

Contrôle local de l'hétérogénéité spatiale et analyse dynamique d'un essai multi-sites de provenances de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie

Local control of spatial heterogeneity and dynamic analysis of a multi-sites test of Aleppo Pine (*Pinus halepensis* Mill.) origins in Tunisia

Tahar SGHAIER¹

Abstract : Within a framework of an improvement program of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Tunisia, a comparative design including 40 Tunisians and foreign origins was established in 1964 at 4 sites representing the ecological area of the species in the country. Repeated measurements of the height and the diameter have been done in all sites from 1967 to 2000. The timber density of the wood with and without bark was measured at the age of 27 years within three sites among the four. The general shape of the trees was also described at the age of 26 years in all sites. After adjusting the collected data using the spatial model analysis which takes in consideration the emplacement effect to estimate the local fertility, a dynamic analysis by site was achieved. The obtained results showed that the height of the trees is more influenced by local heterogeneity of the ground than by the other parameters. Variability due to the ground effect not controlled represents 70% of the total variability observed for this parameter. The effectiveness of the used model in the control of the space heterogeneity decreases with time for the growth of diameter. This reduction in effectiveness is due to the competition between the trees which is accentuated with the age and whose used model does not hold account. It also appeared that the zones with strong growth are mobile in the time and become stable only at an advanced age. At the adulthood, zones with weak fertility, characterized by the least strong trees and the densest wood are more concerned by the mortality. On the other hand, a growth model of the average height trend related to the age was adjusted on the individual data for each site and different growth characteristics could be calculated. The time on which spreads out the biggest part of the growth which varies from 35 to 48 years according to the site seems to depend directly on the annual rainfall. Finally, thanks to this dynamic study, the measures and the origins to be retained for the definitive evaluation of these tests were identified.

Key words : Aleppo pine-nearest neighbours- residues- heterogeneity- growth model- growth time- growth speed

Résumé : Dans le cadre d'un programme d'amélioration du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie, un même dispositif de comparaison d'une quarantaine de provenances tunisiennes et étrangères a été installé en 1964 dans quatre sites représentatifs de l'aire de répartition de l'espèce dans le pays. Des mesures répétées de la hauteur totale des arbres et du diamètre du tronc, allant de 1967 jusqu'à 2000 ont été effectuées dans les différents sites. La densité du bois mesurée sur et sous écorce a été déterminée à l'âge de 27 ans dans trois des quatre sites. Une notation de la forme générale des arbres a également été effectuée à l'âge de 26 ans dans l'ensemble des sites. Après ajustement des données collectées à l'aide d'un modèle d'analyse spatiale qui tient compte de l'effet positionnement pour l'estimation de la fertilité locale du terrain, une analyse dynamique par site a été réalisée. Les résultats obtenus ont montré que la hauteur des arbres est le paramètre le plus influencé par l'hétérogénéité locale du terrain. La variabilité due à l'effet terrain non contrôlé représente jusqu'à 70% de la variabilité totale observée pour ce paramètre. L'efficacité du modèle d'analyse spatiale utilisé dans le contrôle de l'hétérogénéité du terrain pour la croissance en diamètre diminue avec le temps. Cette diminution d'efficacité est due à la compétition entre les arbres qui s'accroît avec l'âge et dont le modèle utilisé ne tient pas compte. Il s'est également avéré que les zones à forte croissance sont mobiles au cours du temps et ne se stabilisent qu'à un âge relativement avancé. A l'âge adulte, les zones à faible fertilité, caractérisées par les arbres les moins vigoureux et le bois le plus dense sont celles les plus touchées par la mortalité. D'autre part, l'ajustement à partir des données individuelles d'un modèle de croissance décrivant l'évolution de la hauteur moyenne en fonction de l'âge a permis de déterminer les caractéristiques de la croissance

¹Unité de Gestion et de Valorisation des Ressources Forestières, Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts, BP n° 10, 2080 Ariana, Tunisie. e-mail : sghaier.tahar@iresa.agrinet.tn

par site expérimental. Le temps sur lequel s'étale la plus grande partie de la croissance qui varie de 35 à 48 ans selon le site semble dépendre directement de la pluviométrie annuelle. Finalement, grâce à cette étude dynamique, les mesures et les provenances à retenir pour l'évaluation définitive de ces essais ont pu être identifiées.

Mots-clés : Pin d'Alep - proches voisins – résidus – hétérogénéité -modèle de croissance - temps de croissance
- Vitesse de croissance

INTRODUCTION

Le pin d'Alep couvre plus de la moitié des superficies forestières tunisiennes. C'est aussi l'essence la plus utilisée dans les programmes de reboisements forestiers. La qualité des semences joue un rôle prépondérant tant au niveau de l'élevage des plants en pépinière qu'au niveau des caractéristiques dendrométriques, morphologiques et physiologiques du produit final. L'existence de dispositifs installés depuis les années 60 dans différentes ambiances édapho-climatiques et comportant une quarantaine de provenances autochtones et allochtones, sur lesquelles ont été effectuées des mesures répétées étalées sur une quarantaine d'années, constitue une chance unique pour opérer un choix judicieux du meilleur matériel génétique en vue de sa multiplication et de son amélioration. L'hétérogénéité très marquée du terrain sur lequel se reposent ces dispositifs de grande taille et la mortalité échelonnée sur ces quatre dernières décennies qui a touché d'une façon plus ou moins inégale les sites et les provenances, rendent l'utilisation des méthodes classiques d'analyse des données collectées peu efficaces. Après ajustement des données à l'aide d'un modèle des plus proches voisins permettant de contrôler localement l'hétérogénéité du terrain, une analyse dynamique de ces dispositifs s'avère nécessaire avant d'entreprendre l'analyse définitive. En plus de l'identification des mesures et des provenances à retenir pour l'évaluation définitive de ces essais, cette analyse dynamique nous permettra néanmoins de :

