

DENDROÉCOLOGIE DU PIN D'ALEP (*Pinus halepensis* Mill.) EN FONCTION DES PARAMÈTRES STATIONNELS DANS LE MASSIF FORESTIER DE SENALBA (DJELFA, ALGÉRIE)

Brahim GUIT¹, Bouzid NEDJIMI^{1*}, Frédéric GUIBAL² & Gahdab CHAKALI³

¹ Laboratoire d'Exploration et de Valorisation des Écosystèmes Steppiques, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université de Djelfa, Cité Aïn Chih, B.P. 3117. Djelfa 17000. Algérie

² Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Écologie marine et continentale, Europôle Méditerranéen de l'Arbois. F-13545 Aix-en-Provence cedex 4

³ Département d'Entomologie Forestière, École Nationale Supérieure Agronomique, El-Harrach. Alger, 16200. Algérie

* Auteur correspondant : Tel.: + 213 662 128 131. Fax: + 213 27 900 201. E-mail: bnedjimi@yahoo.fr

SUMMARY.— *Relation between site parameters and Aleppo Pine (Pinus halepensis Mill.) dendroecology in Senalba forest area (Djelfa, Algeria).*— Aleppo Pine (*Pinus halepensis* Mill.) is a volunteering hardy species, very common in Mediterranean regions. This species has great economical, ecological and social values in Algeria. 120 sample plots were laid out on northern and southern slopes of Senalba forest area (Djelfa) located in a semi-arid region, to investigate the effect of altitude, aspect and soil depth on height, circumference at 1.30 m and annual ring growth. The results shown that aspect and altitude were the determining factors of Aleppo Pine growth. Three classes of fertility were distinguished in relation with dominant tree height and age.

RÉSUMÉ. — À partir de transects intégrant les variations d'altitude et d'exposition, 120 placettes de Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) de 800 m² chacune ont été installées au niveau de quatre stations choisies dans le massif forestier de Senalba (Djelfa, Algérie) situé en région semi-aride. Chaque placette a fait l'objet des mesures dendrométriques suivantes : circonférence à 1.30 m, hauteur totale, hauteur dominante, surface terrière, densité, âge et accroissement moyen du cerne auxquelles ont été associées des caractéristiques stationnelles : altitude, exposition et profondeur du sol. L'analyse des données a mis en évidence que l'exposition et l'altitude sont les facteurs déterminants pour la croissance du pin. Trois classes de fertilité ont pu être distinguées à partir du couple « âge / hauteur dominante ».

Le massif forestier de Senalba constitue l'une des plus importantes forêts naturelles de Pin d'Alep des zones arides et désertiques de l'Atlas saharien algérien. Face à la désertification qui menace les terres du nord de l'Algérie, ce massif forestier représente la dernière barrière naturelle contre l'avancée du désert. Le Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) est l'une des essences les plus répandues dans la région méditerranéenne, couvrant plus de 25 000 km² des formations forestières dans les régions semi-arides et subhumides sèches (Quézel, 2000). Il est dominant par ses peuplements répartis sous forme de grands massifs sur l'ensemble de l'Algérie du Nord et peuple même les zones les plus hostiles de la steppe aux marges du Sahara. Le Pin d'Alep couvre 35 % des surfaces boisées de l'Algérie du Nord, soit environ 800.000 ha (Bentouati *et al.*, 2005). Il est localisé en grande partie à l'état naturel dans les régions de l'est et du centre du pays, principalement sur les Atlas tellien et saharien. Les principales forêts sont réparties sur les crêtes de l'Atlas saharien entre 1000 et 1500 m d'altitude (Kadik, 1986). Les pinèdes forment des forêts importantes dont les valeurs écologiques sont variables (Quézel, 2002).

Le présent travail porte sur l'étude dendroécologique du Pin d'Alep en fonction des paramètres stationnels (altitude, exposition et profondeur du sol), dans les massifs forestiers de Senalba Gharbi (Terme arabe signifiant situé à l'ouest) et Senalba Chergui (à l'est) situés tous les deux en zone semi-aride en steppe algérienne.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

SITE D'ÉTUDE

La région de Senalba est en grande partie une zone forestière bien que les bas versants soient utilisés pour l'agriculture et le pastoralisme. La forêt domaniale de Senalba est située sur les collines des hauts plateaux de l'Atlas saharien, 4 Km à l'ouest du chef-lieu de la commune de Djelfa, dont les coordonnées sont 2° à 3° 5' de longitude Est et 34° 34' à 34° 45' de latitude Nord (Fig. 1). Occupant une superficie de 62 170 ha, elle est constituée principalement de Pin d'Alep à l'état naturel. Les pentes, de l'ordre de 40 % au niveau des sommets sont plus douces (5 à 20 %) sur le bas des versants.

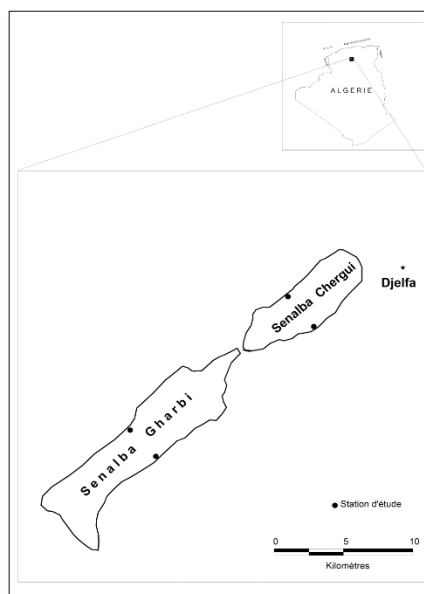


Figure 1. — Carte de localisation de la zone d'étude.

La zone d'étude est située dans l'étage bioclimatique semi-aride à hiver froid. La pluviométrie y est comprise entre 240 et 400 mm /an. Le mois de janvier est le mois le plus froid avec une température minimale moyenne de 3,5 °C. La température du mois le plus chaud (juillet) avoisine les 33 °C. Les sols du Senalba sont formés de calcaires durs plus ou moins dolomitiques à texture moyenne à fine, avec un pH allant de 7,4 à 9. Le pourcentage de matière organique est compris entre 0,52 et 3,43 (Kadik, 2005). Du point de vue de la physionomie de la végétation, on distingue :

- Une strate arborescente constituée exclusivement de Pin d'Alep.
- Une strate arbustive comprenant de nombreux arbustes parmi lesquels : le Chêne vert (*Quercus ilex*), le Genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*), le Genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*), la Filaire (*Phillyrea angustifolia*) et les pistachiers (*Pistacia lentiscus* et *Pistacia terebinthus*).
- Une strate herbacée dominée par deux graminées : le Diss (*Ampelodesma mauritanicum*) et l'Alfa (*Stipa tenacissima*).

