



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

Above-ground biomass modeling and construction of a Stand Density Management Diagram of a young mixed Umbrella pine (*Pinus pinea* L.) and Maritime pine (*Pinus pinaster* Soland) stand in Northwest of Tunisia

Tahar SGHAIER¹ & Mohamed Ali BEN ABDALLAH¹

Abstract : Allometric equations for predicting volume of wood (V), vegetative (Wv) and woody (Ww) above-ground biomasses, at tree level and stand level, were adjusted by using data collected from trees and stands coming from mixed *pinus pinea* and *pinus pinaster* forest in northwest of Tunisia. To ensure the additivity of the two components of biomass and to solve the problem of dependence between the residues of the various equations which use the same independent variables, Seemingly Unrelated Regression (SUR), based on generalized least squares method, was used to fit the system of equations. A Stand Density Management Diagram (SDMD), based on the use of the Stand Density Index (SDI) and the Relative Density Index (RDI) was developed. The SDMD incorporates isolines which determine according to the density and the average height of the stand, some quantitative variables at the stand level such as the quadratic mean diameter, the volume of wood, the vegetative and woody above-ground biomasses, the stand density index, the stock levels and the ratio of vegetative biomass by woody biomass. The developed allometric equations and the resulting SDMD are useful tools to predict the volume of wood and the vegetative and woody above-ground biomasses, to project the development of the stand over time and to determine the opportune moments of thinning and their intensity.

Key words: Above-ground biomasses, SDMD, *Pinus pinea* L., *Pinus pinaster*, Tunisia.

Résumé : Des équations allométriques permettant d'estimer le volume du bois fort (V) et les deux biomasses aériennes végétative (Wv) et ligneuse (Ww), à l'échelle arbre et à l'échelle peuplement, ont été ajustées sur des données collectées sur des arbres et des placettes échantillonnés dans un jeune peuplement en mélange de Pin pignon (*Pinus pinea*) et de Pin maritime (*Pinus pinaster* Soland. ssp *Renouii* H. del Villar) au Nord-Ouest de la Tunisie. Pour assurer l'additivité des deux composantes de biomasse et résoudre le problème de dépendance entre les résidus des différentes équations qui utilisent les mêmes variables indépendantes, ces dernières ont été ajustées à l'aide d'un système d'équations selon la méthode de régression sans corrélation apparente (SUR : Seemingly Unrelated Regression), basée sur les moindres carrés généralisés. Un diagramme de gestion de densité de peuplement (DGDP), basé sur l'utilisation de l'indice de densité de peuplement (stand density index : SDI) et de l'indice de densité relative (Relative Density Index : RDI) a été élaboré. Ce DGDP incorpore des isolignes qui déterminent en fonction de la densité et la hauteur moyenne des grandeurs quantitatives à l'échelle du peuplement telles que le diamètre quadratique moyen, le volume du bois fort, les biomasses aériennes ligneuse et végétative, les niveaux de stock et le rapport de la biomasse végétative par rapport à la biomasse ligneuse. Les équations allométriques développées et le DGDP résultant sont des outils utiles pour prédire le volume bois fort, les biomasses aériennes végétative et ligneuse, projeter le développement des peuplements dans le temps et déterminer les moments opportuns des éclaircies et leur intensité.

Mots clés: Equations allométriques, Biomasses aériennes, DGDP, *Pinus pinea*, *Pinus pinaster*, Tunisie.

INTRODUCTION

Les forêts jouent un rôle primordial sur les plans écologiques (habitats pour la biodiversité, régulation du cycle du carbone et de l'eau, protection des sols), économiques (commerce du bois, source de produits forestiers non ligneux, source d'emplois) et sociaux (fourniture des aliments et de médicaments, usages récréatifs, besoins spirituels).

Université de Carthage

¹ : Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts (INRGREF),
BP 10, 2080 Ariana- Tunisia.

E-mail : sghaier.tahar@iresa.agrinet.tn

L'information sur la biomasse des arbres et des peuplements forestiers présente aujourd'hui un intérêt considérable à cause de ses multiples utilisations pratiques dans le domaine forestier. Parmi ces utilisations, on peut citer l'évaluation du potentiel d'adaptation des espèces à l'environnement, la mesure du potentiel de séquestration de carbone des forêts et l'optimisation d'une gestion soutenable des ressources forestières. Par comparaison aux forêts des régions tempérées, tropicales ou équatoriales, les forêts méditerranéennes sont relativement peu étudiées de point de vue estimation de la biomasse et séquestration de carbone. Le peu d'intérêt donné aux forêts méditerranéennes quant à l'estimation de la biomasse peut être expliqué par la faible productivité ligneuse de ces forêts et la sous-estimation de leur rôle dans la protection contre l'érosion et la dégradation des sols, la régulation du cycle hydrologique et la conservation des eaux dans une région dont le climat présente des contrastes saisonniers importants (CABANETTES & RAPP, 1978).

Parmi les essences méditerranéennes utilisées largement dans les reboisements en Tunisie, on trouve le Pin pignon (*Pinus pinea* L.) et le Pin maritime (*Pinus pinaster* Soland. ssp *Renoui* H. del Villar). Le Pin pignon est une espèce forestière introduite et naturalisée en Tunisie. Cette espèce a été utilisée en reboisement en Tunisie depuis 1907 pour stabiliser les dunes littorales de Bizerte au Nord et, dès 1930, pour stabiliser les dunes littorales le long des côtes Nord-Est dans la région du Cap Bon (HASNAOUI, 2000). La réussite de ces premières plantations a incité les forestiers à employer cette espèce pour assurer un couvert végétal aux dunes littorales du Nord-Ouest. De nouveau, le succès des plantations de Pin pignon dans les dunes de Saouania, Ouechtata, Béchateur et Remel a encouragé les forestiers à utiliser cette espèce pour reboiser les suberaies dégradées du Nord-Ouest (SGHAIER *et al.*, 2006). L'aire de répartition en Tunisie comprend les bioclimats humide et sub-humide. Dans ces franges bioclimatiques, le Pin pignon s'est montré bien acclimaté aux conditions locales et a donné des productions intéressantes malgré la diversité des conditions pédoclimatiques rencontrées (KHOUJA, 2003). Le bois de Pin pignon est employé pour la construction de bateaux, de pilotis, de bois de mine, de bois de charpente, de poteaux et de menuiserie grossière. Il est également employé en papeterie pour la production de cellulose et de pâte à mécanique (HASNAOUI, 2000). Malgré ses propriétés physiques et mécaniques comparables et même supérieures à celles d'Espagne, le bois de Pin pignon tunisien est principalement utilisé dans l'industrie de trituration et la fabrication de palettes. Comme le Pin pignon, le Pin maritime est une espèce largement utilisée en Tunisie en particulier pour le boisement des zones littorales sur sol sableux (SHAIEK *et al.*, 2010). C'est l'espèce la plus utilisée dans les reboisements en Tunisie, après le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) et le Pin pignon (DGF, 1995). Elle couvre 5120 ha sous forme de peuplements purs et 2623 ha sous forme de peuplements en mélange avec le chêne-liège (*Quercus suber* L.), localisés essentiellement dans la zone littorale du nord du pays, regroupant des forêts naturelles et artificielles (IFN, 2005). Le Pin maritime se trouve à l'état naturel sur les grès siliceux de la région de Tabarka (Kroumirie) où il s'est propagé aux dépens du chêne-liège à la suite d'incendies. Il a été introduit, depuis le début du siècle dernier, sur les dunes littorales de Tabarka, de Dar Chichou (Cap Bon), puis à partir des années 1950, sur celles de Kroumirie et des Mogods (SHAIEK *et al.*, 2010). C'est une espèce qui joue un rôle important dans l'aménagement écologique (drainage des marais, protection des sols) et économique (production de bois) (MARIETTA *et al.*, 2001). Le bois du Pin maritime est utilisé sous forme de bois d'œuvre (menuiserie, ébénisterie) ou de fibres (pâte à papier), ou encore pour la production d'énergie par combustion ou transformation chimique (BISCH, 1986).

Pour l'estimation de la biomasse des arbres, les chercheurs ont souvent recours à l'allométrie qui est définie comme la relation entre deux ou plusieurs caractéristiques de la taille d'un arbre (PICARD *et al.*, 2012). Les relations allométriques en foresterie concernent le diamètre, la hauteur, les dimensions du houppier, le volume et la biomasse de l'arbre (King, 1996). Actuellement, il existe deux approches fondées sur l'utilisation des relations allométriques pour estimer la biomasse d'un arbre. La première approche utilisée est basée sur des équations allométriques qui permettent de prédire directement la biomasse totale ou partielle (biomasse aérienne, biomasse souterraine, biomasse ligneuse, biomasse végétative, etc.) d'un arbre en fonction de quelques variables ou prédicteurs mesurés directement sur l'arbre concerné. D'après CHAVE *et al.* (2005), les prédicteurs les plus importants de la biomasse sont par ordre d'importance: le diamètre du tronc, la densité du bois et la hauteur totale de l'arbre. D'autres études plus récentes (GOODMAN *et al.*, 2014 ; PLOTON *et al.*, 2016) ont mentionné l'importance de considérer les dimensions du houppier dans l'amélioration de la qualité de l'estimation de la biomasse des arbres. La deuxième approche, considérée comme une méthode indirecte, utilise un tarif de cubage pour estimer le volume du tronc de l'arbre en fonction du diamètre et éventuellement de la hauteur du fût, puis utilise la densité du bois pour convertir le volume du tronc en biomasse du tronc. Cette biomasse du tronc est étendue par la suite à la biomasse aérienne totale par l'intermédiaire d'un facteur d'expansion de la biomasse (BROWN *et al.*, 1989 ; MALIRO *et al.*, 2010).

La biomasse totale d'un arbre peut être subdivisée en biomasse souterraine et biomasse aérienne. Cette dernière peut être subdivisée à son tour en deux composantes de biomasses : la biomasse ligneuse et la biomasse végétative. La biomasse ligneuse correspond à la biomasse du bois fort de l'arbre (tiges et branches ayant un diamètre de 7 cm et plus), tandis que la biomasse végétative correspond à la biomasse du reste de la partie aérienne (tiges et branches avec un diamètre inférieur 7 cm, plus les aiguilles ou les feuilles). Pour des utilisations pratiques, chaque composante de biomasse aérienne est estimée séparément à l'aide d'une relation ou

équation allométrique. La biomasse totale aérienne de l'arbre correspond à la somme des biomasses des deux composantes (ligneuse et végétative). Pour assurer l'additivité ou la compatibilité des deux composantes de la biomasse aérienne d'un arbre, une contrainte doit être imposée au système d'équations de prédiction des deux composantes de biomasse de telle sorte que la somme des prédictions de ces composantes sera égale à la biomasse totale (PARRESOL, 2001). Deux approches de modélisation ont été proposées par les chercheurs pour développer des modèles compatibles de biomasse (ZHENG *et al.*, 2015) : (i) l'équation de biomasse totale est définie comme la somme des deux meilleures équations, ajustées par la méthode des moindres carrés ordinaires (OLS : Ordinary Least Squares), correspondantes aux deux composantes de biomasse calculées séparément (BRCB : Best Regression functions of Component Biomasses), et (ii) l'ajustement simultané d'un système d'équations par la méthode des moindres carrés généralisée conjointe (JGLS : Joint-Generalized Least Squares) comme la méthode de régression sans corrélation apparente (SUR : Seemingly Unrelated Regression), la méthode de régression des moindres carrés en deux étapes (2SLS : Two-Stage Least-Squares), la méthode de régression des moindres carrés en trois étapes (3SLS : Three-Stage Least-Squares method) et la méthode des moments généralisés (GMM : Generalized Method of Moments). Cette deuxième approche d'estimation des paramètres d'un système d'équations possède l'avantage d'inclure les dépendances entre les termes d'erreurs des composantes de biomasse considérées.

Les modèles d'estimation de la biomasse, comme ceux d'estimation des volumes du bois ou tarifs de cubage, sont des outils de prédiction du rendement des peuplements forestiers. Ces outils peuvent être combinés avec d'autres modèles tels que les modèles de densité et de mortalité pour donner naissance à des Diagrammes de Gestion ou d'aménagement de Densité des Peuplements forestiers (DGDP). Les DGDP en Français ou SDMD en Anglais (Stand Density Management Diagrams) sont des outils utiles pour concevoir et évaluer des régimes alternatifs de gestion de densité sans le besoin de mettre en application n'importe quelle action sylvicole (CASTAÑO-SANTAMARÍA *et al.*, 2016). Ces diagrammes ou guides de densité représentent, sous forme de graphiques, la relation entre le rendement, la densité et la mortalité à différents stades de développement d'un peuplement. Ils sont largement utilisés aux Etats-Unis parce qu'ils ne sont pas significativement influencés par la qualité du site, l'âge ou la structure du peuplement (GINGRICH, 1967). L'avantage de tels guides est de considérer la diminution de densité naturelle qui survient à mesure que la surface terrière augmente lors du développement du peuplement (STOUT, 1987). D'après NEWTON (1974), l'aménagement de la densité de peuplement consiste à réguler la quantité de matériel sur pied en manipulant la densité dans le but d'atteindre des objectifs de gestion précis.