- suivre et comprendre l'évolution de l'hétérogénéité du terrain dans le temps et apprécier le gain de précision apporté par l'analyse spatiale sur chacun des caractères étudiés,
- suivre l'évolution de la mortalité dans le temps, établir une relation entre la mortalité et l'hétérogénéité locale du terrain et identifier les provenances les moins adaptées,
- mesurer le degré de liaison entre les caractères étudiés et suivre son évolution dans le temps,
- modéliser et caractériser la croissance dans les différents sites.

Après une présentation du matériel végétal utilisé et des sites expérimentaux, du dispositif expérimental et des données collectées, la description du modèle d'analyse spatiale utilisé, les notions de corrélation entre résidus voisins, hétérogénéité et compétition et la présentation du modèle de croissance ajusté (paragraphe 2), une synthèse des résultats (paragraphe 3) et quelques conclusions (paragraphe 4) sont présentées.

MATERIEL ET METHODES

Matériel végétal:

Le matériel végétal utilisé est composé d'une quarantaine de provenances tunisiennes et étrangères (KHOUJA, 1997). En plus de 29 provenances tunisiennes échantillonnées sur l'ensemble de l'aire de répartition du pin d'Alep dans le pays, 7 provenances marocaines, 3 provenances italiennes et une provenance d'Israël ont également été testées. Le tableau I présente la liste des provenances testées avec les caractéristiques des lieux d'origine. La figure 1 schématise la localisation sur la carte des provenances tunisiennes et des sites expérimentaux, tandis que la figure 2 représente un jeune peuplement du pin d'Alep dans une parcelle expérimentale.

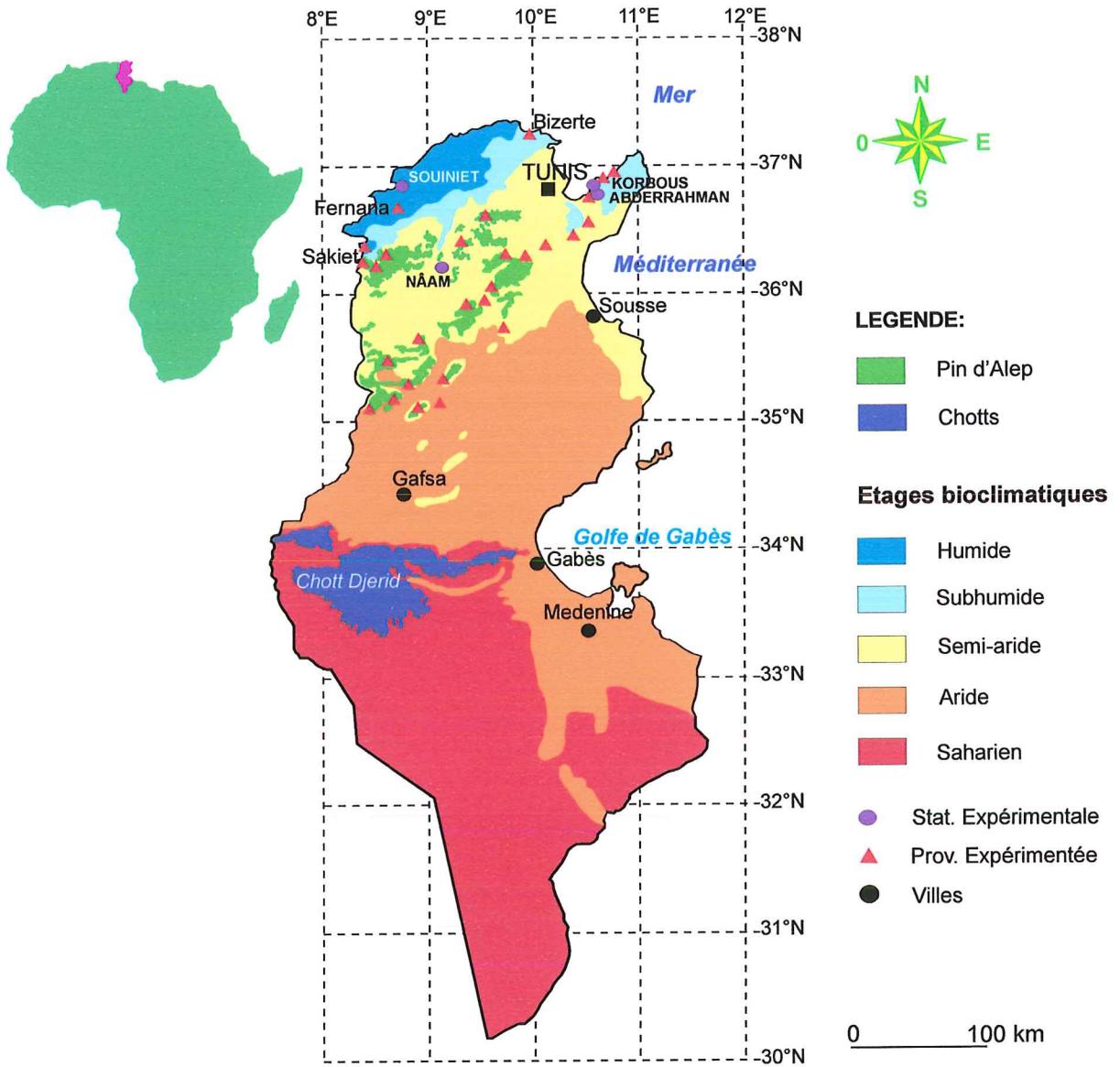


Fig.1. Localisation des provenances et des sites expérimentaux (Khouja, 1977)