MÉTHODOLOGIE ADOPTÉE

La plupart des inventaires forestiers sont fondés sur des échantillonnages qui consistent à choisir des aires limitées représentatives de l'ensemble de la forêt. La distribution des unités d'échantillonnage peut prendre diverses formes. Elle peut être aléatoire et simple, systématique avec ou sans stratification (Gaudin, 1996). Le type d'inventaire adopté est l'échantillonnage systématique stratifié. Les avantages pratiques sont bien connus : répartition régulière des unités d'échantillonnage sur toute la surface d'étude et facilité qui en découle pour le repérage et le déplacement et des gains de précision appréciables (Samalens, 2009).

Le dispositif expérimental adopté se compose de 120 placettes alignées le long de transects altitudinaux localisés sur les versants nord et sud. Sur chaque versant, les placettes sont disposées dans des zones structurellement homogènes. Les altitudes varient en moyenne de 1350 à 1550 m en forêt de Senalba Gharbi et de 1250 à 1450 m en forêt de Senalba Chergui.

Nous avons donc sélectionné un total de 120 placettes circulaires de 800 m² (50 pour le Senalba Chergui et 70 pour le Senalba Gharbi dont le massif est plus étendu), choisies en fonction de l'âge des peuplements qui sont au stade de vieille futaie. Deux transects ont été choisis, un Nord/Sud selon une toposéquence du sommet au bas versant, et l'autre Est/Ouest. La distance entre deux placettes consécutives est de 200 m. Dans chaque placette ont été mesurées des variables dendrométriques : circonférence à 1,30 m du sol de tous les arbres, hauteurs totales, hauteur dominante, densité moyenne à l'hectare, surface terrière moyenne à l'hectare, l'âge, l'accroissement radial et des caractéristiques stationnelles : altitude et profondeur moyenne du sol.

La hauteur dominante est la moyenne arithmétique des hauteurs des huit plus gros arbres de chaque placette. La fertilité d'une station forestière peut être estimée par la hauteur dominante du peuplement qui s'y développe (Duplat, 1989). Du fait de la structure irrégulière de nos peuplements (allant de 60 à 150 ans), une correction de la hauteur dominante a été faite en fonction des courbes de croissance établies pour les 600 couples âge/hauteur. On tient compte ainsi des variations de la croissance pouvant exister entre les arbres de différentes générations (Brochiero *et al.*, 1999).

La surface terrière de la placette est la somme des surfaces terrières de tous les arbres de cette placette. La surface terrière d'un arbre est la surface de la section transversale de cet arbre à 1,30 m :

$$g = \frac{Ci^2}{4\pi} \text{ (m}^2\text{)}.$$

où Ci = circonférence de l'arbre à 1,30 m (selon M'hirit (1982) Ci est un excellent critère à la fois de densité du peuplement et du volume sur pied). Pour la mesure de l'âge, cinq arbres de chaque placette ont subi des sondages à la tarière de Pressler (deux carottes à 1,3 m, un du côté amont et l'autre du côté aval). Les carottes de sondage ont été préparées selon les méthodes classiques de la dendrochronologie (Fritts, 1976). Pour la mesure des cernes, on s'est servi d'une table de mesure Lintab. 6 qui fait des mesures au 1/100^e mm.

Afin d'obtenir la profondeur moyenne du sol, cinq profils pédologiques ont été effectués au niveau de chaque placette (selon deux transects Nord/Sud et Est/Ouest).

Les tests statistiques utilisés ont été :

- Le test de Shapiro-Wilk aboutissant à la non-normalité des données ;
- Le test de Kruskal-Wallis pour la différence globale entre groupes ;
- Le test de Nemenyi pour la distinction des groupes homogènes.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Au total, 2203 arbres ont été mesurés. Les résultats relatifs aux différents paramètres dendrométriques et stationnels considérés sont regroupés dans le tableau I. Ces résultats mettent en évidence une meilleure croissance des sujets sur les versants Nord de chaque peuplement. En exposition Nord du Senalba, les pentes sont plus abruptes que celles du versant Sud, surtout en haut de versant où elles sont de l'ordre de 45 %. En hiver, la neige persiste plus longtemps en versant Nord. Les arbres profitent mieux de l'eau infiltrée. L'énergie lumineuse reçue y est plus faible, donc l'évapotranspiration plus réduite. De ce fait, les expositions Nord sont plus fraîches et moins arides. De Luis *et al.* (2011) expliquent que l'exposition Nord est plus favorable pour l'alimentation en eau des arbres. L'exposition déterminera donc des climats locaux nettement différents et qui se traduisent par des variations de la végétation (Vicente-Serrano, 2010).

Sauvage (1963), en abordant la dissymétrie pluviométrique entre les topo-climats d'ubac et d'adret, note que sur les versants des massifs, à altitude égale, il existe une variation importante de la pluviosité entre versants exposés directement aux pluies et ceux qui ne le sont pas. Le Houérou *et al.* (1979) mentionnent que l'orientation des versants fait diminuer de 10 à 20 % les hauteurs d'eau sur les versants situés en ombre pluviale par rapport aux versants exposés à la pluie, voire de l'ordre de 20 à 40 %. Au Senalba, les versants Nord profitent mieux des masses d'air humides arrivant du côté Nord en provenance de la mer méditerranéenne.

Ces mêmes paramètres dendrométriques, comparés entre les deux massifs, montrent que le Pin d'Alep présente une meilleure croissance au niveau de la forêt de Senalba Gharbi, par rapport à la forêt de Senalba Chergui. Le gradient altitudinal étant de 100 à 150 m en moyenne entre les deux massifs. Le Houérou (1982) signale que, dans la majorité des cas, ce gradient est compris entre 5 et 10 %, jusqu'à près de 20 % d'accroissement du total annuel par 100 m d'élévation en altitude jusqu'à 2000 à 2500 m au Maghreb, cet accroissement étant de 30 à 40 mm en moyenne entre les deux massifs. Serre-Bachet (1992) et Vila *et al.* (2008) indiquent que l'accroissement de la pluie, favorable à la croissance du Pin d'Alep, est très lié à l'altitude et à la continentalité.

L'analyse de variance a révélé un effet très hautement significatif ($P < 0,005$) des deux facteurs « Altitude » et « Exposition » sur les paramètres dendrométriques « Hauteur dominante » et « Densité ».