Dans l'objectif de mettre à la disposition des gestionnaires forestiers des outils de prédiction du rendement, d'évaluation des activités d'aménagement et de développement d'une sylviculture adaptée à un peuplement en mélange de deux résineux (Pin pignon et Pin maritime), nous nous sommes proposé dans le cadre de ce travail de :

- développer des modèles compatibles de prédictions des deux composantes de biomasses aériennes aux deux échelles, arbre et peuplement.
- établir des tarifs de cubage du bois fort aux deux échelles, arbre et peuplement.
- construire des Diagrammes de Gestion de Densité de Peuplement (DGDP) pour le peuplement étudié et pour des peuplements similaires.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Zone d'étude, matériel expérimental et données collectées

La zone d'étude est localisée dans la forêt de Zouarâa, située dans les dunes sableuses des côtes Nord-Ouest de la Tunisie. Les données proviennent d'une jeune plantation de Pin pignon (*Pinus pinea* L.) d'environ 300 ha avec quelques régénérations naturelles de Pin maritime (*Pinus pinaster*). La forêt était occupée à l'origine par des peuplements denses de Pin maritime dont une partie incendiée en 1999 et replantée en 2003-2004 par le Pin pignon. Au total 35 placettes temporaires de mesures ont été installées de manière à couvrir la variabilité de mixité, de dimensions des arbres, de densité et de topographie. Les placettes ont une forme circulaire, de rayon variable allant de 6,8 à 19,30 m de manière à ce que chaque placette renferme 40 tiges. Le diamètre à la base (DRC : Diameter at Root Collar), le diamètre à 1,30 m de hauteur ou à hauteur d'homme (DBH : Diameter at Breast Height), la hauteur totale (H), la hauteur du houppier (HC : Crown Height) et le diamètre du houppier (DC : Crown Diameter) ont été mesurés sur chaque arbre de la placette. L'âge de chaque arbre a été déterminé par le comptage du nombre de verticilles.

Afin de sélectionner un échantillon d'arbres représentatif pour les mesures des biomasses aériennes et du volume de bois, tous les arbres mesurés dans les différentes placettes ont été distribués par espèce et par classe de hauteur. Trente arbres de Pin maritime et 30 arbres de Pin pignon ont été sélectionnés proportionnellement au nombre d'arbres de chaque classe de hauteur. Chaque arbre sélectionné a été coupé au niveau du sol et les deux biomasses aériennes ont été séparées et pesées à l'aide d'une balance électronique. Il s'agit de la biomasse

ligneuse (W_w : tiges et branches ayant un diamètre de 7 cm et plus) et la biomasse végétative (W_v : tiges et branches avec un diamètre inférieur 7 cm plus les aiguilles). Le bois fort de la tige principale et des branches dont le diamètre atteint ou dépasse 7 cm de chaque arbre abattu a été découpé en billons successifs de 0,5 m de longueur et son volume total V a été calculé selon la méthode des billons (RONDEUX, 1993).

Modèles additifs de biomasses aériennes d'arbre individuel

Plusieurs études précédentes ont montré que le diamètre à hauteur d'homme (DBH) est considéré comme un prédicteur simple et fiable des deux biomasses aérienne et souterraine des arbres (KARIZUMI, 1974 ; SANTANTONIO *et al.*, 1977 ; TER-MIKAELIAN et KORZUKHIN, 1997). Toutefois, pour augmenter la précision des modèles permettant d'estimer les différentes biomasses, d'autres variables mesurées à l'échelle de l'arbre peuvent être utilisées telles que le diamètre mesuré au niveau du sol (DRC), la hauteur total (H), la hauteur du houppier (HC) et le diamètre du houppier (DC).

Etant donné les bonnes relations observées entre la biomasse totale et les autres variables mesurées autres que le DBH (Tableau 3) au niveau des arbres coupés essentiellement pour la hauteur (H), le diamètre à la base (DRC) et la hauteur de la couronne (HC), il est important d'appliquer et d'évaluer de tels prédicteurs pour développer des équations allométriques fiables pour ces deux espèces étudiées. Ainsi, pour modéliser la biomasse (W) par compartiment, les fonctions allométriques suivantes ont été testées et comparées. Les équations 1 à 4 ont été utilisées dans différentes études précédentes (TOMÉ *et al.*, 2005 ; CORREIA *et al.*, 2010 ; SHAIK *et al.*, 2011 ; SGHAIER *et al.*, 2013 ; PÉREZ-CRUZADO *et al.*, 2015), tandis que les équations 5 et 6 ont été utilisées la première fois par TOMÉ *et al.* (2005) puis par GOUBI *et al.* (2019).

$$W_i = b_1 d_i^{b_2} + \varepsilon_i \quad (1)$$

$$W_i = b_1 (d_i h_i)^{b_2} + \varepsilon_i \quad (2)$$

$$W_i = b_1 (d_i^2 h_i)^{b_2} + \varepsilon_i \quad (3)$$

$$W_i = b_1 d_i^{b_2} h_i^{b_3} + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$W_i = b_1 d_i^{b_2} e^{(b_3 d_i)} + \varepsilon_i \quad (5)$$

$$W_i = d_i^{(b_1 + b_2 h_i)} + \varepsilon_i \quad (6)$$

où W_i est la biomasse verte de l'arbre i (kg/arbre), d_i est son diamètre, h_i est sa hauteur totale (H), hc_i est la hauteur de son houppier (HC) et ε_i est un résidu. Les six fonctions énumérées ci-dessus ont été ajustées deux fois, une première fois en utilisant le diamètre mesuré à la base (DRC) et une deuxième fois celui mesuré à hauteur d'homme (DBH).

Pour résoudre le problème d'hétéroscédasticité détectée durant le processus d'ajustement des différentes équations et avoir des estimations efficaces des paramètres, chaque observation a été pondérée par d_i^{-2} . Dans ce cas, l'équation 1 par exemple prendra la forme suivante :

$$(W_i) d_i^{-2} = (b_1 d_i^{b_2} + \varepsilon_i) d_i^{-2} \quad (7)$$

Pour l'ajustement des équations de biomasse, nous avons procédé en deux étapes:

1° Les six équations non linéaires citées ci-haut ont été ajustées par la méthode des moindres carrés ordinaires (OLS : Ordinary Least Squares) pour chaque espèce et chaque composante de biomasse (ligneuse et végétative). Par la suite, le modèle de biomasse totale de chaque espèce est défini comme la somme des deux meilleures équations correspondantes aux deux compartiments de biomasses calculées séparément (BRCB : Best Regression functions of Component Biomasses). Cette approche présente l'inconvénient de ne pas tenir compte du principe de l'additivité des différentes composantes de biomasse et de la corrélation entre ces composantes.

2° Les paramètres des deux équations de biomasses sélectionnées en 1° relatives aux deux composantes de biomasse pour chaque espèce ont été ajustés simultanément à l'aide d'un système d'équations non linéaires par la méthode de régression des moindres carrés généralisée conjointe (JGLS : Joint-Generalized Least Squares). Ces systèmes d'équations non linéaires (un système par espèce) dont les termes d'erreurs sont corrélés ont été résolus par la méthode de régression non-linéaire sans corrélation apparente (NSUR : Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations), la méthode des moindres carrés non-linéaires en deux étapes (N2SLS :

Nonlinear two-Stage Least-Squares method), la méthode des moindres carrés non-linéaires en trois étapes (N3SLS : Nonlinear three-Stage Least-Squares method) et la méthode des moments généralisés (GMM : Generalized Method of Moments). Ces méthodes d'estimation des paramètres d'un système d'équations permettent l'inclusion des dépendances entre les termes d'erreurs des composantes de biomasse considérées (ZHENG *et al.*, 2015), garantissant ainsi la propriété d'additivité des prédictions des deux composantes de biomasse et celle de la biomasse totale de chaque arbre. L'estimation des paramètres des différentes équations a été réalisée à l'aide de la procédure « Model » du SAS/ETS (SAS, 2004).

Critères d'évaluation des modèles ajustés

Tous les modèles ou équations ont été évalués en tenant compte de la qualité de leur ajustement aux données, de leur capacité prédictive et de la normalité de la distribution de leurs résidus. La qualité d'ajustement des modèles étudiés a été évaluée en examinant les valeurs du biais (Biais), l'écart-type résiduel (*RMSE* : Root Mean Square Error) et le coefficient de détermination ajusté (R_{adj}^2). En absence de données de validation (petits échantillons), la capacité prédictive des différents modèles testés a été évaluée en utilisant la méthode de Jackknife (Leave-One-Out Jackknife method) avec les résidus *PRESS* (Prediction Sum of Squares) ou erreurs de prédiction (SÁNCHEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2005 ; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2007). Ces résidus sont équivalents aux résidus obtenus en omettant chaque fois une observation des données, ajuster le modèle sur les autres observations, estimer la réponse pour l'observation omise et comparer la valeur estimée ou prédite à la valeur observée : $W_i - \hat{W}_{i,-i} = e_{i,-i}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) où W_i est la valeur observée, $\hat{W}_{i,-i}$ est la valeur estimée de l'observation i (lorsque cette dernière est absente des données qui ont servi à l'ajustement du modèle) et n est le nombre d'observations. Chaque modèle possède n résidus *PRESS* et la quantité *PRESS* (Prediction Sum of Squares) est définie comme :

$$PRESS = \sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_{i,-i})^2 \quad (8)$$

Plus la valeur de la statistique *PRESS* est proche de la somme des carrés des écarts résiduels, plus la capacité prédictive du modèle en terme de précision est meilleure. Les résidus *PRESS* ont été également utilisés pour calculer le biais de prédiction ($Biais_p$), l'écart-type résiduel de prédiction ($RMSE_p$) et l'efficacité prédictive du modèle (R_{press}^2) ou coefficient de détermination calculé sur les résidus *PRESS*. La normalité de la distribution des résidus a été examinée par le test de Ryan-Joiner (RYAN et JOINER, 1976) et la présentation graphique des quantiles normaux (QQ-probability plots).

Pour sélectionner la meilleure approche à retenir pour ajuster le système d'équations non linéaires (BRCB, SUR, 2SLS, 3SLS ou GMM), nous avons utilisé le biais, *RMSE*, R_{adj}^2 et la moyenne quadratique des erreurs relatives (*MQER*) (PALM, 1981, 1986; RONDEUX, 1993):

$$MQER = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i - \hat{W}_i}{\hat{W}_i} \right)^2} \quad (9)$$

La moyenne quadratique des erreurs relatives est plus liée aux erreurs commises sur les petits arbres. Plus la valeur de ce paramètre est faible, plus l'ajustement du modèle est meilleur. Le choix de ce critère est justifié par le caractère jeune des peuplements étudiés.

Estimation du volume du bois fort et de la biomasse à l'échelle de la placette

Le volume total du bois et la biomasse aérienne (biomasse ligneuse et végétative) à l'échelle de la placette ont été calculés en sommant le volume et la biomasse estimés de tous les arbres de la placette sur pied en utilisant les équations de volume et de biomasse ajustées à l'échelle de l'arbre par espèce.

Construction d'un diagramme de gestion de la densité de peuplement et courbes de niveaux de stock

La construction d'un DGDP consiste à caractériser le stock sur pied d'un peuplement en reliant la taille moyenne des arbres à la densité, par le biais des indices de densité tels que l'indice de densité de peuplement (stand density index) de REINEKE (1933), l'indice relative d'espacement (WILSON, 1946) ou les règles d'auto-

éclaircie (YODA *et al.*, 1963). Dans le présent travail, nous proposons de construire un DGDP en utilisant l'indice de densité de peuplement (Stand Density Index : SDI) de REINEKE qui relie le nombre d'arbres par hectare (N) au diamètre quadratique moyen (d_g) :

$$SDI = N \left(\frac{d_g}{25} \right)^{1,605} \quad (10)$$

Le plus grand avantage de SDI et des indices semblables est leur indépendance de la qualité du site et de l'âge du peuplement. Ceci signifie que les peuplements ayant les mêmes diamètres quadratiques moyens et les mêmes nombres d'arbres par hectare sont «plus semblables que des peuplements de même site et de même âge» (Mc ARDLE *et al.*, 1961). Un autre avantage de l'utilisation de l'indice SDI pour le développement d'un DGDP est qu'il est directement proportionnel à l'utilisation du site et l'occupation de l'espace de croissance (DANIEL *et al.*, 1979) et peut, par conséquent être utilisé pour des peuplements non purs ou inéquiennes (STAGE, 1968 ; LONG et DANIEL, 1990 ; COCHRAN, 1992 ; O'HARA et VALAPPIL, 1995 ; LONG, 1995, 1996), comme le cas de cette étude.

