with multiplicative heteroscedasticity. *Econometrica*, 44: 461-465.
- 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://www.researchgate.net/publication/267946569\\_Taper\\_functions\\_for\\_lodgepole\\_pine\\_Pinus\\_contorta\\_and\\_Siberian\\_larch\\_Larix\\_sibirica\\_in\\_Iceland](https://www.researchgate.net/publication/267946569_Taper_functions_for_lodgepole_pine_Pinus_contorta_and_Siberian_larch_Larix_sibirica_in_Iceland)
- 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>
- Kitikidou K., Milios E., Radoglou K., 2017. Single-entry volume table for *Pinus brutia* in a planted peri-urban forest. *Annals of Silvicultural Research*, 41 (2): 74-79. <http://dx.doi.org/10.12899/asr-1437>
- 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>
- Morice E., Chartier F., 1954. Méthode statistique. T. 1 : Élaboration des statistiques. T. 2 : Analyse statistique [compte-rendu] (2<sup>ème</sup> vol.). Paris, Imprimerie Nationale, 187 p. et 555 p.
- Pépinières de l'Atlantique, 2023. Pin maritime. Site web. <https://www.pepinieres-atlantique-mercier.com/nos-arbres/coniferes/pin-maritime/>
- Özçelik 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: 78-91. <https://doi.org/10.5849/forsci.14-212>
- Özçelik 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: 851-863. <https://journals.tubitak.gov.tr/cgi/viewcontent.cgi?article=1387&context=agriculture>
- Palm R., 1988. Les critères de validation des équations de régression linéaire. Notes de statistique et d'informatique, Faculté des Sciences Agronomique de Gembloux, 27 p. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/113726/1/88-1-Crit-ValidEqRégLin.pdf>
- Palm R., 1986. Étude des résidus de régression : principes et application. Notes de statistique et d'informatique, Faculté des Sciences Agronomique de Gembloux, 13 p.
- Palm R., 1981. Calcul et choix des équations de cubage d'arbres. *Bulletin de la Recherche Agronomique de Gembloux*, 16 (4) : 351-370.
- Pardé J., Bouchon J., 1988. Dendrométrie (2<sup>ème</sup> éd.). École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy, 328 p.
- Parresol B. R., 1993. Modeling multiplicative error variance: An example predicting tree diameter from stump dimensions in baldcypress. *Forest Science*, 39 (4): 670-679. <https://academic.oup.com/forestscience/article-abstract/39/4/670/4627169>
- 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/nos-publications/tarif-cubage-diametre-longueur-variables/>
- 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, 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>
- Sagvan M. H., Shamsudin I., Khalid R. H., Kamziah B. K., 2018. Development of Volume Function for Final Felling of *Pinus brutia* Ten in Kurdistan Iraq. *Environmental Analyses and Ecological Studies (EAES)*, 3 (1): EAES.000554.2018. <http://dx.doi.org/10.31031/eaes.2018.03.000554>
- 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://doi.org/10.1051/forest:2005065>
- Sánchez-González M., Cañellas I., Montero G., 2007. Generalized height-diameter and crown diameter prediction models for cork oak forests in Spain. *Investigación agraria. Forest System*, 16: 76-88. <https://fs.revistas.csic.es/index.php/fs/article/view/999>
- SAS Institute Inc., 2004. SAS/ETS 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc, Cary, NC, 2436 p. [https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc\\_91/ets\\_ug\\_7314.pdf](https://support.sas.com/documentation/onlinedoc/91pdf/sasdoc_91/ets_ug_7314.pdf)
- Selmi M., 1985. Différenciation des sols et fonctionnement des écosystèmes sur grès numidien de Kroumirie (Tunisie). Écologie de la subéraie zenaie. Thèse de doctorat des sciences naturelles, Université de Nancy I, 200 p.
- Sghaier T., Ben Abdallah M. A., 2022. Modélisation de la biomasse aérienne et construction d'un diagramme de gestion de densité d'un jeune peuplement en mélange de pin pignon (*Pinus pinea* L.) et de pin maritime (*Pinus pinaster* Soland) dans le Nord-Ouest de la Tunisie. *Revue Internationale GEO-ECO-TROP*, 46 (1) : 63-93. [https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub\\_461\\_05.pdf](https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_461_05.pdf)
- 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. <https://doi.org/10.19182/bft2022.354.a36817>
- Sghaier T., Garchi S., Aziz T., 2020. Modélisation de la croissance et de la production du liège en Tunisie. *Bois et Forêts des Tropiques*, 346 (4) : 1-20. <https://doi.org/10.19182/bft2020.346.a31805>
- 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. *Revue Internationale Geo-Eco-Trop*, 43 (1): 145-160. [https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub\\_431\\_11.pdf](https://www.geoecotrop.be/uploads/publications/pub_431_11.pdf)

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: 79-88. <https://doi.org/10.3832/IFOR1389-008>

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://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)

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'ÉQUATIONS DE CUBAGE D'ARBRES POUR LE PIN D'ALEP Pinus halepensis Mill EN TUNISIE](https://www.researchgate.net/publication/259286015)

Shahzad M. K., Hussain A., Burkhart H. E., Li F., Jiang L., 2020. 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>

Shaïek O., Loustau D., Garchi S., Bachtobji B., El Aouni M. H., 2010. Estimation allométrique de la biomasse du pin maritime en dune littorale : cas de la forêt de Rimel (Tunisie). *Forêt Méditerranéenne*, tome XXXI (3) : 231-242.

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.researchgate.net/publication/312069493> [Stem taper equations for Betula alnoides in South China](https://www.researchgate.net/publication/312069493)

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* L. Gaertn.) 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 de la Recherche Agronomique de Gembloux*, 14 (3-4) : 267-284. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/117068>

Tomé M., Patrício M. S., Monteiro M. L., 2005. Biomass Equations for *Castanea sativa* High Forest in the Northwest of Portugal. *Proceedings of the III International Chestnut Congress*, Abreu C. G., Rosa E., Monteiro A. A. (eds). ISHS, *Acta Horticulturae*, 693. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2005.693.98>

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*, vol. LIX (6) : 609-624. <https://hal.science/hal-03449676/document>

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., Matney T. G., 1981. A prediction system for cubic foot volume of loblolly pine applicable through much of its range. *Southern Journal of Applied Forestry*, 186-189. <https://doi.org/10.1093/sjaf/5.4.186>

Yousefpour M., Fadaie Khoshkebijary F., Fallah A., Naghavi F., 2012. Volume equation and volume table of *Pinus pinaster* Ait. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 3 (5): 1072-1076. <https://www.researchgate.net/publication/309418719>

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://www.researchgate.net/publication/270892733> [A single-tree additive biomass model of Quercus variabilis Blume forests in North China](https://www.researchgate.net/publication/270892733)

### Essoussi et al. – Déclaration de contribution des auteurs du crédit

Rôle du contributeur	Noms des auteurs
Conceptualisation	T. Sghaier
Gestion des données	T. Sghaier, I. Essoussi
Analyse formelle	T. Sghaier, I. Essoussi
Acquisition du financement	INRGREF
Enquête et investigation	T. Sghaier, I. Essoussi
Méthodologie	T. Sghaier, I. Essoussi
Gestion de projet	T. Sghaier
Ressources	INRGREF
Logiciels	T. Sghaier, I. Essoussi
Supervision	T. Sghaier
Validation	I. Essoussi, T. Sghaier
Visualisation	T. Sghaier, I. Essoussi
Écriture – Préparation de l'ébauche originale	I. Essoussi, T. Sghaier
Écriture – Révision et édition	T. Sghaier, I. Essoussi

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