TABLEAU I
Résultats des paramètres dendrométriques et stationnels

Paramètres dendrométriques	Hm (m)	Hd (m)	D (Pieds /ha)	Cm(c m)	G (m ² /ha)	Âge (ans)	Acc. (mm)	Prof. S. (cm)	Alt. Moy (m)	
Senalba Gharbi Nord	Max	16,95	17,69	200	161	19,21	155	1,47	58	1533
	Min	8,5	9,5	112,5	80	7,31	62	1,10	20	1360
	Moy	14,2	14,5	153,12	121,4	14,45	126,80	1,35	32,7	1434
	Ecart-type	4	3,23	46,86	41,43	4,99	25,95	0,12	8,45	53,16
Senalba Gharbi Sud	Max	14,37	15,31	212,5	158	17,53	155	1,42	30	1518
	Min	8,82	9,35	125	74	3,47	60	0,95	16,5	1318
	Moy	12,80	13,20	155,35	118,9	13,01	125,71	1,20	23	1420
	Ecart-type	3,88	3,83	38,28	49,26	5,13	27,20	0,14	9,34	41,72
Senalba Chergui Nord	Max	11,96	12,75	300	126	17,45	140	1,05	75	1340
	Min	7,5	8,31	187,5	72,42	6,52	70	0,71	47	1290
	Moy	9,3	11,24	258,33	96,75	12,34	104,4	0,95	56,93	1313
	Ecart-type	2,84	1,2	81,67	41,46	4,44	21,47	0,11	9,44	15,76
Senalba Chergui Sud	Max	10,75	11,68	525	98,27	13,02	150	1,1	51	1327
	Min	7	7,5	200	60,63	3,51	65	0,5	25	1260
	Moy	8,3	10,05	410,83	71,13	10,92	100,4	0,82	49	1295
	Ecart-type	1,9	1,23	139,61	23,42	4,36	21,59	0,13	8,4	22,15

Hm : Hauteur moyenne ; Hd : Hauteur dominante ; D : Densité ; Cm : Circonférence moyenne à 1,30 m ; G : Surface terrière. Acc. : Accroissement radial ; Prof. S. : Profondeur moyenne du sol ; Alt. Moy. : Altitude moyenne.

Les tranches altitudinales 1300-1400 m et 1400-1500 m de la forêt de Senalba Gharbi enregistrent des hauteurs dominantes moyennes respectives de 13,5 et 14,9 m. La tranche altitudinale > 1500 m correspond au haut des versants Nord et Sud de la forêt de Senalba Gharbi. Neige fréquente, vents violents, température minimale très basse, pentes abruptes (de l'ordre de 40 %) et sols superficiels sont autant de facteurs limitant le développement des arbres à cette altitude, ce que traduit la valeur de hauteur dominante moyenne la plus faible (11,1 m) (Fig. 2 A). Brochiero *et al.* (1999), dans leur étude sur l'autécologie du Pin d'Alep en Provence calcaire (France), notent que les altitudes supérieures à 600 mètres (haut des grands massifs) sont limitantes pour le développement de l'espèce.

Au Senalba Chergui, la hauteur dominante moyenne est respectivement de 10 et 11,25 m pour les deux tranches altitudinales 1200-1300 m et 1300-1400 m (Fig. 2 B).

La hauteur dominante moyenne est plus importante sur le versant Nord de chaque massif (14,5 et 11,24 m respectivement pour le Senalba Gharbi et Chergui). Sur le versant Sud, la hauteur dominante moyenne est de 13,2 m pour le Senalba Gharbi et 10,05 m pour le Senalba Chergui (Fig. 2 C). Kaabeche (1996) note que les forêts de Pin d'Alep de l'Atlas saharien algérien se trouvent en limite méridionale absolue, aussi recherchent-elles les compensations "mésoclimatiques" liées à l'altitude (partie supérieure des massifs) et à l'exposition (versant nord).

L'analyse de variance a révélé un effet très hautement significatif ($P < 0,005$) du facteur « Exposition » sur le paramètre dendrométrique « accroissement du cerne ». Les valeurs de l'accroissement moyen du cerne montrent une meilleure croissance en versant Nord (1,35 et 1,24 mm respectivement pour les forêts de Senalba Gharbi et Senalba Chergui) qu'en versant Sud (1,2 et 1,1 mm respectivement pour les forêts de Senalba Gharbi et Senalba Chergui (Fig. 2 D). Macias *et al.* (2006), Andreu *et al.* (2007), Sarris *et al.* (2007), De Luis *et al.* (2009), Carrer *et al.* (2010),

Mérian & Lebourgeois (2011) notent qu'il existe une forte corrélation positive entre les précipitations et la croissance radiale des arbres.

Les valeurs maximales d'accroissement du cerne correspondent aux moyennes de l'accroissement des arbres dont les densités sont inférieures à 160 tiges par hectare. La valeur minimale de 0,5 mm, enregistrée au niveau du versant Sud de Senalba Chergui, correspond à la moyenne de l'accroissement de la placette dont la densité est supérieure à 500 tiges par hectare. Ceci traduit l'effet négatif de la concurrence sur la croissance radiale. Vila *et al.* (2001) constatent que les arbres isolés ont une croissance radiale beaucoup plus importante que les arbres poussant en peuplements denses. Ceci est vérifié pour les individus jeunes, les individus d'âge intermédiaire et les individus âgés. Le phénomène est d'autant plus marqué que la densité est importante.