Un autre concept très important qui reflète l'espace dont un arbre dispose pour sa croissance peut être calculé. Il s'agit de l'indice de densité relative (Relative Density Index : RDI) d'un peuplement qui est une fonction de SDI (CURTIS, 1982). A mesure que l'arbre croît, l'acquisition d'espace supplémentaire ne peut se faire que par la mortalité des tiges les plus faibles (STOUT, 1987). L'indice de densité relative est le rapport entre la densité actuelle et la densité maximale théorique :

$$RDI = \frac{SDI}{\max(SDI)} \quad (11)$$

L'indice de densité relative est utilisé dans les DGDP pour délimiter les différentes zones de croissance ou de stock qui servent comme guide de densité pour la gestion optimale d'un peuplement forestier (Figure 1).

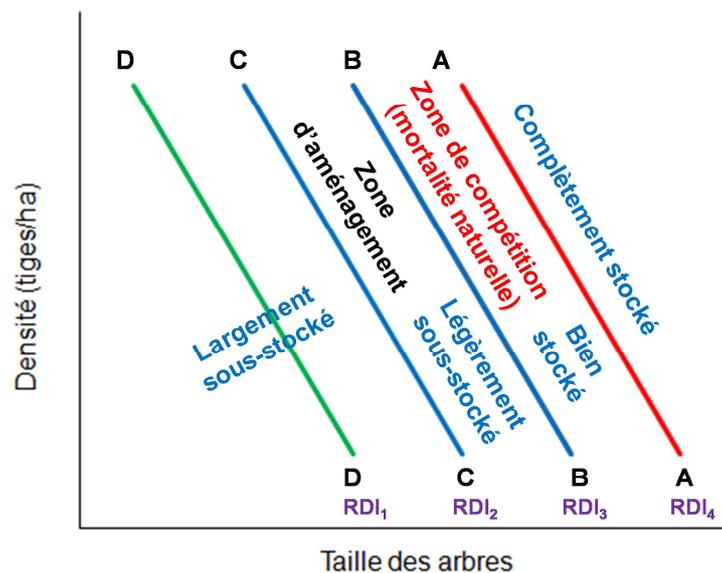


Figure 1. Guide de densité d'un peuplement forestier (courbes des niveaux de stocks).

Les quatre lignes de la figure 1 dont chacune correspond à une valeur de l'indice de densité relative (RDI) et qui séparent les différentes zones de croissance dans lesquelles peut se trouver un peuplement forestier désignent les courbes des niveaux de stocks (ALLARD *et al.*, 2000 ; PENNER *et al.*, 2006 ; VALBUENA *et al.*, 2008) :

AA : Ligne de fermeture approximative du peuplement (SDI maximum ou RDI₄ = 1).

BB : Limite supérieure de la zone d'aménagement caractérisée par une densité normale. C'est la limite au-delà de laquelle les arbres entrent en compétition sévère et l'espace vitale des arbres est fortement réduite provoquant la mortalité naturelle ou l'auto-éclaircie.

CC : Limite inférieure de la zone d'aménagement qui correspond à la densité après éclaircie. Réduire la densité à ce niveau assure au peuplement une croissance maximale et une faible mortalité (MARQUIS *et al.*, 1969 ; SAFFORD, 1983). Descendre au-dessous du niveau CC, les tiges ne peuvent plus utiliser de façon optimale tout l'espace laissé par le dégagement et la croissance globale du peuplement en est réduite (MARQUIS *et al.*, 1969).

DD : Correspond à la densité minimum recommandée pour maintenir l'occupation du site. Il faut généralement éviter de réduire la densité au niveau DD pour ne pas permettre aux espèces plus tolérantes établies en sous-étage d'envahir le site (SAFFORD, 1983).

Les valeurs de RDI correspondantes aux trois autres lignes (RDI₁, RDI₂ et RD₃) dépendent des espèces. Ces valeurs sont souvent déterminées sur la base des observations. Toutefois, les valeurs de RDI utilisées dans la littérature pour délimiter ces zones de croissance ne varient pas trop d'une espèce à une autre. A titre d'exemple, pour élaborer des DGDP pour le Sapin baumier (*Abies balsamea*) aux Etats Unis (PENNER *et al.*, 2006) et le Pin gris (*Pinus banksiana*) au Québec (GRENIER, 2000), des valeurs de RDI₂ et RDI₃ de 0,40 et 0,55 délimitant la zone d'aménagement (CC et BB) ont été utilisées. D'un autre côté, pour délimiter cette même zone d'aménagement, DEAN et BALDWIN (1993) ainsi que VALBUENA *et al.* (2008) ont utilisé des valeurs de 0,35 et 0,60 comme valeurs de RDI₂ et RD₃ pour élaborer des DGDP pour des plantations de Pin à encens (*Pinus teada* L.) aux Etats Unis pour les premiers, et des peuplements naturels de Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) et de Pin maritime (*Pinus pinaster*) en Espagne pour les seconds.

En ce qui concerne la ligne DD correspondant à la densité minimum recommandée pour maintenir l'occupation du site et éviter que d'autres espèces plus tolérantes établies en sous-étage d'envahir le site, la valeur de RDI souvent utilisée est 0,15 (RDI₁ = 0,15) quelque soit l'espèce.

Pour élaborer un outil de gestion des peuplements mixtes de Pin pignon et de Pin maritime objet de cette étude, un DGDP a été élaboré dont l'axe des abscisses (x-axis) représente la hauteur moyenne (H_m) et l'axe des ordonnées (y-axis) représente la densité (N). L'idée principale derrière ce DGDP est d'exprimer toutes les relations mathématiques dans le système en fonction de N et de H_m et de définir des isolignes pour différents niveaux de densité (SDI) et des autres variables d'intérêts du peuplement en exprimant N en fonction des autres variables pour chacune des relations mathématiques retenues. Ainsi, tous les modèles et fonctions inclus dans le système peuvent être résolus en termes de ces deux variables (N et H_m), afin de tracer des isolignes pour les différentes valeurs des autres variables dans le diagramme. Pour la construction de notre DGDP, nous proposons d'ajuster le système d'équations simultanées non linéaires suivant (équations 12-15):

$$\left\{ \begin{array}{l} d_g = a_1 H_m^{a_2} N^{a_3} \end{array} \right. \quad (12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V = b_1 d_g^{b_2} H_m^{b_3} N^{b_4} \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_w = c_1 d_g^{c_2} H_m^{c_3} N^{c_4} \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} W_v = d_1 d_g^{d_2} H_m^{d_3} N^{d_4} \end{array} \right. \quad (15)$$

L'équation 12 décrit le diamètre quadratique moyen comme une fonction de la densité et de la hauteur moyenne. Les équations 13, 14 et 15 définissent le volume bois fort et les deux biomasses aériennes ligneuse et végétative comme une fonction du diamètre quadratique moyen, la densité et la hauteur moyenne. Les paramètres a₁, a₂, a₃, b₁, b₂, b₃, b₄, c₁, c₂, c₃, c₄, d₁, d₂, d₃ et d₄ sont les coefficients à estimer des différentes équations du système. Ce système d'équations simultanées dont les termes d'erreurs sont corrélés a été résolu par la méthode de régression non linéaire sans corrélation apparente (NSUR : non-linear seemingly unrelated regression). Ici également, l'estimation des paramètres des différentes équations du système a été réalisée à l'aide de la procédure « Model » du SAS/ETS (SAS, 2004).

Pour déterminer les isolignes relatifs aux lignes de la figure 3, correspondant à certaines valeurs de l'indice de densité relative (RDI₁, RDI₂, RDI₃ et RD₄), il faut connaître l'indice de densité maximale (SDI_{max}). La valeur maximale observée de l'indice de site (SDI) dans les peuplements étudiés était de l'ordre de 400. Etant donné le caractère jeune des peuplements étudiés, et suite à deux études portant sur la croissance et la production du Pin pignon (*Pinus pinea* L.) en Tunisie (KHALDI, 2009 ; SGHAIER *et al.*, 2012) qui ont montré un SDI moyen de

l'ordre de 600, un SDI_{max} = 600 a été considéré dans cette étude pour indiquer la fermeture approximative des peuplements étudiés.

Pour établir les équations des isolignes nécessaires pour la construction du DGDP, la densité (N) a été exprimée en fonction des autres variables pour chacune des quatre équations du système (équations 12-15). Le tableau 1 présente les équations des isolignes relatives aux différentes caractéristiques d'un peuplement ainsi que les intervalles et pas de variation de chaque caractéristique. Le même tableau présente également une fonction qui permet de tracer les isolignes pour différentes valeurs du rapport k entre la biomasse aérienne végétative (W_v) et la biomasse aérienne ligneuse (W_w).

Tableau 1. Isolignes utilisés pour la construction du DGDP des peuplements en mélange de Pin pignon (*Pinus pinea* L.) et de Pin maritime (*Pinus pinaster*) en Tunisie.

Isoline pour	Equation de l'isoline	Valeurs de l'isoline
SDI	$N = \left(SDI \left(\frac{a_1 H_m^{a_2}}{25} \right)^{-1.605} \right)^{\left(\frac{1}{1+1.605 a_3} \right)}$	SDI : 50-600 par 50
dg	$N = \left(\frac{d_g}{a_1 H_m^{a_2}} \right)^{1/a_3}$	Dg : 3-22 par 1 cm
V	$N = \left(\frac{V}{b_1 a_1^{b_2} H_m^{a_2 b_2 + b_3}} \right)^{1/(a_3 b_2 + b_4)}$	V : 2-100 par 1-5-10 m ³ /ha
W _w	$N = \left(\frac{W_w}{c_1 a_1^{c_2} H_m^{a_2 c_2 + c_3}} \right)^{1/(a_3 c_2 + c_4)}$	W _w : 2-80 par 1-5-10 t/ha
W _v	$N = \left(\frac{W_v}{d_1 a_1^{d_2} H_m^{a_2 d_2 + d_3}} \right)^{1/(a_3 d_2 + d_4)}$	W _v : 5-80 par 5-10 t/ha
$K = \frac{W_v}{W_w}$	$N = \left(\frac{kc_1}{d_1} a_1^{(c_2-d_2)} H_m^{a_2(c_2-d_2)+(c_3-d_3)} \right)^{\left(\frac{1}{a_3(d_2-c_2)+(d_4-c_4)} \right)}$	K : 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5 et 3

RESULTATS

Caractéristiques dendrométriques des placettes étudiées et corrélations entre les variables mesurées

Les statistiques descriptives sommaires des valeurs moyennes des placettes relatives aux principales variables dendrométriques mesurées figurent au tableau 2.

Le tableau 3 présente la matrice des corrélations calculées entre les principales variables mesurées au niveau des arbres des deux espèces étudiées, et la figure 2 schématise les relations entre la biomasse totale et quelques unes de ces variables.

Tableau 2. Statistiques descriptives des données utilisées: valeurs moyennes des 35 placettes échantillonnées.

Variable	Moyenne	Min	Max	Ecart-type
Surface des placettes (m ²)	477,97	145,27	1170,21	278,68
N (tiges/ha)	1130	342	2754	609
Hd (m)	5,35	1,70	9,50	1,847
Hm (m)	3,05	1,13	5,52	1,192
DRC (cm)	10,59	3,63	17,61	3,755
DBH (cm)	6,34	1,77	11,90	2,765
Dg(DRC) (cm)	11,32	3,80	18,12	3,855
Dg(DBH) (cm)	7,13	1,86	12,53	2,887
BA (DCR) (m ² /ha)	10,11	2,50	31,55	6,206
BA (DBH) (m ² /ha)	3,58	0,18	15,07	3,022
HC (m)	2,75	1,13	4,63	1,009
DC (m)	1,83	1,09	2,53	0,420
V (m ³ /ha)	12,729	1,008	60,354	11,787
Ww (t/ha)	10,769	0,717	45,102	9,053
Wv (t/ha)	17,937	0,972	59,511	10,796
Wt (t/ha)	28,707	1,945	104,613	19,578
SDI	137,04	26,01	403,62	94,848

Hd: hauteur dominante, Hm: hauteur moyenne, DRC: diamètre moyen à la base, DBH: diamètre moyen à hauteur d'homme (D_{1,30}), Dg: diamètre quadratique moyen, BA: Surface terrière (basal area), HC: hauteur moyenne de la couronne, DC: diamètre moyen de la couronne, Vw: volume du bois, Ww: biomasse du bois, Wv: biomasse végétative, Wt: biomasse totale partie aérienne, SDI : indice de densité de peuplement (stand density index)

Tableau 3. Matrice des corrélations entre les variables mesurées au niveau des arbres coupés.