Tableau I – Liste des provenances de pin d’Alep testées et description des lieux d’origine.

Abréviations: Pro: Provenance, Lat: Latitude, Lon: Longitude, Alt: Altitude, Plu: Pluviométrie, Sub: Substrat, C: Calcaire, M: Marne, M-C: Marno-calcaire, G-C: Gréso-calcaire, S-C: Sablo-calcaire, GY-C: Gypso-calcaire, GY-M: Gypso-marneux.

Prov.	Localité	Pays	Lat. (deg)	Lon. (deg)	Alt. (m)	Plu. (mm)	Sub.
A	Affra	Maroc	30°56'	6°06'	1550	-	-
AA	Mezej El Bab	Tunisie	36°32'	9°37'	300	400	C
AB	Ouesselatia Sud	Tunisie	35°48'	9°45'	300	400	M-C
AC	Ouergha	Tunisie	36°12'	8°30'	800	750	C
AD	Marchana	Tunisie	36°32'	10°17'	200	550	C
AE	Jebel Zaghouan	Tunisie	36°22'	10°05'	400	600	M-C
AF	Oum Jedour	Tunisie	35°38'	8°57'	900	480	M
AG	Selloum	Tunisie	35°05'	8°40'	900	400	M-C
AH	M'Guila	Tunisie	35°20'	9°12'	800	300	C
AI	Fernana	Tunisie	36°40'	8°42'	700	785	M-C
AJ	Otricoli	Italie	42°34'	12°38'	400	830	C
AK	Gargano	Italie	41°54'	16°00'	225	500	C
AL	Patemisco	Italie	40°35'	17°07'	6	500	S-C
AM	Jérusalem	Israël	32°44'	35°00'	400	-	-
AN	Bizerte	Tunisie	37°15'	9°57'	50	-	-
AO	Chambi	Tunisie	35°12'	8°42'	1530	550	C
B	Ait Tamellil	Maroc	31°25'	6°54'	1550	-	-
C	Sgate	Maroc	32°00'	6°54'	1200	-	-
D	Tanmizdite	Maroc	31°48'	6°42'	2000	-	-
E	Tillouguite	Maroc	32°02'	6°07'	1450	500	-
F	Oued Tessaoute	Maroc	31°30'	7°00'	1300	-	-
G	Aknoul	Maroc	34°38'	3°58'	1200	500	-
H	Sakiet	Tunisie	36°15'	8°25'	700	700	M-C
J	Jebel Korbous	Tunisie	36°48'	10°35'	200	600	G-C
K	J. Abderrahman	Tunisie	36°42'	10°40'	200	550	C
L	Ain Zeres	Tunisie	36°17'	9°44'	300	475	M-C
M	Mine de Serj	Tunisie	36°56'	9°25'	900	450	C
N	Kessera	Tunisie	36°52'	9°25'	900	500	C
O	Oued El Bir	Tunisie	36°53'	10°47'	50	550	M
P	Segermes	Tunisie	36°22'	10°25'	100	425	C
Q	Semama	Tunisie	35°20'	8°50'	1200	550	C
R	Berino	Tunisie	35°28'	8°37'	960	650	C
S	Cambi	Tunisie	35°12'	8°42'	1550	550	C
T	Saïdane	Tunisie	36°15'	9°58'	500	475	C
U	Jebel Echeid	Tunisie	36°23'	9°20'	650	550	GY-C
V	Dernaia	Tunisie	35°07'	8°30'	1100	275	G-C
W	Sodga	Tunisie	36°02'	9°35'	730	645	C
X	Takrouna II	Tunisie	36°22'	8°25'	700	850	C
Y	Mellègue	Tunisie	36°16'	8°37'	350	450	GY-M
Z	Jebel Koumine	Tunisie	35°08'	9°08'	600	250	G-C

Sites expérimentaux:

L'étude a concerné 4 sites expérimentaux, à savoir: Korbous, Jbel Abderrahman, Henchir Nâam et Souiniet. Les sites ont été choisis dans différentes régions de l'aire tunisienne de répartition du pin d'Alep de manière à couvrir un ensemble de conditions pédo-climatiques susceptibles d'être rencontrées par ailleurs dans les zones à reboiser. Les caractéristiques pédoclimatiques des différentes stations expérimentales se résument comme suit :

Station de Jbel Abderrahman :

La parcelle expérimentale se trouve sur le versant ouest du Jbel Abderrahman à 255 m d'altitude, la station expérimentale relève du bioclimat sub-humide à hiver chaud avec une pluviométrie moyenne annuelle de 600 mm et une température moyenne annuelle de 18 °C ; le maximum des températures du mois le plus chaud peut atteindre 32,4°C. La composition

lithologique du versant est à base de grès et d'argile, non calcaires. La roche mère affleure en bas de la parcelle d'essai.