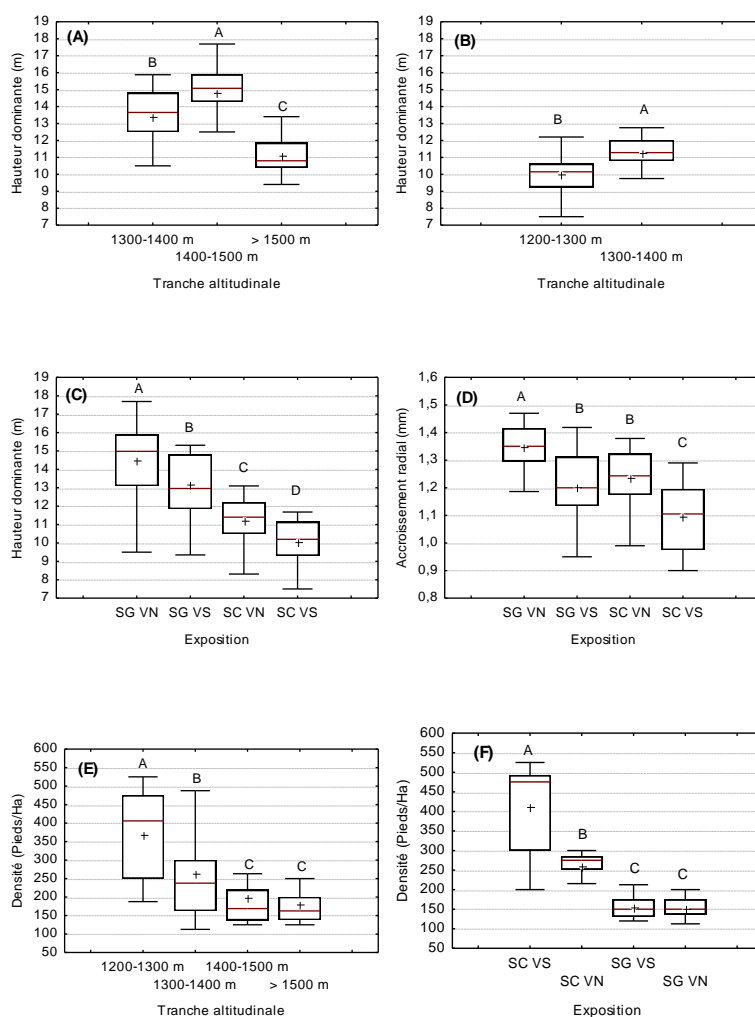


Figure 2.— (A) Effet de l'altitude sur la croissance en hauteur des arbres de Pin d'Alep dans le massif forestier de Senalba Gharbi. Test de Kruskal-Wallis : (2 ; 70) = 30,64. (B) Effet de l'altitude sur la croissance en hauteur des arbres de Pin d'Alep dans le massif forestier de Senalba Chergui. Test de Kruskal-Wallis : (1 ; 50) = 14,05. (C) Effet de l'exposition sur la croissance en hauteur des arbres de Pin d'Alep dans le massif forestier de Senalba (Djelfa- Algérie). Test de Kruskal-Wallis : (3 ; 120) = 60,58. (D) Effet de l'exposition sur l'accroissement radial des arbres de Pin d'Alep dans le massif forestier de Senalba. Test de Kruskal-Wallis : (3 ; 120) = 59,64. (E) Effet de l'altitude sur la densité des arbres de Pin

d'Alep dans le massif forestier de Senalba. Test de Kruskal-Wallis : (3 ; 120) = 33,83. (F) Effet de l'exposition sur la densité des arbres de Pin d'Alep dans le massif forestier de Senalba. Test de Kruskal-Wallis : (3 ; 120) = 62,54. Les valeurs représentent la moyenne (croix), la médiane (ligne) \pm Max. et Min. Les différentes lettres au-dessus des boîtes indiquent une différence significative à $P < 0.0001$ selon le test de Nemenyi [SC VS: Senalba Chergui Versant Sud ; SC VN : Senalba Chergui Versant Nord ; SG VS : Senalba Gharbi Versant Sud ; SG VN : Senalba Gharbi Versant Nord]. Dans une étude dendroécologique du Pin d'Alep dans une région semi-aride d'Algérie sur une période de 75 ans (1914 - 1988), Safar (1994) a obtenu des valeurs d'épaisseur du cerne de 1,47 mm et 1,46 mm pour la même région de Senalba.

DISTRIBUTION DE FRÉQUENCE DE LA DENSITÉ DES ARBRES

La notion de densité de peuplement est une notion dynamique. Elle est modifiée au cours des années par la mort naturelle de certains arbres ou artificiellement par l'action de l'homme (Alteyrac, 2005). La densité des arbres et la fertilité du site peuvent non seulement promouvoir la croissance mais également influencer sur la production de cônes et la quantité de graines stockées au niveau de la canopée (Tapias *et al.*, 2001 ; Goubitz *et al.*, 2004 ; Moya *et al.*, 2008).

Les valeurs de densités moyennes sont de 365 ; 265 ; 200 et 180 pieds/ha respectivement pour les tranches altitudinales 1200-1300, 1300-1400, 1400-1500 et > 1500 m (Fig. 2 E).

La densité moyenne est plus élevée sur le versant Sud de la forêt de Senalba Chergui : 410,83 tiges à l'hectare contre 258,33 sur le versant Nord (Fig. 2 F). Cela peut être justifié par la présence d'habitations sur le versant Nord où un grand nombre de riverains exercent une exploitation intensive du bois en hiver, souvent destructrice. Des traitements sylvicoles, notamment des éclaircies, doivent être pratiqués au versant Sud pour limiter la concurrence et augmenter l'espace vital aux arbres. En réponse à l'éclaircie, on assiste à une augmentation de la disponibilité de la lumière, de l'eau et des nutriments dans les peuplements (Aussenac *et al.*, 1995 ; Bréda *et al.*, 1995 ; Son *et al.*, 1999 ; Blanco *et al.*, 2005 ; Martin Benito *et al.*, 2010). Ces traitements peuvent améliorer les paramètres de croissance et de reproduction (Gonzalez-Ochoa *et al.*, 2004 ; Verkaik & Espelta, 2006 ; De las Heras *et al.*, 2007).

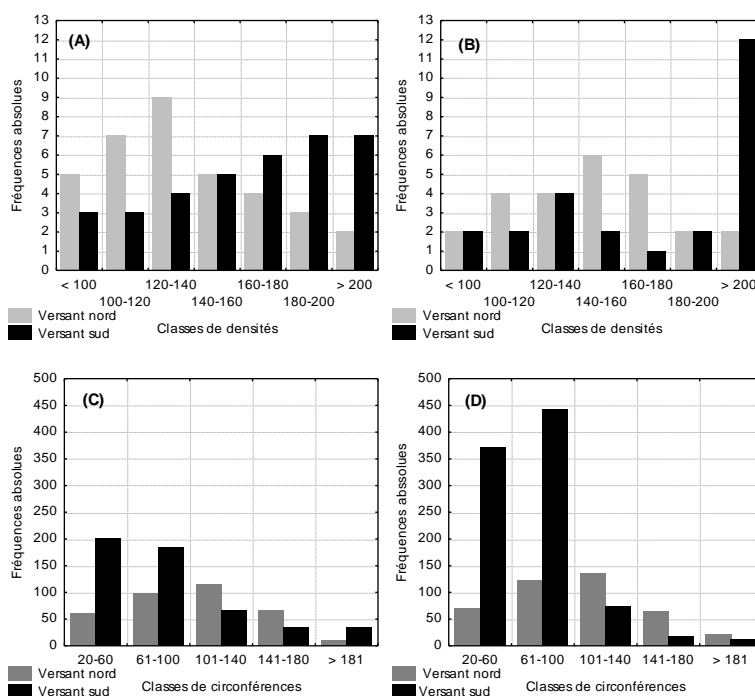


Figure 3.— (A) Répartition du nombre de placettes par classe de densité en Forêt de Senalba Gharbi. (B) Répartition du nombre de placettes par classe de densité en Forêt de Senalba Chergui. (C) Répartition du nombre d'arbres par classe de circonférence en Forêt de Senalba Gharbi. (D) Répartition du nombre d'arbres par classe de circonférence en Forêt de Senalba Chergui. Cette amélioration traduit certainement la réponse progressive des arbres aux nouvelles conditions de croissance, notamment par le développement du houppier et de la sphère racinaire (Aussenac & Granier, 1982 ; Mayor & Rodà, 1993 ; Puhe, 2003).