		Pin maritime								
		H	DRC	DBH	DC	HC	V	W _w	W _v	W _t
Pin pignon	H		0,8459	0,9132	0,7838	0,9490	0,7967	0,7947	0,7941	0,8008
	DRC	0,9578		0,9530	0,8269	0,7202	0,9207	0,9042	0,9087	0,9137
	DBH	0,9448	0,9441		0,7920	0,8104	0,9343	0,9242	0,9460	0,9217
	DC	0,8918	0,8852	0,8753		0,6731	0,7705	0,7628	0,7868	0,7810
	HC	0,9713	0,9380	0,9005	0,8843		0,6809	0,6854	0,6889	0,6927
	V	0,9069	0,8993	0,9102	0,8347			0,9812	0,9343	0,9654
	W _w	0,9203	0,9009	0,8953	0,8234	0,8550	0,9873		0,9682	0,9920
	W _v	0,8271	0,8468	0,8280	0,8033	0,8047	0,9260	0,9351		0,9921
	W _t	0,8825	0,8847	0,8718	0,8255	0,8405	0,9687	0,9796	0,9873	

Tous les coefficients de corrélation sont significatifs pour un degré de confiance $p = 0,999$.

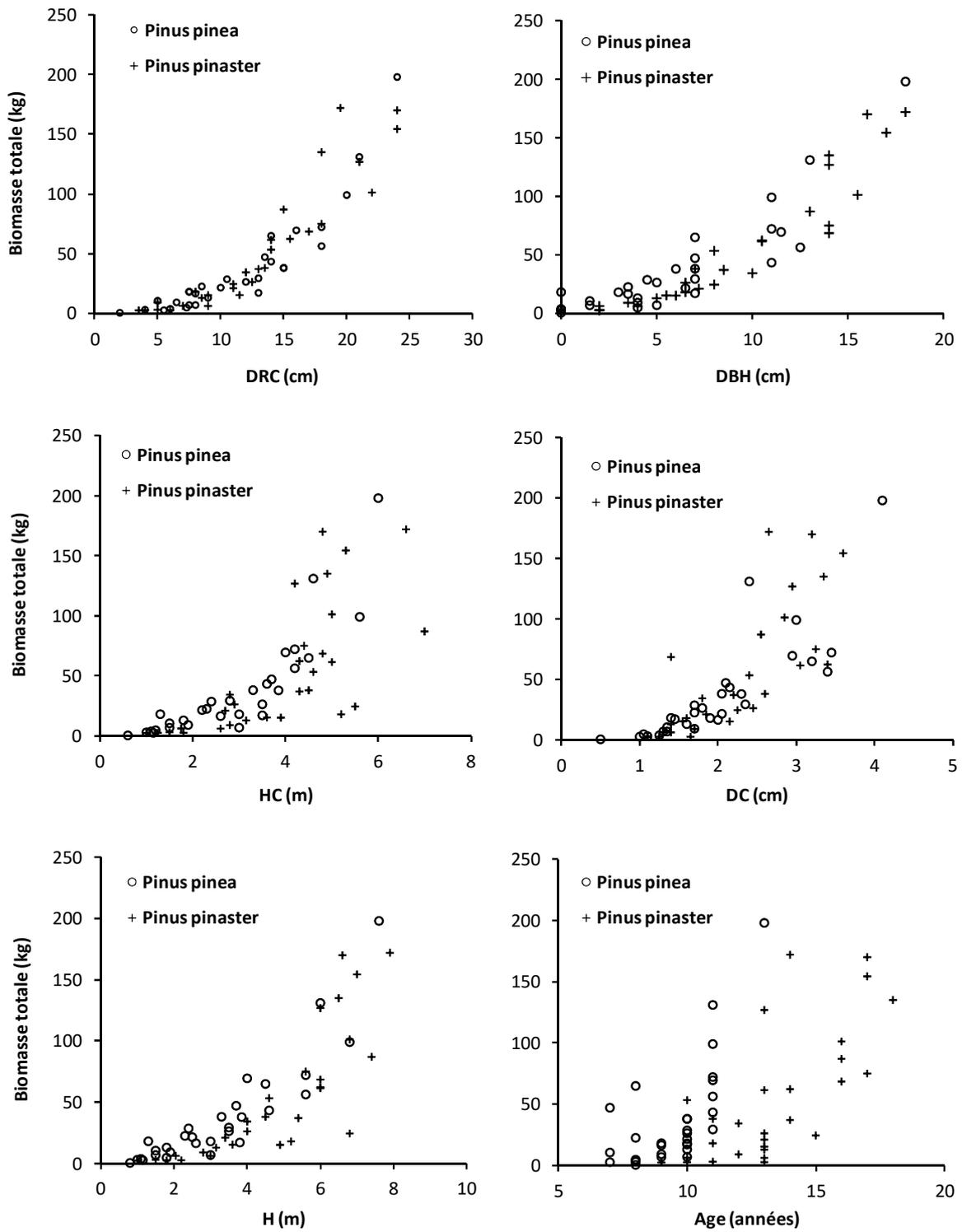


Figure 2. Biomasse aérienne totale en fonction du DCR, DBH, HC, DC, H et l'âge des arbres.

Tarifs de cubage

Pour estimer le volume bois fort des arbres des placettes mesurées en fonction de leur DBH, deux équations allométriques ont été ajustées à partir des données issues de l'analyse de tiges des arbres coupés dans les mêmes placettes. Il s'agit des équations 16 (Pin pignon) et 17 (Pin maritime) suivantes :

$$V = 0,131 \times DBH^{2,334} \quad \text{avec } RMSE = 4,979 \text{ dm}^3 \text{ et } R_{aj}^2 = 0,9102 \quad (16)$$

$$V = 0,113 \times DBH^{2,304} \quad \text{avec } RMSE = 5,536 \text{ dm}^3 \text{ et } R_{aj}^2 = 0,9639 \quad (17)$$

avec V le volume total du bois (dm³) et DBH le diamètre à 1,30 m de hauteur (cm).

Modèles individuels de prédiction des biomasses aériennes (BRCB)

L'ajustement séparé des équations 1 à 6 (Best Regression functions of Component Biomasses) relatives à la prédiction des biomasses aériennes végétative et ligneuse d'arbres individuels a montré que les meilleurs résultats sont obtenus en utilisant comme prédicteur le diamètre à la base ou au collet (DRC) pour le Pin pignon et le diamètre à hauteur d'homme (DBH) pour le Pin maritime. Le tableau 4 qui présente les valeurs estimées des paramètres et la qualité statistique des ajustements des modèles retenus montre que le même modèle (équation 1) a été sélectionné pour les deux espèces (Pin pignon et Pin maritime) pour la prédiction de la biomasse aérienne ligneuse. Deux modèles distincts ont été sélectionnés pour la prédiction de la biomasse aérienne végétative, il s'agit de l'équation 6 pour le Pin pignon et l'équation 3 pour le Pin maritime. L'équation 3 relative au Pin maritime utilise comme variables exogènes le diamètre à hauteur d'homme (DBH) et la hauteur totale de l'arbre, tandis que l'équation 6 relative au Pin pignon utilise le diamètre du tronc au collet (DRC) et la hauteur du houppier (HC) comme variables exogènes.

Tableau 4 – Paramètres estimés et qualité statistique des ajustements des modèles retenus pour la prédiction des biomasses aériennes d'arbres individuels.

Espèce	Type biom.	Eq.	Parm.	Est.	p-value	Capacité d'ajustement			Capacité de prédiction		
						Bias	RMSE	R _{adj} ²	Bias _p	RMSE _p	R _{press} ²
Pin pignon (d=DRC)	W _w	1	b ₁	3,048E-3	0,0412	0,069	3,582	0,965	0,068	3,581	0,967
			b ₂	3,2148	<0,0001						
	W _v	6	b ₁	0,9266	<0,0001	-0,013	9,031	0,860	-0,003	9,038	0,869
			b ₂	0,0884	<0,0001						
Pin maritime (d=DBH)	W _w	1	b ₁	6,615E-2	0,0229	0,023	6,581	0,938	0,024	2,566	0,942
			b ₂	2,4963	<0,0001						
	W _v	3	b ₁	0,7517	0,0029	-0,321	10,470	0,848	-0,324	3,237	0,855
			b ₂	0,5970	<0,0001						

Type biom.: Type de biomasse, Eq. : Équation, Parm. : Paramètre, Est. : Valeur estimée.

Les figures 3 et 4 présentent sur le même graphique, pour chaque espèce et chaque compartiment de biomasse, la projection des données observées et la courbe simulée à partir du modèle ajusté (équations 1 et 6 pour le Pin pignon et équation 1 et 3 pour le Pin maritime) accompagnée du QQ-probability plot et du test de normalité de RYAN-JOINER des résidus issus de chaque modèle.

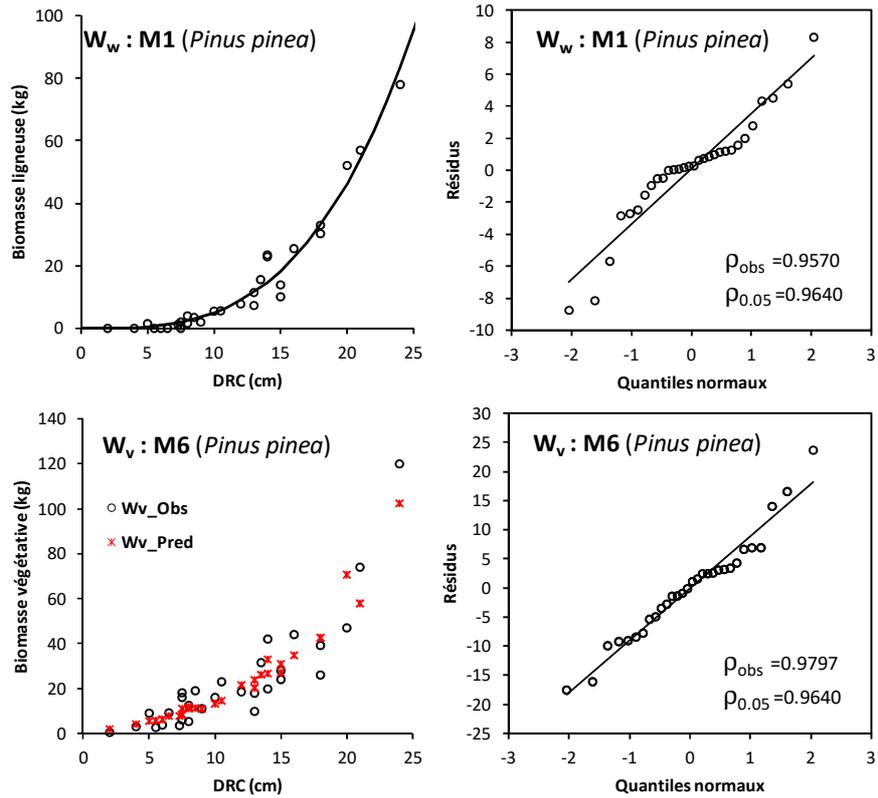


Figure 3. Pin pignon (*Pinus pinea* L.): Données observées vs DRC, courbes ajustées, QQ-probability plots et test de RYAN-JOINER relatifs à la normalité de la distribution des résidus des modèles individuels de biomasses.

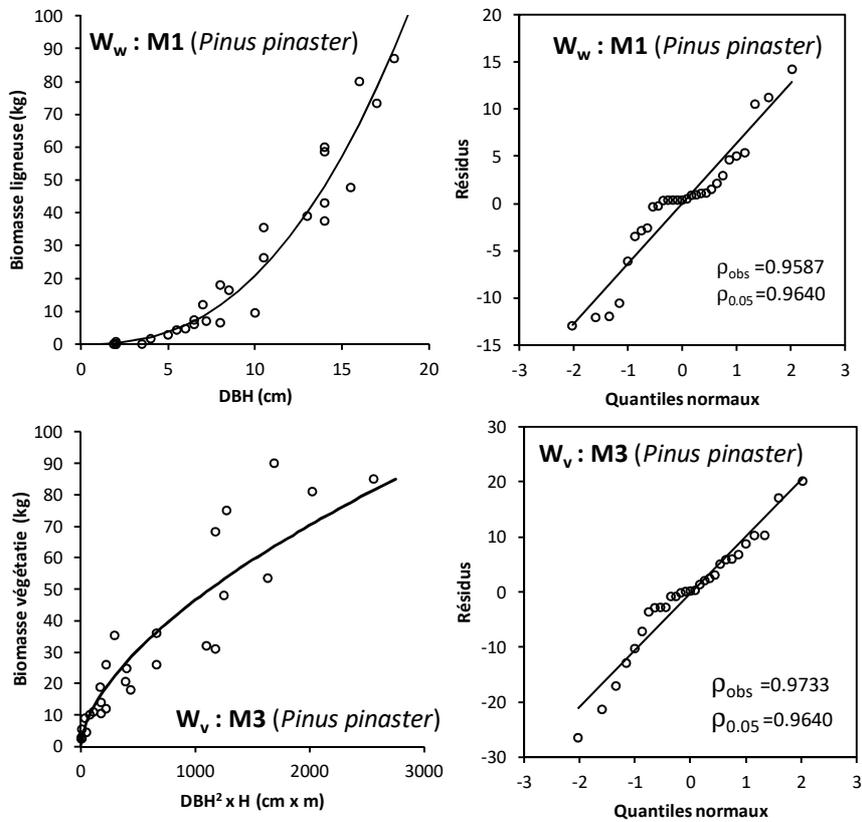


Figure 4. Pin maritime (*Pinus pinaster*) : Données observées vs DBH, courbes ajustées, QQ-probability plots et test de RYAN-JOINER relatifs à la normalité de la distribution des résidus des modèles individuels de biomasses.