Station de Korbous :

La parcelle expérimentale est située sur le versant sud du Jbel Korbous à 180 m d'altitude ; elle relève du bioclimat sub-humide à hiver chaud avec une pluviométrie moyenne annuelle de 540 mm et une température moyenne annuelle de 18,2°C ; le maximum des températures du mois le plus chaud peut atteindre 32,7°C. Du point de vue lithologique, le versant sur lequel repose la parcelle expérimentale est caractérisé par une alternance de grès et des marnes avec une pédogenèse marquée surtout par des encroûtements calcaires et un ensablement d'origine éolienne.

Station de Henchie Nâam :

Situé en pleine zone agricole à une altitude de 450 m, l'arboretum dans lequel se situe la parcelle expérimentale devait servir de référence pour les plantations en terrains agricoles. Le site expérimental relève du bioclimat semi-aride moyen à hiver tempéré avec une pluviométrie moyenne annuelle de 524 mm et une température moyenne annuelle de 16,3 °C ; le maximum des températures du mois le plus chaud peut atteindre 34 °C. La composition lithologique du terrain est à la base des matériaux calcaires plus ou moins durs (calcaires marneux à marnes). Sur la partie supérieure de la parcelle d'essai on trouve des bancs de calcaire marneux qui affleurent.

Station de Souiniet :

La parcelle est située sur le versant sud du Jbel Souiniet à 492 m d'altitude. La station expérimentale relève du bioclimat humide à hiver tempéré avec une pluviométrie moyenne annuelle de 1140 mm et une température moyenne annuelle de 15,6 °C ; le maximum des températures du mois le plus chaud peut atteindre 31 °C. Le versant sur lequel repose la parcelle expérimentale est caractérisé par une lithologie composée de grès et d'argiles bariolées.



Fig. 2 – Jeune peuplement de pin d'Alep.

Dispositif expérimental adopté et données collectées:

Les essais ont été installés durant les campagnes de plantation 1964 et 1965 (KHOUJA, 1997). Les plants utilisés avaient un âge compris entre 6 et 12 mois. Après un labour mécanisé, la plantation a été effectuée dans des trous de 80 cm de profondeur à une distance de 3 m de chaque côté, soit une densité d'environ 1100 plants par hectare.

Le dispositif expérimental adopté pour les quatre sites est celui d'un dispositif en blocs aléatoires complets avec des parcelles expérimentales mono arbre, c'est-à-dire chaque provenance est représentée dans chaque bloc par un seul arbre. Aucun regarni n'a été effectué pour remplacer les arbres morts. Les provenances étudiées ont été réparties inégalement entre les sites. Les provenances communes aux quatre sites sont au nombre de 30. Le nombre de répétitions est également variable d'un site à l'autre. Le tableau II présente les paramètres du dispositif relatif à chaque site.

Tableau II – Paramètres du dispositif expérimental par site.

Site expérimental	Nombre de provenances	Nombre de blocs	Nombre total d'arbres
Abderrahman	35	40	1400
Korbous	30	33	990
Nâam	40	62	2480
Souiniet	40	22	880

Des mesures et notations répétées, allant de 1967 jusque 2000, ont été effectuées. Les mesures et les notations ont concerné des paramètres relatifs à la croissance (hauteur et diamètre), à la qualité physique du bois (densité du bois) et à la forme générale des arbres.

Le tableau III présente la liste des variables mesurées par site et année.

Tableau III – Liste des variables mesurées par année et par site expérimental.

Abréviations : h – hauteur totale ; c – circonférence ; d – diamètre à 1,30 m ; f – forme ; densité – densité du bois mesurée sur et sous écorce.

Site expérimental	Année de mesures							
	1967	1970	1971	1975	1990	1991	1993	2000
Aberrahman	h	-	h	-	f	-	h, d	h, d
Korbous	h	h	-	h, c	h, f	densité	h, d	h, d
Nâam	-	h	-	h, c	f	densité	h, d	h, d
Souiniet	h	-	-	h, c	f	h, densité	h, d	h, d

La hauteur totale des arbres a été mesurée au centimètre près à l'aide d'une réglette télescopique, tandis que le diamètre a été mesuré au millimètre près au moyen d'un compas forestier. En ce qui concerne la forme générale des arbres, plusieurs notations allant de 1 à 3 ont été attribuées par deux observateurs pour différents caractères de rectitude et de "branchaison". Afin d'avoir une seule note par arbre qui traduit une appréciation globale de sa forme, la moyenne de toutes les notes partielles a été déterminée. Une valeur moyenne élevée traduit une meilleure forme et inversement. Des détails relatifs à la définition et la signification des différents caractères notés sont donnés par KHOUJA (1997). La densité du bois, déterminée sur et sous écorce (P_{sure} et P_{soue}), est estimée par la profondeur de pénétration en mm d'une aiguille (pilodyne) dans le tronc de l'arbre. Plus les valeurs sont élevées, moins le bois est dense. Afin que la densité varie dans le même sens que les autres paramètres mesurés, et vu les limites supérieures enregistrées (à savoir : 39 pour la densité sur écorce et 29 pour la densité sous écorce), nous avons opté pour les transformations suivante:

$$P_{sure} = 40 - P_{sure}$$

$$P_{soue} = 40 - P_{soue}$$

Modèle des plus proches voisins utilisé

Afin de contrôler l'hétérogénéité du terrain qui entraîne des imprécisions dans l'interprétation des résultats, le modèle autorégressif ci-dessous, de paramètres b_1 et b_2 a été utilisé pour ajuster les données observées à l'effet local du terrain. Le principe de ce modèle est basé sur l'estimation itérative jusqu'à convergence de la performance de chaque parcelle en fonction de celles de ses voisines.