Quant à la forêt de Senalba Gharbi, la densité est sensiblement égale sur les deux versants Nord et sud (soit respectivement de 153,1 et 155,3 tiges à l'hectare).

La figure 3 (A & B) présentant la répartition du nombre de placettes par classes de densité montre que, pour le versant Nord de la forêt de Senalba Gharbi, la densité de 120 à 140 tiges/ha représente la fréquence la plus élevée (9 placettes). Sur le versant Sud, les densités supérieures à 180 tiges/ha représentent les fréquences les plus élevées (14 placettes).

Sur le versant Nord de la forêt de Senalba Chergui, la fréquence la plus élevée est de 140 à 160 tiges/ha (6 placettes). Sur le versant Sud, c'est la fréquence supérieure à 200 tiges/ha qui prédomine (12 placettes).

Sur les versants Nord des deux forêts, la densité moyenne varie de 154 à 158 tiges/ha. Sur les versants Sud, elle est respectivement de 198 tiges/ha pour la forêt de Senalba Gharbi et de 335 tiges/ha pour la forêt de Senalba Chergui. Cette supériorité numérique de la densité sur le versant Sud de la forêt de Senalba Chergui peut être interprétée par le fait que ce versant, le plus proche de la ville de Djelfa, profite d'une surveillance particulière de la part de l'administration forestière qui l'épargne des coupes illicites.

DISTRIBUTION DES CIRCONFÉRENCES DES ARBRES

La connaissance de la distribution de tiges par classes de circonférence constitue pour l'aménageur forestier un outil très précieux qui lui facilite la prévision des différentes interventions sylvicoles ainsi que les volumes récoltés (Sgahaier & Palm, 2002). La distribution des fréquences par classes de circonférence qui caractérise généralement les peuplements équiennes s'apparente à une courbe de Gausse (distribution normale). Cette distribution peut toutefois devenir dissymétrique suite aux traitements sylvicoles (Rondeux, 1999).

La répartition des fréquences d'arbres par classes de circonférence à 1,30 m de nos peuplements est présentée par la figure 3 (C & D). Cette répartition n'est pas régulière. En fait, deux aménagements forestiers ont été réalisés au niveau des deux massifs. Le premier, mené par un bureau d'étude bulgare en 1984, a été suivi d'une révision d'aménagement réalisée en 1994 par le Bureau National des Études Forestières. Les éclaircies ont touché pour la plupart les sujets dont le diamètre dépasse 35 cm (soit les classes de circonférences supérieures à 100 cm) et dont l'âge dépasse largement l'âge d'exploitabilité. Ces méthodes d'aménagement proposées pour les zones forestières semi-arides étaient incompatibles avec la réalité du terrain car elles présentaient invariablement les forêts comme plus homogènes qu'elles ne le sont en réalité (Grim, 1989).

Sur les deux versants Nord, on enregistre un pic correspondant aux classes de circonférence de 101 à 140 cm avec un effectif de 115 et 135 sujets respectivement pour le Senalba Gharbi et Chergui. Sur les versants Sud, les fréquences maximales sont enregistrées aux classes de 20 à 60 cm pour le massif de Senalba Gharbi avec un effectif de 200 arbres, et de 61 à 100 cm pour le massif de Senalba Chergui avec un effectif de 443 arbres. Sur le versant Sud, une diminution du nombre de tiges est notée avec l'augmentation de la circonférence, ce qui confirme la compétition entre les arbres pour l'occupation du sol et de l'espace aérien. Sur le versant Sud, 70 et 30 sujets appartiennent aux classes de 140 à 180 cm et supérieure à 180 cm respectivement pour le Senalba Gharbi et Chergui. Ces sujets se trouvent en majorité en haut de versant et donc inaccessibles aux coupes.

RELATION HAUTEUR DOMINANTE – PARAMÈTRES STATIONNELS

La hauteur dominante a été utilisée entre autres par Court-Picon *et al.* (2004), Skovsgaard & Vanclay (2008), Kitikidou *et al.* (2012) pour la caractérisation de la croissance des peuplements forestiers.

TABLEAU II

Régression multiple : Hauteur dominante/ Profondeur du sol – Altitude

Massif forestier	Station	Équation de régression
Senalba Gharbi	Versant Nord	Hd = 0,62 Alt. – 0,18 P.S. + 59,96 R multip. = 0,83; R part. Alt. = 0,58 R part. P.S. = 0,16 ; $P < 0,0001$
	Versant Sud	Hd = 0,64 Alt. – 0,19 P.S. + 31,32 R multip. = 0,81; R part. Alt. = 0,55 R part. P.S. = 0,15 ; $P < 0,0001$
Senalba Chergui	Versant Nord	Hd = 0,58 Alt. – 0,21 P.S. + 25,94 R multip. = 0,68; R part. Alt. = 0,45 R part. P.S. = 0,17 ; $P < 0,0001$
	Versant Sud	Hd = 0,63 Alt. – 0,16 P.S. + 31,07 R multip. = 0,73; R part. Alt. = 0,60 R part. P.S. = 0,19 ; $P < 0,0001$

R multip. : Régression multiple ; R part. : Régression partielle

Les résultats de la régression multiple entre les deux paramètres stationnels (Profondeur du sol ; Altitude) et la hauteur dominante sont résumés dans le tableau II. La profondeur du sol et l'altitude sont corrélés à la hauteur dominante, mais en sens inverse. Au niveau d'un même versant, plus on monte en altitude et moins le sol est profond et inversement. Sur le versant Nord de Senalba Gharbi, la profondeur moyenne du sol est respectivement de 40, 30 et 26 cm pour les tranches altitudinales 1300-1400 m, 1400-1500 m et > 1500 m. Sur le versant Sud du même massif, la profondeur moyenne du sol décroît : 28, 20 et 17 cm pour les tranches altitudinales croissantes : 1300-1400 m ; 1400-1500 m et > 1500 m. La même tendance est observée au Senalba Chergui, aux tranches altitudinales 1200-1300 m et 1300-1400 m, la profondeur du sol est de 62 cm et 55 cm pour le versant Nord ; 50 cm et 46 cm pour le versant Sud.

Les coefficients de corrélation multiple sont compris entre 0,68 et 0,83. Les coefficients de corrélation partielle du facteur « Altitude » sont compris entre 0,45 et 0,60. Ceux du facteur « Profondeur du sol » vont de 0,15 à 0,19. Le poids relatif du facteur altitude varie de 0,58 à 0,64. Celui du facteur profondeur du sol n'est que de 0,16 à 0,21. Cela montre que le facteur altitude a un effet beaucoup plus déterminant sur la croissance des arbres que celui de la profondeur du sol. Dans le même contexte, Venetier *et al.* (2010) indiquent que l'espèce s'adapte plus ou moins bien à tous les types de stations, à l'exception des sols à hydromorphie proche de la surface dont elle est exclue. Elle permet de valoriser, ou au moins d'occuper « forestièrement », des situations difficiles où peu d'autres essences s'adaptent. En Algérie, l'espèce peut s'adapter à divers types de sols et peut croître aussi bien sur des sols épais que sur des sols superficiels (Kadik, 1986).