Les figures 3 et 4 montrent que la normalité de la distribution des résidus (QQ-probability plots et les valeurs de ρ_{obs} et $\rho_{0,05}$) peut être acceptée pour les deux modèles qui permettent de prédire la biomasse végétative (W_v) des deux espèces (équation 3 pour le Pin maritime et équation 6 pour le Pin pignon). Pour les résidus issus du modèle de prédiction de la biomasse ligneuse des deux espèces (équation 1), les valeurs calculées du coefficient de corrélation relatif au test de RYAN-JOINER (0,9570 et 0,9587 pour le Pin pignon et le Pin maritime, respectivement) sont légèrement inférieures à la valeur théorique critique (0,9640). Toutefois, les faibles écarts entre les deux coefficients de corrélation calculés et celui théorique d'une part et, l'allure linéaire de la relation entre les mêmes résidus et les scores normaux ou quantiles normaux (QQ-probability plots des figures 3 et 4) d'autre part, permettent d'accepter la normalité de la distribution de ces résidus sans grand risque.

Les équations 18 et 19 d'une part et, 20 et 21 d'autre part, présentent les modèles individuels indépendants de prédiction de la biomasse aérienne ligneuse et celle végétative pour le Pin pignon et le Pin maritime, respectivement.

$$Pin\ pignon : \begin{cases} W_w = 3,048 \times 10^{-3} (DRC)^{3,215} & (18) \\ W_v = (DRC)^{(0,927+0,088 \times HC)} & (19) \end{cases}$$

$$Pin\ maritime : \begin{cases} W_w = 6,615 \times 10^{-2} (DBH)^{2,496} & (20) \\ W_v = 0,752 ((DBH)^2 \times H)^{0,597} & (21) \end{cases}$$

Modèles additifs de biomasses aériennes

Pour élaborer des modèles additifs d'estimation de la biomasse aérienne ligneuse et végétative, les paramètres des équations des deux systèmes (équations 22 à 27) ont été estimés à l'aide de la procédure non linéaire pondérée (weighted nonlinear model procedure) de SAS avec les options suivantes : NSUR, N2SLS, N3SLS and GMM. Les contraintes imposées à ces deux systèmes d'équations assurent le fait que la somme des prédictions des biomasses des deux composantes soit égale à la biomasse totale de la partie aérienne de l'arbre. Les équations de ces deux systèmes sont celles sélectionnées précédemment au niveau individuel (équations 1 et 6 pour le Pin pignon et équation 1 et 3 pour le Pin maritime).

$$Pin\ pignon\ (d = DRC) : \begin{cases} W_w = b_1 d^{b_2} & (22) \\ W_v = d^{(b_3+b_4hc)} & (23) \\ W_t = b_1 d^{b_2} + d^{(b_3+b_4hc)} & (24) \end{cases}$$

$$Pin\ maritime\ (d = DBH) : \begin{cases} W_w = b_1 d^{b_2} & (25) \\ W_v = b_3 (d^2 h)^{b_4} & (26) \\ W_t = b_1 d^{b_2} + b_3 (d^2 h)^{b_4} & (27) \end{cases}$$

Les tableaux 5 et 6 présentent pour chacune des deux espèces étudiées les paramètres estimés et la qualité statistique de l'ajustement du système d'équations non-linéaires compatibles et additives de biomasses aériennes d'arbres individuels. La figure 5 présente la projection des résidus en fonction des quantiles normaux (QQ-probability plots) et le test de RYAN-JOINER relatifs à la normalité de la distribution des résidus des modèles compatibles et additifs de biomasse totale aérienne (W_t) des deux espèces étudiées.

Tableau 5. Pin pignon: Paramètres estimés et qualité statistique d'ajustement du système d'équations compatibles et additives de biomasses aériennes d'arbres individuels.

Method	Equ.	Par.	Est.	p-value	Bias	RMSE	RMQE	R ² _{adj}
BRCB	W _w	b ₁	3,048E-3	0,0412	-0,0690	3,5815	0,6205	0,9646
		b ₂	3,2148	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,9266	<0,0001	-0,0127	9,0311	0,4443	
		b ₄	0,0884	<0,0001				
W _t	-	-	-	-0,0819	10,1012	0,3910		
NSUR	W _w	b ₁	3,136E-3	0,0381	-0,0739	3,5735	0,6169	0,9649
		b ₂	3,2049	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,9361	<0,0001	-0,0142	9,0743	0,4403	
		b ₄	8,615E-2	<0,0001				
	W _t	-	-	-	-0,0880	10,1550	0,3884	
N2SLS	W _w	b ₁	3,064E-3	0,0499	-0,0550	3,5789	0,6201	0,9647
		b ₂	3,2126	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,9206	<0,0001	-0,0789	9,0004	0,4465	
		b ₄	9,007E-2	<0,0001				
	W _t	-	-	-	-0,1339	10,0793	0,3920	
N3SLS	W _w	b ₁	2,463E-3	0,0645	0,02229	3,6574	0,6526	0,9635
		b ₂	3,2874	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,9377	<0,0001	-0,1204	9,0622	0,4389	
		b ₄	8,617E-2	<0,0001				
	W _t	-	-	-	-0,0981	10,0406	0,3912	
GMM	W _w	b ₁	2,063E-3	0,0189	0,3182	3,7115	0,9610	0,9623
		b ₂	3,3420	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,8730	<0,0001	0,4652	8,9515	0,4758	
		b ₄	9,924E-2	<0,0001				
	W _t	-	-	-	0,7835	9,9963	0,4185	

Tableau 6. Pin maritime : Paramètres estimés et qualité statistique d'ajustement du système d'équations compatibles et additives de biomasses aériennes d'arbres individuels.

Method	Equ.	Par.	Est.	p-value	Bias	RMSE	RMQE	R ² _{adj}
BRCB	W _w	b ₁	6,615E-2	0,0229	-0,0256	6,5813	0,5122	0,9380
		b ₂	2,4963	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,7517	0,0029	0,3111	10,4700	0,3616	
		b ₄	0,5970	<0,0001				
W _t	-	-	-	0,2855	16,1826	0,3136		
NSUR	W _w	b ₁	8,313E-2	0,0136	0,1127	6,5579	0,4975	0,9388
		b ₂	2,4056	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,9017	0,0009	0,5239	10,7756	0,3267	
		b ₄	0,5686	<0,0001				
	W _t	-	-	-	0,6366	16,5996	0,2887	
N2SLS	W _w	b ₁	4,794E-2	0,0221	-0,1546	6,7918	0,5547	0,9362
		b ₂	2,6225	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,7695	0,0005	0,3298	10,5019	0,3559	
		b ₄	0,5934	<0,0001				
	W _t	-	-	-	0,1751	16,0555	0,3178	
N3SLS	W _w	b ₁	8,194E-2	0,0143	0,1060	6,5560	0,4982	0,9387
		b ₂	2,4113	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,8755	0,0012	0,4726	10,7147	0,3308	
		b ₄	0,5733	<0,0001				
	W _t	-	-	-	0,5787	16,5354	0,2910	
GMM	W _w	b ₁	4,851E-2	0,0032	0,4345	6,6911	0,5575	0,9364
		b ₂	2,6083	<0,0001				
	W _v	b ₃	0,8391	<0,0001	0,0003	105460	0,3347	
		b ₄	0,5821	<0,0001				
	W _t	-	-	-	0,4348	16,1652	0,3030	

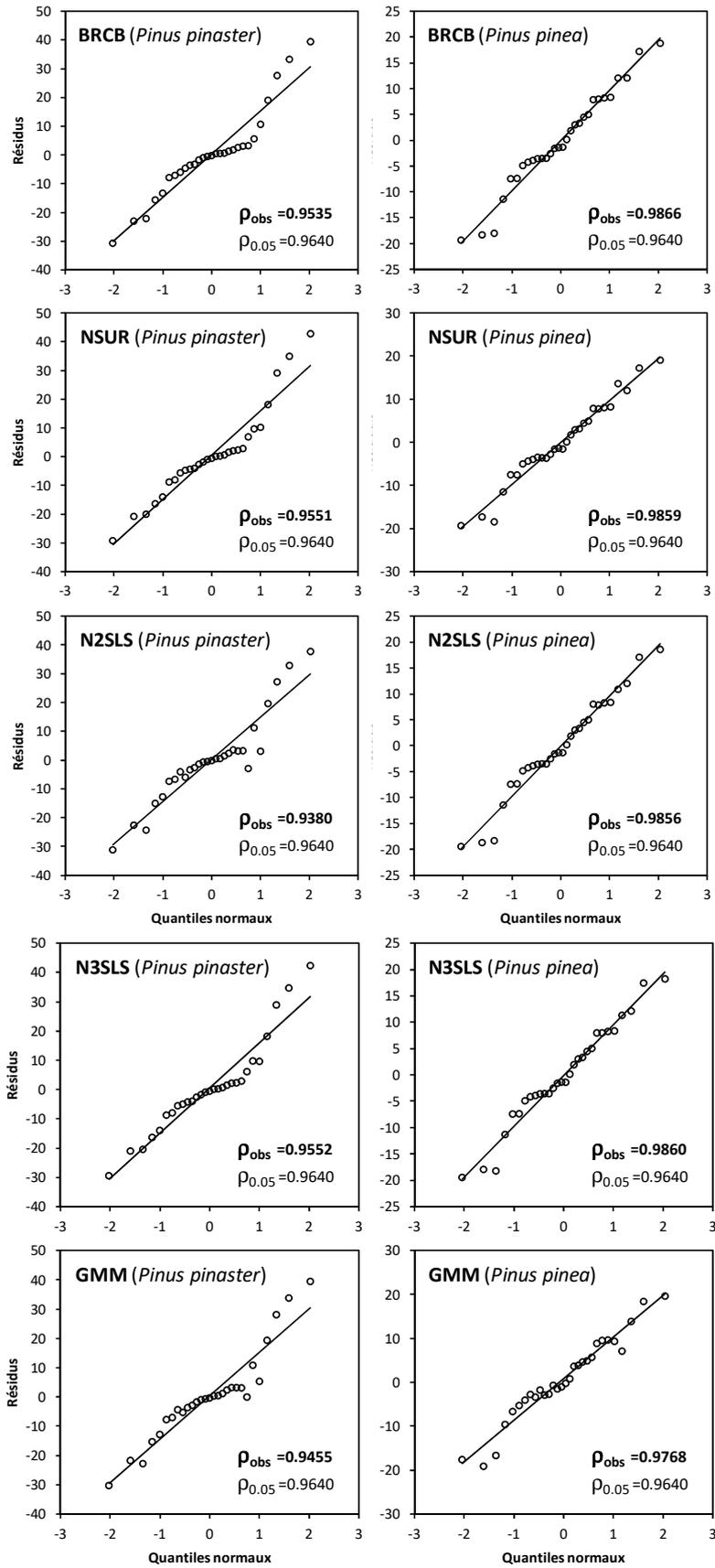


Figure 5. QQ-probability plots et test de RYAN-JOINER relatifs à la normalité de la distribution des résidus des modèles compatibles et additifs de biomasse totale aérienne (W_t) : Pin maritime (à gauche); Pin pignon (à droite).

Les tableaux 5 et 6 montrent que l'estimation de la biomasse totale aérienne pour des jeunes arbres de Pin pignon et de Pin maritime selon la méthode des moindres carrés ordinaires (OLS) et celle des moindres carrés généralisés conjointe (NSUR, N2SLS, N3SLS et GMM) selon un système d'équations simultanées non linéaires assurant l'additivité des deux compartiments de biomasse abouti à des résultats comparables. Les deux modèles élaborés selon les différentes méthodes d'ajustement pour l'estimation de la biomasse totale aérienne expliquent plus de 94% de la variabilité totale de cette biomasse pour le Pin pignon (Tableau 5) et plus de 90% pour le Pin maritime (Tableau 6). La normalité de la distribution des erreurs issues de ces modèles de prédiction de la biomasse aérienne totale (Figure 5) peut être totalement acceptée pour le Pin pignon mais moins pour le Pin maritime. Toutefois, les valeurs les plus élevées du coefficient de corrélation relatif au test de **RYAN-JOINER** obtenues avec les méthodes NSUR (0,9551) et N3SLS (0,9552) pour le Pin maritime et qui sont très proches de la valeur théorique d'une distribution normale (0,9640) indiquent que cette dernière peut être acceptée également pour ces deux méthodes d'ajustement.