$$e_{l,c} = b_1 \left(\frac{1}{4} e_{l-1,c} + \frac{1}{4} e_{l+1,c} + \frac{1}{4} e_{l,c-1} + \frac{1}{4} e_{l,c+1} \right) + b_2 \left(\frac{1}{4} e_{l-1,c-1} + \frac{1}{4} e_{l+1,c+1} + \frac{1}{4} e_{l+1,c-1} + \frac{1}{4} e_{l-1,c+1} \right) + \varepsilon_{l,c}$$

$e_{l,c}$ étant le résidu issu d'une analyse de la variance à un critère de classification et observé sur un arbre situé dans une parcelle de coordonnées l,c d'un champ d'essai de p lignes ($l = 1, \dots, p$) et q colonnes ($c = 1, \dots, q$).

Les détails concernant les calculs et l'application de ce modèle pour l'estimation du gradient du terrain en tout point du dispositif et l'ajustement des données observées à l'effet terrain sont donnés notamment par SGHAIER *et al.* (sous presse), SGHAIER et AKRIMI (2004), GOUMARI et CLAUSTRIAUX (1990) et par GOUMARI(1990).

Corrélation entre résidus voisins, hétérogénéité du terrain et compétition:

Une corrélation positive entre parcelles voisines est généralement observée en expérimentation agronomique (AASVEIT, 1982 ; WHITTLE, 1954). Cette corrélation peut avoir schématiquement deux origines qui produisent des effets opposés (PICHOT, 1993) :

- un effet de terrain qui provoque une corrélation positive entre voisins,
- un effet de compétition entre plants ou arbres qui provoque une corrélation négative.

Si la corrélation entre voisins a pour origine le gradient naturel du terrain, la structuration du dispositif en blocs ne retire que partiellement les effets du milieu qui sont toujours estimés d'une façon discrète (marches d'escaliers). Le carré moyen résiduel intègre alors pour partie le gradient du terrain.

Soit le modèle très général d'analyse de la variance suivant :

$$Y = \mu + T + E + \varepsilon$$

où :

- μ : moyenne générale,
- T : effet traitement,
- E : effets environnementaux,
- ε : résidus de moyennes nulles et de variance σ^2 .

Dans la pratique, ε constitue la partie non expliquée par le modèle. Elle englobe tous les effets qui influencent directement ou indirectement le caractère quantitatif observé et dont le modèle ne tient pas compte, c'est-à-dire :

- la diversité génétique intra-génotypique,
- la part du gradient de terrain non prise en compte par le dispositif expérimental,
- la compétition entre plants,
- l'imprécision des mesures et autres effets aléatoires.

Sur le plan environnemental, le second point provoque une corrélation positive entre résidus voisins. Cette corrélation est d'autant plus forte que le gradient est mal estimé. Toutefois, en présence de compétition entre plants, la corrélation entre résidus voisins a tendance à diminuer pour les caractères influencés par la compétition même en présence d'hétérogénéité du terrain mal contrôlée par le modèle. PICHOT (1993) considère que la corrélation résiduelle pourrait être un critère d'adéquation du modèle d'analyse au même titre que le coefficient de variation.

La corrélation entre résidus voisins ρ_v déterminée dans notre étude est la corrélation entre le résidu d'une parcelle avec la moyenne des résidus des 8 parcelles voisines.

$$\rho_v = \text{corr}(e_i, \frac{1}{v} \sum e_v)$$

ε étant les résidus issus d'une analyse de la variance selon un dispositif complètement aléatoire réalisée sur les données brutes.

D'autre part, afin de quantifier la variabilité liée aux effets de terrain, le quotient suivant sera déterminé (PICHOT, 1993) : $\frac{\sigma_g}{\sigma_0}$

avec :

σ_g : écart type du gradient de terrain: $T_{i,g}$

σ_0 : écart type des observations brutes.

Pour des mesures répétées dans le temps sur les mêmes individus, ces paramètres nous permettent de :

- suivre l'évolution de l'hétérogénéité du terrain avec l'âge des arbres,
- identifier les caractères influencés par la compétition et déterminer par conséquent le moment où les arbres entrent en compétition. C'est à ce moment que les interventions sylvicoles peuvent être réalisées (ex. éclaircies).
- déterminer l'incidence du terrain sur chacun des caractères mesurés (% de variabilité due au terrain).

Evolution de la hauteur en fonction de l'âge et caractéristiques de croissance:

Afin de retracer la cinétique de la croissance moyenne en hauteur des différents essais, un modèle décrivant l'évolution des hauteurs individuelles corrigées à l'effet terrain en fonction de l'âge peut être ajusté par site. La croissance en hauteur des arbres, représentée par des valeurs observées non négatives, constitue un phénomène limité et non décroissant. Le modèle de croissance utilisé doit donc présenter une asymptote horizontale pour les valeurs du temps tendant vers l'infini et ne pourra pas prendre des valeurs négatives.