RELATION HAUTEUR DOMINANTE – ÂGE

La modélisation de la croissance en hauteur dominante pour différents pins de la région méditerranéenne a retenu l'attention de nombreux chercheurs : Río & Montero (2001) développant des courbes d'indice de site pour *Pinus sylvestris* ; Calama *et al.* (2003) pour *Pinus pinea* ; Bravo-Oviedo *et al.* (2004) pour *Pinus pinaster* ; Diéguez-Aranda *et al.* (2005) pour *Pinus radiata* en Espagne ; Hatzistathis *et al.* (1995) ainsi que Kitikidou *et al.* (2011) pour *Pinus brutia* en Grèce. Les courbes d'ajustement de la hauteur dominante avec l'âge sont non-linéaires et souvent sigmoïdes (Sharma *et al.*, 2011).

Le modèle de croissance a été calculé arbre par arbre et non sur la hauteur moyenne des placettes du fait de la structure irrégulière de nos peuplements. Cette approche permet la comparaison de différentes générations dans des conditions rigoureusement identiques au sein des placettes (Vennetier *et al.*, 1999).

TABLEAU III
Caractéristiques des classes de fertilité

Classe de fertilité	Hd (m)	Placettes
I	19 - 16	30 placettes du versant Nord de Senalba Gharbi ; 7 placettes du versant Sud de Senalba Gharbi (situées toutes à une altitude de 1400-1500 m) ; 4 placettes du versant Nord de Senalba Chergui et 3 placettes du versant Sud de Senalba Chergui (situées à une altitude de 1300-1400 m).
II	16 - 13	4 placettes du versant Nord de Senalba Gharbi ; 21 placettes du versant Sud de Senalba Gharbi (situées toutes à une altitude de 1300-1400 m) ; 19 placettes du versant Nord de Senalba Chergui et 13 placettes du versant Sud de Senalba Chergui (situées toutes à une altitude de 1200-1300 m).
III	13 - 10	1 placette du versant Nord de Senalba Gharbi ; 7 placettes du versant Sud de Senalba Gharbi (situées toutes à une altitude > 1500 m) ; 2 placettes du versant Nord de Senalba Chergui et 9 placettes du versant Sud de Senalba Chergui (situées toutes à une altitude de 1200-1300 m).

L'ajustement du modèle de Chapman-Richards aux données issues des analyses de tiges a donné l'équation suivante :

$$H \text{ dom} = k1 [1 - \exp(-0,0201 \times \text{âge})] 1,5345$$

La qualité de l'ajustement du modèle par rapport au faisceau expérimental est fournie par le coefficient de détermination ($R^2 = 98 \%$) et par l'écart résiduel ($\delta = 0,105$).

L'âge de référence pour le Pin d'Alep est très variable. Il est fixé à 70 ans par Brochiero *et al.* (1999) et Vennetier (2010) en Provence française, à 80 ans par Montero (2001) en Espagne. Pour notre cas, nous l'avons fixé à 80 ans. Cet âge étant proche de l'âge moyen de notre peuplement.

Le modèle permet de dessiner un faisceau de courbes représentatives de la croissance des arbres. Nous avons choisi de distinguer 3 classes de fertilité d'amplitude 3 mètres (Fig. 4) dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau III.

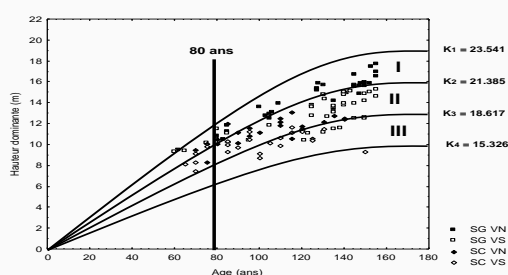


Figure 4.— Courbes de croissance en hauteurs dominantes des arbres de Pin d'Alep dans le massif forestier de Senalba (Djelfa- Algérie) [SC VS : Senalba Chergui Versant Sud ; SC VN : Senalba Chergui Versant Nord ; SG VS : Senalba Gharbi Versant Sud ; SG VN : Senalba Gharbi Versant Nord].

Kherchouche *et al.* (2011), traitant la croissance et l'écologie du Pin d'Alep dans le massif forestier de Beni-Imloul (Aurès, Algérie) ont pu distinguer, à partir du couple « Hauteur

dominante / Âge », quatre classes de fertilité allant de 16,5 m de hauteur dominante pour la classe la plus fertile, située entre 1250 à 1400 m d'altitude en exposition Nord-Ouest, à 7,5 m pour la dernière classe et la plus pauvre située entre 1000 à 1270 m d'altitude en exposition Est et Sud-Est. Pour leur part, Abbas (1986) et Vennetier *et al.* (2010), en évaluant la croissance de l'espèce en région méditerranéenne française, ont choisi de faire cinq classes de fertilité allant de 25 à 23.4 m de hauteur pour la première classe à 13 à 10 m pour la dernière classe.

CONCLUSION

La présente étude sur la dendroécologie du Pin d'Alep dans les forêts de Senalba Gharbi et Senalba Chergui a permis de dégager un certain nombre d'éléments de réponse quant au comportement de cette espèce vis-à-vis des conditions stationnelles ainsi que la part des facteurs historiques et des usages actuels et récents dans la structuration actuelle de ces forêts.

Les différents paramètres dendrométriques calculés : hauteur dominante, circonférence moyenne à 1,30 mètre, surface terrière et accroissement radial du cerne indiquent que la croissance est plus importante en versant Nord qu'en versant Sud pour un même milieu forestier.

La comparaison des paramètres dendrométriques entre les deux forêts considérées montre que l'altitude favorise une meilleure croissance du Pin d'Alep. Les densités moyennes sont relativement plus élevées sur le versant Sud où des éclaircies doivent être pratiquées pour un développement harmonieux des arbres. L'analyse de la régression multiple a révélé que la profondeur du sol et l'altitude sont corrélées à la hauteur dominante, mais en sens inverse. Au niveau d'un même versant, plus on monte en altitude et moins le sol est profond et inversement. Des faisceaux de courbes de fertilité obtenus à partir du couple « Hauteur dominante / Âge » ont mis en évidence trois classes de fertilité liées aux deux facteurs altitude et exposition.

Les résultats de cette recherche constituent un diagnostic descriptif et analytique qui mérite d'être élargi à d'autres forêts de Pin d'Alep en zone semi-aride pour tirer plus de renseignements sur le comportement de cette essence et proposer des traitements sylvicoles afin d'assurer une meilleure protection des pinèdes naturelles menacées depuis quelques décennies.