En se basant sur les valeurs des différents critères de comparaisons des équations ajustées, en particulier ceux relatifs à la moyenne quadratique des erreurs relatives (MQER) et la normalité de la distribution des résidus issus du modèle additif de la biomasse aérienne totale, la méthode d'ajustement NSUR semble donner les meilleurs résultats pour les deux espèces étudiées. Les deux systèmes d'équations retenus sont donc les suivants :

$$Pin\ pignon : \begin{cases} W_w = 3,136 \times 10^{-3} DRC^{3,2049} & R_{adj}^2 = 0,9649 & (28) \\ W_v = DRC^{(0,9361+8,615 \times 10^{-2} HC)} & R_{adj}^2 = 0,8593 & (29) \\ W_t = W_w + W_v & R_{adj}^2 = 0,9433 & (30) \end{cases}$$

$$Pin\ maritime : \begin{cases} W_w = 8,313 \times 10^{-2} DBH^{2,4056} & R_{adj}^2 = 0,9388 & (31) \\ W_v = 0,9017 (DBH^2 \times H)^{0,5686} & R_{adj}^2 = 0,8449 & (32) \\ W_t = W_w + W_v & R_{adj}^2 = 0,9049 & (33) \end{cases}$$

Ces deux systèmes d'équations permettent de prédire les deux composantes de biomasse aérienne verte (ligneuse/végétative) et la biomasse totale en kg pour des arbres individuels. Les variables exogènes sont le diamètre au collet (DRC) en cm et la hauteur du houppier (HC) en m pour le Pin pignon et le diamètre à 1,30 m de hauteur (DBH) en cm et la hauteur total de l'arbre (H) en m pour le Pin maritime.

Estimation du volume du bois et des biomasses aériennes des placettes

Le volume du bois et les biomasses aériennes (ligneuse/végétative) à l'échelle de la placette ont été calculés en sommant le volume et les biomasses estimés de tous les arbres de la placette (Tableau 2) en utilisant les équations de volume et de biomasses ajustées à l'échelle de l'arbre de chaque espèce. Il s'agit des équations 16 et 17 pour le volume du bois et des équations 28 et 29 d'une part et, 31 et 32 d'autre part pour les biomasses aériennes du Pin pignon et du Pin maritime respectivement.

Diagramme de gestion de densité des peuplements (DGDP) en mélange de Pin pignon et de Pin maritime en Tunisie

Le tableau 7 présente les résultats de l'ajustement, à partir des données des placettes, du système d'équations simultanées (équations 12 à 15) nécessaires pour la construction du diagramme de gestion de densité de peuplement (DGDP) de la forêt étudiée.

Tableau 7. Paramètres estimés et qualité statistique d'ajustement du système d'équations simultanées nécessaires pour la construction du diagramme de gestion de densité de peuplements (DGDP) de la forêt étudiée.

Variable	Eq.	Par.	Est.	SE	$p>t$	RMSE	R_{adj}^2
dg	12	a_1	3,6574	1,7673	0,0467	1,3167	0,7920
		a_2	0,9038	0,1033	<0,0001		
		a_3	-4,953E-2	0,0619	0,4293		
V	13	b_1	2,23E-4	9,5E-5	0,0299	2,0022	0,9711
		b_2	1,6081	0,1497	<0,0001		
		b_3	0,9481	0,1257	<0,0001		
		b_4	0,9580	0,0524	<0,0001		
Ww	14	c_1	8,1E-4	3,33E-4	0,0208	1,6154	0,9682
		c_2	1,2170	0,1433	<0,0001		
		c_3	1,0829	0,1283	<0,0001		
		c_4	0,8446	0,0490	<0,0001		
Wv	15	d_1	3,714E-3	1,7E-3	0,0369	2,6805	0,9384
		d_2	0,5296	0,1227	0,0002		
		d_3	1,0597	0,1213	<0,0001		
		d_4	0,9079	0,0576	<0,0001		

Eq. : Équation, Par.: Paramètre (coefficient de régression), Est.: Valeur estimée, SE : Erreur-standard.

A partir des valeurs des paramètres des équations 12 à 15 relatives aux variables dg (diamètre quadratique), V (volume du bois fort), Ww (biomasse aérienne ligneuse) et Wv (biomasse aériennes végétative), estimées à l'échelle du peuplement (Tableau 7), des isolignes (Tableau 1) mettant en relation la densité (N) avec les mêmes variables et la hauteur moyenne des arbres (Hm) du peuplement ont été élaborés. Ces isolignes ont servi à la construction du DGDP de la forêt étudiée (Figures 6 et 7). La figure 6 présente, en fonction de N et Hm, d'une part l'évolution des variables SDI, dg et V (Figure 6a) et, d'autre part celle des variables SDI, dg, Ww et Wv (Figure 6b). La figure 7 présente, toujours en fonction de N et Hm, l'évolution d'une part de dg et des 4 courbes des niveaux de stocks (Figure 7a) et, d'autre part celle de SDI, Ww, Wv et du rapport $K=Wv/Ww$ (Figure 7b).

DISCUSSION

Modèles additifs de biomasses aériennes :

Deux approches de construction de modèles de biomasses aériennes ont été comparées pour chacune des deux espèces étudiées : (1) la fonction de biomasse aérienne totale est considérée comme la somme des deux fonctions correspondantes aux deux composantes de biomasse ajustées séparément par la méthode des moindres carrés ordinaires (OLS : Ordinary Least Squares), désignée par BRCB (Best Regression functions of Component Biomasses) ; (2) Les deux fonctions relatives aux deux composantes de biomasse et celle relative la biomasse aérienne totale (la somme des deux fonctions individuelles) ont été ajustés simultanément, pour chacune des deux espèces étudiées, à l'aide d'un système d'équations non linéaires par la méthode des moindres carrés généralisés conjointe (joint-generalized least squares regression). Pour garantir la propriété d'additivité des prédictions des deux composantes de biomasses et celle de la biomasse totale de chaque arbre en tenant compte des dépendances entre les termes d'erreurs des composantes de biomasses considérées (ZHENG *et al.*, 2015), les systèmes d'équations ont été résolus par la méthode de régressions non-linéaires sans corrélation apparente (NSUR : Nonlinear Seemingly Unrelated Regression equations), la méthode des moindres carrés non-linéaires en deux étapes (N2SLS : Nonlinear two-Stage Least-Squares method), la méthode des moindres carrés non-linéaires en trois étapes (N3SLS : Nonlinear three-Stage Least-Squares method) et la méthode des moments généralisés (GMM : Generalized Method of Moments). Les résultats obtenus ont montré, qu'en général, les deux approches (1) et (2) de construction des modèles d'estimation de la biomasse aérienne sont très proches de point de vue précision. Toutefois, en se basant sur les valeurs de la moyenne quadratique des erreurs relatives (MQER) et la normalité de la distribution des résidus issus du modèle additif de la biomasse aérienne totale, la méthode d'ajustement NSUR selon l'approche (2) semble donner les meilleurs résultats pour les deux espèces étudiées. Dans le cadre d'une étude similaire sur le Pin de Floride (*Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii*), Parresol (2001) a

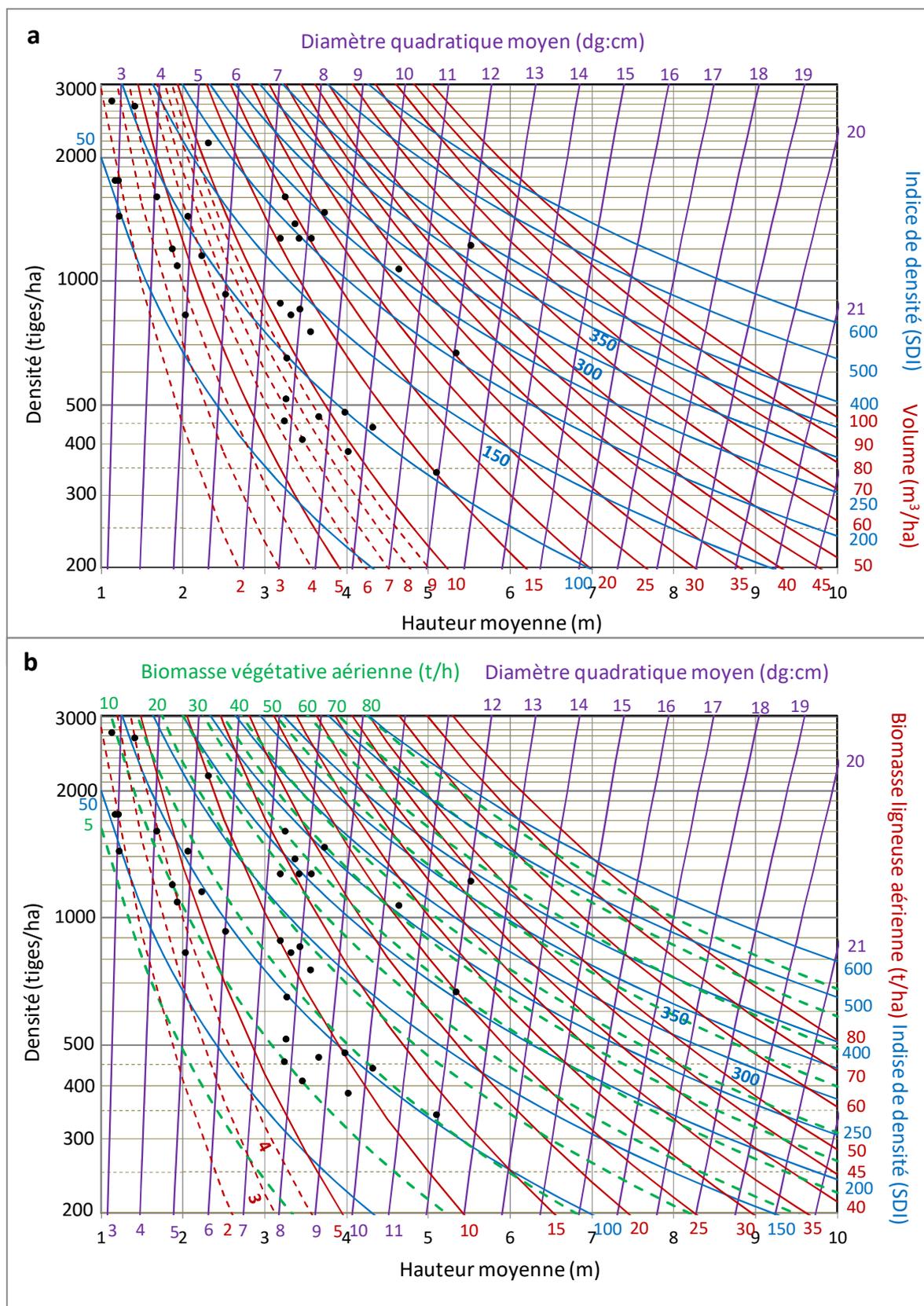


Figure 6. Diagramme de Gestion de Densité de Peuplement (DGDP) en mélange de Pin pignon (*Pinus pinea* L.) et de Pin maritime (*Pinus pinaster*) avec les données observées des placettes échantillonnées : (a) diamètre quadratique moyen, indice de densité du peuplement et volume total du bois fort ; (b) diamètre quadratique moyen, indice de densité du peuplement, biomasse aérienne végétative et biomasse aérienne ligneuse.