Différents modèles présentant ces caractéristiques sont cités dans la littérature. Il s'agit de fonctions continues, non négatives, non décroissantes et bornées (DEBOUCHE, 1979). Le modèle de gauss modifié fait partie de ce groupe de modèles (DEBOUCHE, 1979 ; PALM, 1989 ; PALM et CHENTOUF, 1986 ; SGHAIER et PALM, 2002 ; SGHAIER *et al.*, 2001). La formulation mathématique de ce modèle à trois paramètres est la suivante :

$$y = M(1 - e^{-\frac{(x-a)^2}{b}})$$

avec :

y : la hauteur individuelle en cm,

x : le temps en années,

M : asymptote horizontale, correspondant à la valeur maximale vers laquelle tend y,

a et b : paramètres qui déterminent respectivement le début de la croissance et l'étalement de la croissance dans le temps.

1° Vitesse de croissance absolue, maximale et moyenne.

La vitesse de croissance absolue ou l'accroissement annuel courant (AAC) est la dérivée de la hauteur moyenne par rapport au temps :

$$V_a = AAC = \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{2M(x-a)}{b^2} e^{-\frac{(x-a)^2}{b}}$$

La vitesse de croissance est maximale au point d'inflexion du sigmoïde $x = a + \frac{b}{\sqrt{2}}$

correspondant à une valeur de: $y = (1 - \frac{1}{\sqrt{e}})M$ et vaut: $V_{\max} = \frac{2}{\sqrt{2e}} \frac{M}{b}$

La vitesse de croissance moyenne ou l'accroissement annuel moyen (AAM) est calculée par

l'expression : $V_{\text{moy}} = AAM = \frac{1}{M} \int_0^M \frac{dy}{dx} dy = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{M}{b}$

2° Temps de croissance.

L'interprétation du paramètre b peut être faite à partir de la vitesse moyenne V_{moy} définie ci-dessus, et de la hauteur maximale M . En divisant la hauteur maximale par la vitesse moyenne, on obtient un "temps de croissance" qui est égal à une constante que multiplie le paramètre b . Comme le modèle de croissance est asymptotique, le temps réel nécessaire pour passer d'une hauteur nulle à la hauteur $y = M$ est évidemment infini et n'a pas de sens pratique (DEBOUCHE, 1979). Le temps de croissance calculé en divisant la hauteur maximale par la vitesse moyenne, est en fait le temps nécessaire à la plus grande partie de la croissance. Le temps de croissance relatif au modèle utilisé est donc comme suit :

$$T = \frac{M}{V_{\text{moy}}} = 2\sqrt{\frac{2}{\pi}}b$$

Ce temps de croissance correspond à : $C(T) = 0,934M$

C'est à dire 93,4% de la hauteur moyenne maximale est obtenue durant le temps de croissance T .

Des détails concernant les calculs des différents paramètres cités ci-dessus à partir du modèle de croissance utilisé sont donnés par DEBOUCHE (1979).

Selon leur position sur la courbe de croissance, les différentes mesures de la hauteur réalisées peuvent être classées soit dans la phase intense de la croissance, soit dans la phase de ralentissement de la croissance et ceci par rapport au point d'inflexion. Le comportement des provenances peut par la suite être étudié pour chacune de ces deux phases de croissance.

Coefficient de concordance de Kendall:

Pour des mesures répétées dans le temps sur les mêmes individus, il n'est pas possible de tester l'interaction provenance \times année à l'aide de l'analyse de la variance qui nécessite l'indépendance des observations successives. Pour ce faire, les provenances peuvent être classées pour chaque mesure par ordre décroissant en fonction des moyennes annuelles ajustées à l'effet terrain et le coefficient de concordance de Kendall W (DANIEL, 1978) pourra être calculé. Il s'agit d'un test non paramétrique effectué sur les rangs et dont l'hypothèse nulle suppose la dépendance entre les rangs et les années de mesures. L'objectif étant de tester si la répartition des rangs occupés par les provenances dépend des années de mesures ou au contraire si les provenances occupent plus ou moins le même rang d'une année de mesures à une autre.

Pour n provenances et m années ou mesures, le coefficient de concordance de Kendall W s'écrit de la façon suivante :

$$W = \frac{12 \sum_{j=1}^n R_j^2 - 3m^2n(n+1)^2}{m^2n(n^2-1)}$$

où R_j représente la somme des rangs occupés par la $j^{\text{ième}}$ provenance dans les m années ou mesures.

Pour des valeurs faibles de m et de n , des tables spécifiques qui permettent de tester l'hypothèse nulle sont donnés par DANIEL (1978). L'hypothèse nulle est rejetée au niveau de signification α si la probabilité P associée aux valeurs de W , m et n est inférieure ou égale à α . Pour des valeurs de m et de n non couvertes par les mêmes tables, la variable χ^2 d'indépendance suivante sera calculée :

$$\chi^2 = m(n-1)W$$

et sera comparée à une valeur χ^2 théorique avec $n-1$ degré de liberté.