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (Projet CNEPRU n°. F-02820100012). Nous remercions vivement un expert anonyme pour ses commentaires constructifs.

RÉFÉRENCES

- ABBAS, H. (1986).— La productivité des forêts de Pin d'Alep dans le sud-est méditerranéen français. Analyses écodendrométriques. *Opt. Méd.*, 1 : 127-156.
- ALTEYRAC, J. (2005).— *Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire Picea mariana (Mill.) B.S.P.* Thèse de doctorat. Université Laval.
- ANDREU, L., GUTIÉRREZ, E., MACIAS, M., RIBAS, M., BOSCH, O. & CAMARERO, J.J. (2007).— Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biol.*, 13: 804-815.
- AUSSENAC, G. & GRANIER, A. (1982).— Influence d'une éclaircie sur la croissance et le bilan hydrique d'un jeune peuplement de Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (mirb), France). *Can. J. For. Res.*, 12: 222-231.
- AUSSENAC, G., GRANIER, A. & BRÉDA, N. (1995).— Effets des modifications de la structure du couvert forestier sur le bilan hydrique, l'état hydrique des arbres et la croissance. *Rev. For. Fr.*, 1: 54-62.
- BENTOUATI, A., OUDJEHIH, B. & ALATOU, D. (2005).— Croissance en hauteur dominante et classes de fertilité du Pin d'Alep dans le massif de Ouled Yakoub et des Beni Oudjana (Khenchela- Aures). *Sci. Tech.*, 23: 57-62.
- BLANCO, J.A., ZAVALA, M.A. & BOSCO IMBERT, J. (2005).— Sustainability of forest management practices: Evaluation through a simulation model of nutrient cycling. *For. Ecol. Manag.*, 213: 209-228.

- BRAVO-OVIEDO, A., DEL RÍO, M. & MONTERO, G. (2004).— Site index curves and growth model for Mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. *For. Ecol. Manag.*, 201: 187-97.
- BRÉDA, N., GRANIER, A. & AUSSENAC, G. (1995).— Effects of thinning on soil, tree water relations, transpiration and growth in an oak forest (*Quercus petraea* (Matt.) (Liebl). *Tree Physiol.*, 15: 295-306.
- BROCHIERO, F., CHANDIOUX, O., RIPERT, C., & VENNETIER, M. (1999).— Autécologie et croissance du Pin d'Alep en Provence calcaire. *Forêt Méd.*, 20: 83-94.
- CALAM, R., CAÑADAS, N. & MONTERO, G. (2003).— Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Ann. For. Sci.*, 60: 259-269.
- CARRER, M., NOLA, P., MOTTA, R. & URBINATI, C. (2010).— Contrasting tree-ring growth to climate responses of *Abies alba* toward the southern limit of its distribution area. *Oikos*, 119: 1515-1525.
- COURT-PICON, M., GADBIN-HENRY, C., GUIBAL, F. & ROUX, M. (2004).— Dendrometry and morphometry of *Pinus pinea* L. in lower Provence (France): adaptability and variability of provenances. *For. Ecol. Manag.*, 194: 319-333.
- DE LAS HERAS, J., MOYA, D., LOPEZ-SERRANO, F.R. & CONDES, S. (2007).— Reproduction of post-fire *Pinus halepensis* Mill. stands 6 years after silvicultural treatments. *Ann. For. Sci.*, 64: 59-66.
- DE LUIS, M., NOVAK, K., ČUFAR, K. & RAVENTÓS, J. (2009).— Size mediated climate-growth relationships in *Pinus halepensis* and *Pinus pinea*. *Trees*, 23: 1065-1073.
- DE LUIS, M., NOVAK, K., RAVENTÓS, J., GRICĂR, J., PRISLAN, P. & ČUFAR, K. (2011).— Climate factors promoting intra-annual density fluctuations in Aleppo pine (*Pinus halepensis*) from semiarid sites. *Dendrochronologia*, 29: 163-169.
- DIEGUEZ-ARANDA, U., HAROLD, E., BURKHART, H.E. & RODRIGUEZ-SOALLEIRO, R. (2005).— Modeling dominant height growth of radiata pine (*Pinus radiata* Don.) plantations in north-western Spain. *For. Ecol. Manag.*, 215: 271-284.
- DUPLAT, P. (1989).— Indice de fertilité basé sur un modèle de croissance en hauteur. Pp 51-78 in: M. Buffet & D. Girault (eds.), *Station forestière, production et qualité du bois: éléments méthodologiques*. CEMAGREF, Nogent-sur-Vernisson.
- FRITTS, H.C. (1976).— *Tree rings and climate*. Academic Press, London.
- GAUDIN, S. (1996).— *Dendrométrie des peuplements*. Ed. BTSA Gestion Forestière. France.
- GONZALEZ-OCHOA, A.I., LOPEZ-SERRANO, F.R. & DE LAS HERAS, J. (2004).— Does post-fire forest management increase tree growth and cone production in *Pinus halepensis*? *For. Ecol. Manag.*, 188: 235-247.
- GOUBITZ, S., NATHAN, R., ROITEMBERG, R., SHMIDA, A. & NEEMAN, G. (2004).— Canopy seed bank structure in relation to: fire, tree size and density. *Plant Ecol.*, 173: 191-201.
- GRIM, S. (1989).— *Le pré-aménagement forestier*. Volume 1. Alger : Éd. CEE et Ministère de l'hydraulique d'Algérie.
- HATZISTATHIS, A., GOUDELIS, G. & ZAGAS, TH. (1995).— Growth and yield of *Pinus brutia* reforestation in relation with soil and physiographic factors. *Sci. Ann. Depart. Forest. Nat. Environ.*, 38: 33-53.
- KAABÈCHE, M. (1996).— Les relations climat-végétation dans le bassin du Hodna (Algérie). *Acta bot. Gallica*, 1: 85-94.
- KADIK, B. (1986).— *Contribution à l'étude du Pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en Algérie*. *Écologie, dendrométrie, morphologie*. Ed. O.P.U, Alger, Algérie.
- KADIK-ACHOUBI, L. (2005).— *Étude phytosociologique et phytoécologique des formations à Pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) de l'étage bioclimatique semi-aride algérien*. Thèse de Doctorat. USTHB, Alger.
- KHERCHOUCHE, D., BENTOUATI, A. & KAABÈCHE, M. (2011).— Croissance et écologie du Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans le massif de Beni-Imloul (Aurès, Algérie). *Sécheresse*, 22: 43-48.
- KITIKIDOU, K., BOUNTIS, D. & MILIOS, E. (2011).— Site index models for Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) in Thasos Island, Greece. *Ciencia Florestal*, 21: 125-131.
- KITIKIDOU, K., PETROU, P. & MILIOS, E. (2012).— Dominant height growth and site index curves for Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) in central Cyprus. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 16: 1323-1329.
- LE HOUÉROU, H.N. (1982).— The arid bioclimate in the Mediterranean isoclimatic zone. *Ecol. Med.*, 8: 103-114.
- LE HOUÉROU, H.N., CLAUDIN, J. & POUGET, M. (1979).— Étude bioclimatique des steppes algériennes. *Bull. Soc. His. Nat. Afr. Nord*, 68 (3-4): 33-74.
- MACIAS, M., ANDREU, L., BOSCH, O., CAMARERO, J.J. & GUTIERREZ, E. (2006).— Increasing aridity is enhancing silver fir *Abies alba* (Mill.) water stress in its south-western distribution limit. *Climate Change*, 79: 289-313.
- MARTIN-BENITO, D., DEL RIO, M. & HEINRICH, I. (2010).— Response of climate-growth relationships and water use efficiency to thinning in a *Pinus nigra* afforestation. *For. Ecol. Manag.*, 259: 967-975.
- MAYOR, X. & RODÀ, F. (1993).— Growth response of holm oak (*Quercus ilex* L.) to commercial thinning in the Montseny mountains (NE Spain). *Ann. Sci. For.*, 50: 247-256.
- MÉRIAN, P. & LEBOURGEOIS, F. (2011).— Size-mediated climate-growth relationships in temperate forests: a multi-species analysis. *For. Ecol. Manag.*, 261: 1382-1391.