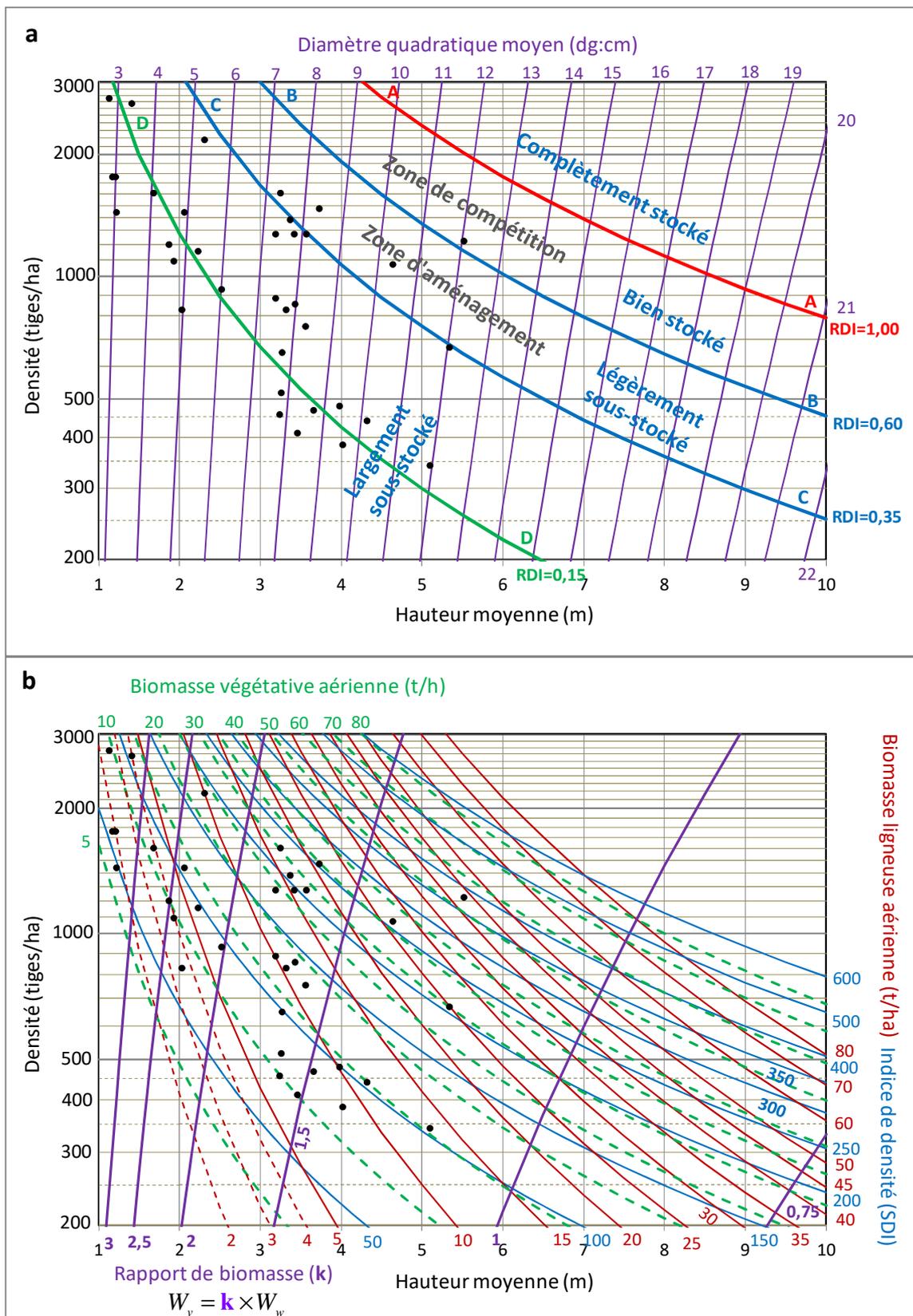


Figure 7. Diagramme de Gestion de Densité de Peuplement (DGDP) en mélange de Pin pignon (*Pinus pinea* L.) et de Pin maritime (*Pinus pinaster*) avec les données observées des placettes échantillonnées : (a) diamètre quadratique moyen et courbes des niveaux de stocks ; (b) indice de densité du peuplement, biomasse aérienne végétative, biomasse aérienne ligneuse et rapport de biomasses $K=W_v/W_w$.

recommandé l'approche (2) avec l'utilisation de la méthode NSUR. Selon ZHENG *et al.* (2014), d'autres études sur l'additivité des modèles de biomasses ont montré la flexibilité de l'utilisation simultanée d'un système d'équations pour l'estimation des paramètres selon les méthodes SUR, 2SLS, 3SLS et GMM et ceci par comparaison à la méthode OLS (CARVALHO et PARRESOL, 2003; BALBOA-MURIAS *et al.*, 2006; BRANDEIS *et al.*, 2006; ANTONIO *et al.*, 2007; BI *et al.*, 2010; RUIZ-PEINADO *et al.*, 2011 ; LI et ZHAO, 2013; MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ *et al.*, 2013; GOMEZ-GARCIA *et al.*, 2014;).

Diagramme de gestion de densité de peuplement :

Les DGDP et les options d'aménagement ont été développés dans différentes études telles que PÉREZ-CRUZADO *et al.* (2011) pour *Eucalyptus globulus* Labill. et *Eucalyptus nitens* H. ; CASTAÑO-SANTAMARÍA *et al.* (2013) pour *Quercus pyrenaica* Willd. et MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ *et al.* (2016) pour *Castanea sativa* au Nord-Ouest de l'Espagne. En complément aux modèles d'estimation de la biomasse aérienne des deux espèces étudiées, cette étude présente dans les figures 6 et 7 un diagramme de gestion de densité de peuplement (DGDP) élaboré pour gérer les peuplements mixtes de Pin pignon et de Pin maritime à dominance Pin pignon de la forêt de Zouarâa dans la région de Nefza au Nord-Ouest de la Tunisie. Le développement de ce diagramme qui caractérise le stock sur pied d'un peuplement en mettant en relation la hauteur moyenne des arbres du peuplement en fonction de la densité a été basé sur l'utilisation de l'indice de densité (SDI) de REINEKE (1933). Cet indice qui est directement proportionnel à l'utilisation du site et l'occupation de l'espace de croissance (DANIEL *et al.*, 1979), exprime le nombre d'arbres par hectare (N) en fonction du diamètre quadratique moyen (dg). Le recours à l'indice SDI pour le développement des DGDP a été dicté par le caractère inéquienne des peuplements étudiés (STAGE, 1968 ; LONG et DANIEL, 1990 ; COCHRAN, 1992; O'HARA et VALAPPIL, 1995 ; LONG 1995, 1996). Grâce à ce diagramme de gestion de densité des peuplements, les gestionnaires forestiers peuvent tirer le maximum de profit en obtenant les informations nécessaires (eg. niveaux de densité, volumes et biomasses sur pied, dimension des tiges, etc.), pour connaître la situation d'occupation du peuplement, de décider si une éclaircie est nécessaire et de déterminer la bonne intensité d'éclaircie à appliquer.

En plus des informations généralement présentées dans les DGDP relatives aux relations entre les différentes caractéristiques d'un peuplement forestier (figure 6), la figure 7 présente d'une part les 4 isolignes qui délimitent les différentes zones de croissance et/ou de stock et qui servent comme guide de densité pour la gestion optimale de ces peuplements (Figure 7a), et d'autre part les isolignes pour certaines valeurs du rapport K (biomasse aérienne végétative par rapport à la biomasse aérienne ligneuse) en fonction des caractéristiques dendrométriques du peuplement (Figure 7b). Selon l'objectif de l'aménagement d'un peuplement, ces derniers isolignes permettent de déterminer la composition de la biomasse aérienne totale (proportion de biomasse végétative et celle ligneuse) à un moment donné de la vie de ce peuplement. Ainsi, pour la production du compost ou de biocarburant par exemple, cas des reboisements à courtes rotations, les valeurs de K doivent être élevées (dépassent l'unité), tandis que pour la production du bois, les valeurs de K doivent être faibles (inférieures à l'unité).

CONCLUSION

Les résultats obtenus et les modèles développés dans le cadre de cette étude améliorent nos connaissances sur la croissance et la production d'un peuplement en mélange de deux résineux (Pin pignon et de Pin maritime avec la dominance du Pin pignon) en Tunisie et constituent, de nos jours, des outils indispensables pour la gestion et la conservation de ces peuplements.

- Les modèles développés à l'échelle de l'arbre des deux espèces étudiées sont des modèles dynamiques qui permettent de prédire les valeurs des variables qui nécessitent souvent des mesures destructives et très coûteuses, comme le volume du bois et les biomasses aériennes en utilisant des covariables exploratoires typiques obtenues habituellement dans les inventaires forestiers. Ainsi, les modèles additifs de prédiction des biomasses aériennes élaborés utilisent comme prédicteurs (variables exogènes) le diamètre de la souche ou du collet (DRC) et la hauteur du houppier ou de la couronne (HC) pour le Pin pignon et, le diamètre à hauteur d'homme (DBH) et la hauteur totale (H) pour le Pin maritime. Les précisions fournies par ces modèles (R_{aj}^2) sont, respectivement pour le Pin pignon et le Pin maritime, de l'ordre 96% et 94% pour la biomasse ligneuse et 86% et 85% pour la biomasse végétative.

- Les DGDP construits pour ce peuplement en mélange de Pin pignon et de Pin maritime nécessitent comme input la densité et la hauteur moyenne du peuplement en question et donnent comme output le diamètre quadratique moyen, l'indice de densité du peuplement, le volume total du bois fort et les deux biomasses aériennes végétative et ligneuse. Les mêmes diagrammes donnent également pour les mêmes inputs les courbes

(isolignes) relatives aux différents niveaux de stocks et celles relatives aux différentes valeurs du rapport « biomasse végétative/biomasse ligneuse ».

Les champs d'application des modèles et diagrammes élaborés dans le cadre de cette étude sont nombreuses et dépendent des objectifs fixés par le gestionnaire forestier. Ils peuvent aller des estimations simples pour des arbres individuels (cas des éclaircies) jusqu'à l'estimation des caractéristiques dendrométriques moyennes et des niveaux des stocks d'un peuplement, de déterminer les moments opportuns des interventions sylvicoles et de fixer leur intensité. D'autres utilisations des modèles et diagrammes développés sont possibles, telle que la quantification des stocks de biomasse et de carbone contenus dans les forêts méditerranéennes, devenue de nos jours une priorité internationale en marge des changements climatiques.

REFERENCES

- ALLARD D., BÉDARD A., BLOUIN D., LESSARD G., RYABEL T. & PATRY A., 2000. L'application de différents traitements d'éclaircie commerciale dans les peuplements mixtes à dominance de bouleau à papier : Programme de mise en valeur des ressources du milieu forestier. Centre d'enseignement et de recherche en foresterie de Sainte-Foy inc. Rapport final-Volet 1, 76 p. (Réf. 3380-al-19/05/2008).
- ANTONIO N., TOME M., TOME J., SOARES P. & FONTES L., 2007. Effect of tree, stand, and site variables on the allometry of Eucalyptus globulus tree biomass. *Can. J. For. Res.* 37 : 895-906.
- BALBOA-MURIAS M.A., RODRIGUEZ-SOALLEIRO R., MERINO A. & ALVAREZ-GONZALEZ J.G., 2006. Temporal variations and distribution of carbon stocks in aboveground biomass of radiata pine and maritime pine pure stands under different silvicultural alternatives. *Forest Ecol. Manag.* 237 : 29-38.
- BI H., LONG Y., TURNER J., LEI Y., SNOWDON P., LI Y., HARPER R., ZERIHUN A. & XIMENES F., 2010. Additive prediction of aboveground biomass for Pinus radiata (D. Don) plantations. *Forest Ecol. Manag.* 259 : 2301-2314.
- BISCH, J. L., 1986. Le taux de conversion de volume de bois frais en biomasse : amélioration de ses méthodes d'estimation. *Ann. Sci. for.* 43, (3) : 383-396.
- BRANDEIS T.J., DELANEY M., PARRESOL B.R. & ROYER L., 2006. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. *Forest Ecol. Manag.* 233 : 133-142.
- BROWN S., GILLESPIE A.J.R. & LUGO A.E., 1989. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Sci.* 35, (4) : 881-902.
- CABANETTES A. & RAPP M., 1978. Biomasse, minéralomasse et productivité d'un écosystème à Pins pignons (*Pinus pinea* L.) du littoral méditerranéen. I. Biomasse." *Acta Oecol Plant* 13, (3): 271-286.
- CARVALHO J.P. & PARRESOL B.R., 2003. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Forest Ecol. Manag.* 179 : 269-276.
- CASTAÑO-SANTAMARÍA J., BARRIO-ANTA M. & ÁLVAREZ-ÁLVAREZ P., 2013. Regional-scale stand density management diagrams for Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) stands in northwest Spain. *Forest* 6: 113-122.
- CHAVE J., ANDALO C., BROWN S., CAIRNS M.A., CHAMBERS J.Q., EAMUS D., FOLSTER H., FROMARD F., HIGUCHI N. & KIRA T., 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia* 145 : 87-99.
- COCHRAN P.H., 1992. Stocking levels and underlying assumptions for uneven-aged ponderosa pine stands. Research Note PNW-RN-509. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 10 p.
- COCHRAN P.H., GEIST J.M., CLEMENS D.L., CLAUSNITZER R.R. & POWELL D.C., 1994. Suggested stocking levels for forest stands in northeastern Oregon and southeastern Washington. Research Note PNW-RN-513. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 21 p.
- CORREIA A.C., TOMÉ M., PACHECO C.A., FAIAS S., DIAS A.C., FREIRE J., CARVALHO P.O. & PEREIRA J.S., 2010. Biomass allometry and carbon factor s for a Mediterranean pine (*Pinus pinea* L.) in Portugal. *Forest Systems* 19 : 3 : 418-433.
- DANIEL T.W., HELMS J.A. & BAKER F.S., 1979. Principles of silviculture. Second edition. New York: McGraw-Hill Book Company. 500 p.
- de SMITH M.J., 2015. Statistical analysis handbook: A comprehensive handbook of statistical concepts, techniques and software tools. www.Statsref.com/HTML/index.html?ryan-joiner.html.
- DEAN T.J. & BALDWIN V.C.J.R., 1993. Using a Density Management Diagram to Develop Thinning Schedules for Loblolly Pine Plantations. Research Paper SO-275. USDA, Forest Service, Southern Forest Experiment Station.
- D.G.F., 1995. Direction Générale des Forêts. Résultats du premier inventaire forestier national en Tunisie. Ministère de l'Agriculture, Tunis, 87 p.
- GOMEZ-GARCIA E., CRECENTE-CAMPO F., TOBIN B., HAWKINS M., NIEUWENHUIS M. & DIEGUEZ-ARANDA U., 2014. A dynamic volume and biomass growth model system for even-aged downy birch stands in south-western Europe. *Forestry* 87 : 165-176.