RESULTATS

Evolution de la mortalité en fonction du temps

Le tableau IV présente l'évolution de la mortalité dans le temps en pourcentage par site expérimental. Il ressort de ce tableau que les deux dispositifs les plus touchés par la mortalité sont ceux de Souiniet et de Jbel Abderrahman avec respectivement 29% pour le premier et 39% pour le second. Le dispositif de Henchir Nâam qui a enregistré 16 % occupe une position intermédiaire, tandis que celui de Korbous avec ses 8% semble être le moins touché par la mortalité. Le même tableau permet de déduire que la mortalité survenue entre 1993 et 2000 représente plus de la moitié de la mortalité totale enregistrée sur les 36 ans d'âge et ceci pour l'ensemble des quatre sites. En effet, cette importante mortalité, due probablement à la vague de sécheresse qui a touché le pays durant cette période, représente 53%, 76%, 52% et 59% de la mortalité totale respectivement pour Abderrahman, Korbous, Nâam et Souiniet. D'autre part, il est à signaler que la mortalité

Tableau IV - Evolution par site de la mortalité en % dans le temps

Année	Abderrahman	Korbous	Nâam	Souiniet
1967	0	1	-	2
1970	-	1	3	-
1971	1	-	-	-
1975	-	1	3	2
1990	-	2	-	-
1991	-	-	-	8
1993	19	2	8	12
2000	39	8	16	29

Tableau V - Liste des provenances dont le taux de mortalité a atteint ou a dépassé 50% en 2000 et leur répartition par site expérimental.

Provenance	Abderrahman	Korbous	Nâam	Souiniet
AA	58	-	-	50
AB	58	-	-	-
AD	50	-	-	-
AE	53	-	-	-
AI	-	-	-	59
AK	50	61	61	-
AM	-	-	-	50
J	60	-	-	73
K	60	-	-	-
L	-	-	-	50
M	55	-	-	-
O	58	-	-	59
P	53	-	-	-
TV	58	-	-	-
W	63	-	-	-
Z	-	-	-	55

enregistrée dans les différents dispositifs a touché inégalement les différentes provenances testées. Le tableau V qui représente les provenances dont le taux de mortalité totale enregistrée jusqu'à 2000 a atteint ou a dépassé 50% de l'effectif de départ et leur répartition par site montre que ces dernières sont également plus fréquentes dans les deux dispositifs les plus touchés par la mortalité. En effet, dans les deux dispositifs de Korbous et de Nâam, seule une provenance a enregistré un taux de mortalité globale supérieur à 50% (AK avec 61%). Par contre, on trouve dans les deux dispositifs de Abderrahman et de Souiniet, 12 provenances pour le premier et 7 provenances pour le deuxième ayant des taux de mortalité qui dépassent 50% de l'effectif total par provenance. Il est à rappeler ici que sur les 16 provenances présentées dans le tableau V, seules les deux provenances AM et TV ne sont pas communes aux quatre dispositifs. En effet, la provenance AM ne se trouve pas à Korbous et la provenance TV se trouve uniquement à Abderrahman. De même, à part les deux provenances AK d'origine italienne et AM d'origine israélienne, toutes les autres provenances qui figurent dans ce tableau sont d'origine tunisienne.

Corrélation entre résidus voisins et incidence du terrain sur les caractères mesurés:

Le tableau VI présente pour chaque site, l'évolution dans le temps de la corrélation entre les résidus voisins et l'incidence du terrain sur les différents caractères mesurés.

En ignorant le dispositif de Nâam qui semble avoir un comportement particulier, le tableau VI et la figure 3 montrent que les valeurs relatives à la corrélation entre résidus voisins déterminées à partir des mesures successives de la hauteur totale des arbres sont croissantes dans le temps. Toutefois, vers l'âge de 29 ans (H93), la corrélation entre résidus voisins semble être stationnaire

pour l'ensemble des sites. Ces résultats montrent donc que l'effet de l'hétérogénéité du terrain sur la croissance en hauteur des arbres s'accroît avec le temps jusqu'à un certain âge avant de se stabiliser. En ce qui concerne le diamètre, contrairement à la hauteur, ces mêmes corrélations sont décroissantes dans le temps. Cette réduction des corrélations entre proches voisins ne peut être liée qu'à l'apparition de la compétition entre arbres qui s'exprime par une corrélation négative entre proches voisins et se superpose à la corrélation positive due au gradient du terrain. Malheureusement, vu le nombre réduit des mesures effectuées sur le diamètre et l'espacement entre les deux premières mesures, il n'était pas possible de déterminer l'âge exact où les arbres de ces dispositifs sont entrés en compétition. Les valeurs de la corrélation entre les résidus voisins déterminée à partir du diamètre pour les deux dernières mesures (1993 et 2000) montrent que la compétition entre arbres du point de vue croissance en diamètre a été beaucoup plus sévère pour les sites de Abderrahman et Nâam.

Tableau VI - Evolution par site de la corrélation entre résidus voisins et incidence du terrain sur les caractères mesurés.