- M'HIRIT, O. (1982).— *Étude écologique et forestière des cédraies du rif marocain. Essai sur une approche multidimensionnelle, de la phytoécologie et de la production du Cèdre (Cedrus atlantica Manetti)*. Thèse de Doctorat. Université de Marseille.
- MONTERO, G., CANELLAS, I. & RUIS-PEINADO, R. (2001).— Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Invest. Agr. Sist. Recur. For.*, 10: 1-24.
- PUHE, J. (2003).— Growth and development of the root system of Norway spruce (*Picea abies*) in forest stands- a review. *For. Ecol. Manag.*, 175: 253-273, 488.
- QUÉZEL, P. (2000).— Taxonomy and biogeography of Mediterranean pines (*Pinus halepensis* and *P. brutia*). Pp 1-12 in: G. Neeman & L. Trabaud (eds). *Ecology, biogeography and management of Pinus halepensis and P. brutia forest ecosystems in the Mediterranean basin*. Backhuys Publishers, Leiden.
- QUÉZEL, P. (2002).— Les grandes structures de végétation en région méditerranéenne : facteurs déterminants dans leur mise en place post-glaciaire. *Geobios*, 32: 19-32.
- RIO, M. & MONTERO, G. (2001).— *Modelo de simulación de claras en masas de Pinus sylvestris L.* Monografías INIA: forestal. N° 3. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Madrid.
- RONDEUX, J. (1999).— *La mesure des arbres et des peuplements forestiers*. Ed. Les Presses Agronomiques, Gembloux.
- SAFAR, W. (1994).— *Contribution à l'étude dendroécologique du Pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) dans une zone semi-aride d'Algérie : l'Atlas saharien (Ouled Naïl – Aurès – Hodna)*. Thèse de Doctorat. Faculté Saint Jérôme. Aix-Marseille III.
- SAMALENS, J.C. (2009).— *Stratégies d'échantillonnage des dommages forestiers à l'échelle du paysage. Application aux forêts cultivées de Pin maritime (Pinus pinaster Ait.)*. Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux.
- SARRIS, D., CHRISTODOULAKIS, D. & KÖRNER, C. (2007).— Recent decline in precipitation and tree growth in the eastern Mediterranean. *Global Change Biol.*, 13: 1-14.
- SAUVAGE, C. (1963).— Étages bioclimatiques. Pp 1-44 in: *Atlas du Maroc*. Com. Nat. Géogr., Rabat.
- SERRE-BACHET, F. (1992).— Les enseignements écologiques de la variation de l'épaisseur du cerne chez le Pin d'Alep. *Forêt Méd.*, 8: 171-176.
- SGAHAIER, T. & PALM, R. (2002).— Répartition des arbres et des volumes par classes de grosseur dans les peuplements de Pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Ann. For. Sci.*, 59: 293-300.
- SHARMA, R.P., BRUNNER, A., EID, T. & OYEN, B.H. (2011).— Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors. *For. Ecol. Manag.*, 262: 2162-2175.
- SKOVSGAARD, J.P. & VANCLAY, J.K. (2008).— Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, 81: 12-31.
- SON, Y., WOO-KYUN, L. & LEE, S. (1999).— Effects of thinning on soil nitrogen mineralization in a Japanese larch plantation. *Comm. Soil Sci. Plant anal.*, 30: 2539-2550.
- TAPIAS, R., GIL, L., FUENTES-UTRILLA, P. & PARDOS, J.A. (2001).— Canopy seed banks in Mediterranean pines of south-eastern Spain: a comparison between *Pinus halepensis* Mill., *P. pinaster* Ait., *P. nigra* Arn. and *P. pinea* L. *J. Ecol.*, 89: 629-638.
- VENNETIER, M., RIPERT, C., BROCHIÉRO, F. & CHANDIOUX, O. (1999).— Evolution à court et long terme de la croissance du Pin d'Alep en Provence. Conséquences sur la production de bois. *Forêt Méd.* 20: 147-156.
- VENNETIER, M., RIPERT, C., BROCHIÉRO, F., RATHGEBER, C., CHANDRIOUX, O. & ESTÈVE, R. (2010).— Évaluation de la croissance du Pin d'Alep en région méditerranéenne française. *Rev. For. Fr.*, 5: 11-17.
- VERKAIK, I. & ESPELTA, J.M. (2006).— Post-fire regeneration thinning, cone production, serotiny and regeneration age in *Pinus halepensis*. *For. Ecol. Manag.*, 231: 155-163.
- VICENTE-SERRANO, S.M., LASANTA, T. & GRACIA, C. (2010).— Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agri. Forest Meteorol.*, 150: 614-628.
- VILA, B., NICAULT, A. & VENNETIER, M. (2001).— Influence de la densité des peuplements sur la croissance en hauteur et radiale de *Pinus sylvestris* L. en région méditerranéenne française. *Forêt Méd.*, 22: 65-74.
- VILA, B., VENNETIER, M., RIPERT, C., CHANDIOUX, O., LIANG, E-Y., GUIBAL, F. & TORRE, F. (2008).— Les changements globaux ont-ils déjà induit des changements de croissance en forêt méditerranéenne ? Le cas du Pin d'Alep et du Pin sylvestre de la Sainte-Baume. *Forêt Méd.* 21: 161-166.