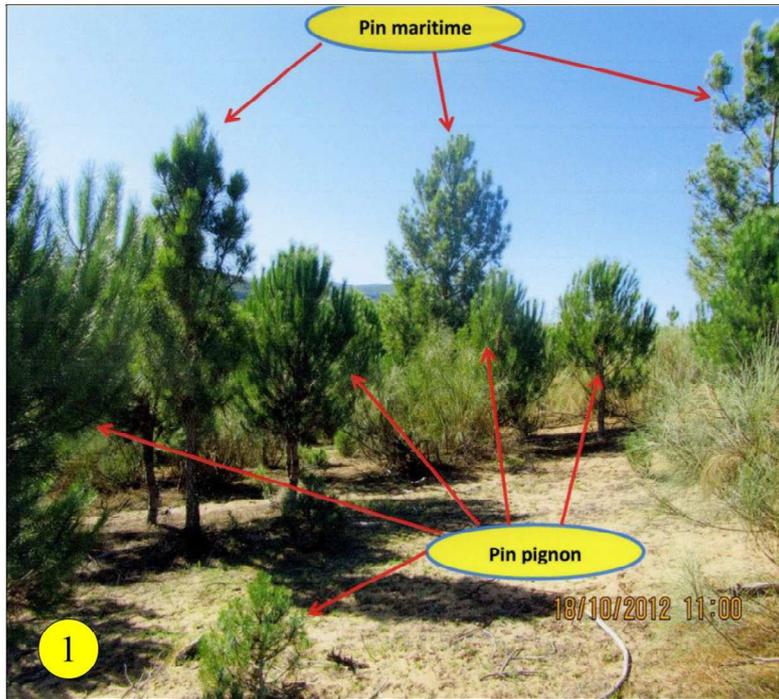
- GOODMAN R. C., PHILLIPS O.L. & BAKER T.R., 2014. The importance of crown dimensions to improve tropical tree biomass estimates. *Ecol. Appl.*, 24 : 680–698.
- GOUBI M., BENTOUATI A., KHERCHOUCHE D. & SGHAIER T., 2019. Tarifs et tables de cubage d'arbres individuels du Pin d'Alep, *Pinus halepensis* Mill., dans l'Aurès algérien. *Bois et Forêts des Tropiques*, 339 : 45-59. Doi : <https://doi.org/10.19182/bft2019.339.a31715>
- GRENIER Y., 2000. Diagramme de gestion de la densité du Pin gris de l'Abitibi (Québec). Éclaircie commerciale dans les peuplements de Pin gris : Dendrométrie, diversité et écophysologie. Québec, Ministère des ressources naturelles, 21 p.
- HASNAOUI F., 2000. Sciage et séchage du Pin pignon, propriétés physiques et mécaniques. Mémoire de PFE, INAT, 73 p. + annexes.
- IFN, 2005. Deuxième inventaire forestier et pastoral national. Résultats de l'inventaire forestier sur l'échelon de Jendouba. (Gouvernorats de Jendouba, Béjà et Bizerte), 45 p.
- JAGODZINSKI A.M. & KAŁUCKA I., 2008. Age-related changes in leaf area index of young Scots pine stands. *Dendrobiology* 59 : 57–65.
- KHALDI A., 2009. Etude de la croissance et des productions du Pin pignon (*Pinus pinea* L.) en relation avec les facteurs écologiques, sylvicoles et génétiques en Tunisie. Thèse de doctorat de l'Institut National agronomique de Tunisie, p 171 + annexes, Tunis
- KHOUBA M.L., 2003 : Etude de la diversité et de la variabilité génétique de 7 espèces forestières de première importance (Pin d'Alep, Pin brutia, Pin pignon, Pin noir, Chêne liège et Cyprès toujours vert). Projet fédérateur : Ecologie, sélections d'espèces et reboisement. Rapport final, 1999-2003, 96 p.
- KINK D.A., 1996. Allometry and life history of tropical trees. *J. Trop. Ecol.* 12, (1) :25-44.
- LI H. & ZHAO P., 2013. Improving the accuracy of tree-level aboveground biomass equations with height classification at a large regional scale. *Forest Ecol. Manag.* 289 : 153-163.
- LONG J.N., 1995. Using stand density index to regulate stocking in uneven-aged stands. In: O'HARA & KEVIN L., editor. Uneven-aged management: opportunities, constraints and methodologies. Workshop proceedings; 1995 April 29; Missoula, MT. MFCES Miscellaneous Publication No. 56. Missoula, MT: *The University of Montana, School of Forestry*: 110-122.
- LONG J.N., 1996. A technique for the control of stocking in two-storied stands. *Western Journal of Applied Forestry.* 11, (2) : 59-61.
- LONG J.N. & DANIEL T.W., 1990. Assessment of growing stock in uneven-aged stands. *Western Journal of Applied Forestry.* 5, (3) : 93-96.
- LOONEY S.W. & GULLEDGE T.R., 1985. Use of the Correlation Coefficient with Normal Probability Plots. *The American Statistician*, 39, 1 : 76-79.
- MALIRO T.K., LOKOMBE DIMANDJA J.P. & PICARD N., 2010. Volume equations and biomass estimates for three species in tropical moist forest in the Orientale province, Democratic Republic of Congo. *South. For.*, 72, (3/4) : 141-146.
- MARIETTEA S., CHAGNÉA D., DECROOQA S., VENDRAMINB G., LALANNEA C., MADURA D. & PLOMION C., 2001. Microsatellite markers for *Pinus pinaster* Ait. *Ann. For. Sci.*, 58 : 203-206.
- MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ M., ÁLVAREZ-ÁLVAREZ P., MAJADA J. & CANGA E., 2016. Management tools for *Castanea sativa* coppice stands in northwestern Spain. *BOSQUE* 37, (1) : 119-133. (DOI: 10.4067/S0717-92002016000100012).
- Mc ARDLE R.E., MEYER W.H. & BRUCE D., 1961. The yield of Douglas-fir in the Pacific Northwest. Technical Bulletin No. 201 (Revised). Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 74 p.
- MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ M., CANGA E., BARRIO-ANTA M., MAJADA J. & ALVAREZ-ALVAREZ P., 2013. A three level system for estimating the biomass of *Castanea sativa* Mill. coppice stands in north-west Spain. *Forest Ecol. Manag.* 291 : 417-426.
- NEWTON P.F., 1997. Stand density management diagrams: Review of their development and utility in stand-level management planning. *Forest Ecology and Management* 98 : 251-265.
- O'HARA K.L. & VALAPPIL N.I., 1995. Age class division of growing space to regulate stocking in uneven-aged stands. In: O'Hara, Kevin L., editor. Uneven-aged management: opportunities, constraints and methodologies. Workshop proceedings; 1995 April 29; Missoula, MT. MFCES Miscellaneous Publication No. 56. Missoula, MT: *The University of Montana, School of Forestry*: 123-143.
- PARRESOL B.R., 1999. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Sci.* 45 : 573–593.
- PARRESOL B.R., 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Can. J. For. Res.* 31: 865-878
- PICARD N., SAINT-ANDRÉ L. & HENRY M., 2012. Manuel de Construction d'Equations Allométriques pour l'Estimation du Volume et la Biomasse des Arbres: de la Mesure de Terrain à la Prédiction. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, et Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement : Rome, Montpellier ; 220.

- PENNER M., SWIFT D.E., GAGNON R. & BRISSETTE J., 2006. A stand density management diagram for balsam fir in New Brunswick.— *The forestry chronicle* , 82, 5 : 700-711.
- PÉREZ-CRUZADO P., FEHRMANN L., MAGDON P., CAÑELLAS I., SIXTO H. & KLEINN C., 2015. On the site-level suitability of biomass models. *Environmental Modelling & Software*, 73: 14-26.
- PÉREZ-CRUZADO C., MERINO A. & RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R., 2011. A management tool for estimating bioenergy production and carbon sequestration in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens* grown as short rotation woody crops in north-west Spain. *Biomass and Bioenergy* 35: 2839-2851.
- PLOTON P., BARBIER N., TAKOUDJOU M.S., RÉJOU-MÉCHAIN M., BOYEMBA B.F., CHUYONG G., DAUBY G., DROISSART V., FAYOLLE A., GOODMAN R.C., HENRY M., KAMDEM N.G., MUKIRANIA J.K., KENFACK D., LIBALAH M., NGOMANDA A., ROSSI V., SONKÉ B., TEXIER N., THOMAS D., ZEBAZE D., COUTERON P., BERGER U. & PÉLISSIER R., 2016. Closing a gap in tropical forest biomass estimation: taking crown mass variation into account in pantropical allometries. *Biogeosciences* 13 : 1571–1585. doi:10.5194/bg-13-1571-2016.
- QUINT T.C. & DECH J.P., 2010. Allometric models for predicting the aboveground biomass of Canada yew (*Taxus canadensis* Marsh.) from visual and digital cover estimates. *Can. J. For. Res.* 40: 2003–2014.
- RONDEUX, J., 1993. La mesure des arbres et des peuplements forestiers. Les presses agronomiques de Gembloux, 521 p.
- RUIZ-PEINADO R., DEL RIO M. & MONTERO G., 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of Spanish softwood species. *Forest Systems* 20 : 176–188
- RYAN T.A. & JOINER B.L., 1976. Normal probability plots and tests for normality. Pennsylvania State University. 12 p.
- SALIS S.M., ASSIS M.A., MATTOS P.P. & PIAO A.C.S., 2006. Estimating the aboveground biomass and wood volume of savanna woodlands in Brazil's Pantanal wetlands based on allometric correlations. *Forest Ecology and Management* 228 : 61–68.
- SAMPAIO E., GASSON P., BARACAT A., CUTLER D., PAREYN F. & COSTA L.K., 2010. Tree biomass estimation in regenerating areas of tropical dry vegetation in northeast Brazil. *Forest Ecology and Management* 259 : 1135–1140.
- SGAHER T., GARCHI S. & KHOUAJA A., 2006. Etude de la croissance des reboisements de Pin pignon (*Pinus pinea*) en Kroumirie tunisienne. *Geo-Eco-Trop*, 30, (1) : 1-10.
- SGAHER 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.
- SHAIEKK O., LOUSTAU D., GARCHI S., BACHTOBI 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 t. XXXI*, 3 : 231-242.
- SHAIEK O., LOUSTAU D., TRICHET P., MEREDIEU C., BACHTOBI B., GARCHI S. & EL AOUNI M.H., 2011. Generalized biomass equations for the main aboveground biomass components of maritime pine across contrasting environments. *Annals of Forest Science*, 68: 443–452 DOI 10.1007/s13595-011-0044-8
- STAGE A.R., 1968. A tree-by-tree measure of site utilization for grand fir related to stand density index. Research Note INT-77. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 7 p.
- TOMÉ M., PATRÍCIO M.S. & MONTEIRO M.L., 2005. Biomass Equations for *Castanea sativa* High Forest in the Northwest of Portugal. Proc. IIIrd Intl. Chestnut Congress Eds.: C.G. Abreu, E. Rosa & A.A. Monteiro Acta Hort. 693, ISHS 2005.
- VALBUENA P., DEL PESO C. & BRAVO F., 2008. Stand Density Management Diagrams for two Mediterranean pine species in Eastern Spain. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 17 (2) : 97-104.
- VERONICA G., LUIS P.P. & GERARDO R., 2010. Allometric relations for biomass partitioning of *Nothofagus antarctica* trees of different crown classes over a site quality gradient. *Forest Ecology and Management* 259: 1118–1126.
- 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.
- ZIANIS D., XANTHOPOULOS G., KALABOKIDIS K., KAZAKIS G., GHOSN D. & ROUSSOU O., 2011. Allometric equations for aboveground biomass estimation by size class for *Pinus brutia* Ten. trees growing in North and South Aegean Islands, Greece. *European Journal of Forest Research* 130 : 145–160.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement les techniciens de l'Institut National de Recherche en Génie rural, Eaux et Forêts (INRGREF) qui ont assuré les différents travaux de terrain (collecte de données, mesures, pesées et cubage des arbres coupés...). Il s'agit particulièrement de Messieurs Hatem TRABELSI, Abdessattar SALAH, Ridha KRIFI et Kanâan DAASSI.

Photos



Photos 1 & 2 : peuplements mélangés



Photo 3 : peuplement à dominance de Pin maritime

Photo 4 : peuplement à dominance de Pin pignon

• Diamètre à la **base**



• Diamètre à **1,30 m**



• Hauteur jusqu'à la **première branche**



• **d₁** et **d₂** du **houppier**



Photos 5a - 5d : différentes mesures des plants



Photo 6 : mesure de la hauteur totale des plants



Photo 7 : pesée de la biomasse aérienne végétative

Photo 8 : rondelles issues des analyses de tiges

Photo 9 : pesée de la biomasse aérienne ligneuse