		H67	H70	H71	H75	H90	H91	H93	H00	Cir75	D93	D00	Psur	Psoue	Forme
Abder.	ρ_v	0,39	-	0,59	-	-	-	0,62	0,65	-	0,14	0,15	-	-	0,13
	$\frac{\sigma_g}{\sigma_0}$	0,41	-	0,64	-	-	-	0,61	0,59	-	0,09	0,09	-	-	0,10
Korb.	ρ_v	0,50	0,51	-	0,57	0,63	-	0,64	0,64	0,45	0,32	0,23	0,20	0,22	0,22
	$\frac{\sigma_g}{\sigma_0}$	0,55	0,57	-	0,65	0,69	-	0,70	0,67	0,52	0,43	0,23	0,20	0,30	0,22
Nâam.	ρ_v	-	0,47	-	0,44	-	-	0,41	0,40	0,29	0,01	0,02	0,09	0,24	0,48
	$\frac{\sigma_g}{\sigma_0}$	-	0,59	-	0,56	-	-	0,49	0,42	0,36	0,02	0,03	0,08	0,27	0,58
Souin.	ρ_v	0,34	-	-	0,51	-	0,51	0,55	0,56	0,52	0,29	0,26	0,10	0,15	0,22
	$\frac{\sigma_g}{\sigma_0}$	0,31	-	-	0,54	-	0,49	0,51	0,46	0,54	0,22	0,25	0,07	0,14	0,15

ρ_v : corrélation entre résidus voisins. σ_g : écart type du gradient de terrain. σ_0 : écart type des observations brutes.

Contrairement au diamètre dont la croissance dépend de plusieurs facteurs tels que la fertilité du sol et la densité de plantation qui provoque une compétition entre les arbres au cours du temps, la hauteur semble dépendre uniquement de la fertilité du sol et n'est pas influencée par la compétition entre arbres puisque la corrélation entre résidus voisins est toujours croissante jusqu'à un certain âge avant de devenir stationnaire. Ce résultat confirme l'approche adoptée par les forestiers qui utilisent la hauteur dominante comme indice de fertilité. Des résultats similaires ont été obtenus par PICHOT (1993) dans un dispositif de comparaison de provenances de *Populus trichocarpa* dans le sud-ouest de la France.

La différence du comportement des deux paramètres de croissance vis-à-vis de la compétition explique pourquoi le modèle d'analyse spatiale utilisé pour ajuster les données à l'effet terrain était beaucoup plus efficace à réduire la variance résiduelle dans le cas de la hauteur que celui du diamètre (SGHAIER *et al.*). La réduction de la variance résiduelle issue d'une analyse de la

variance des données ajustées par rapport à celle des données brutes était également plus importante pour les mesures de la circonférence réalisées en 1975 que celles réalisées en 1993 et en 2000 sur le diamètre. Ces derniers résultats montrent que la compétition entre arbres n'était pas aussi sévère en 1975 (jeune âge) qu'en 1993 et en 2000 (âge adulte).

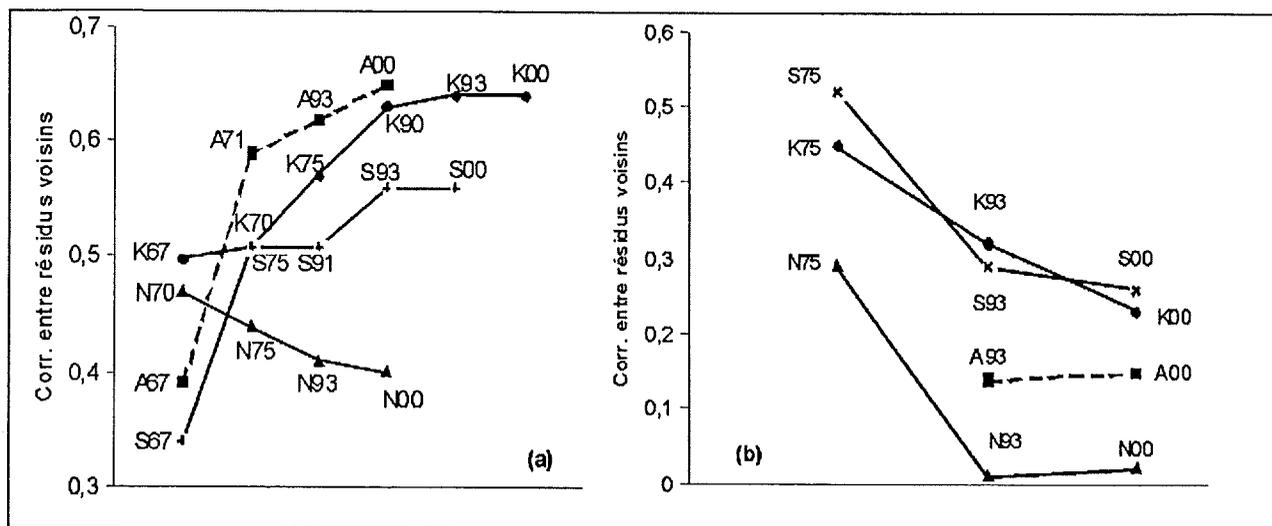


Fig. 3 - Evolution par site, de la corrélation entre résidus voisins dans le temps, pour la hauteur (a) et pour le diamètre (b). Le caractère dans les étiquettes représente le site expérimental (A : Abderrahman, K : Korbous, N : Nâam et S : Souiniet) et le nombre représente l'année de mesure.

Une autre lecture du tableau VI montre que la variabilité due aux effets de terrain $\frac{\sigma_s}{\sigma_0}$ diffère d'un caractère étudié à un autre. En effet, la part de variabilité totale due au terrain qui croît avec l'âge puis se stabilise pour la hauteur est au contraire en diminution pour le diamètre. En effet, la variabilité due au terrain déterminée en 2000 représente environ 40 à 70% de la variabilité totale pour la hauteur selon le site. La même variabilité ne représente que 3 à 25% de la variabilité totale pour le diamètre. L'incidence du terrain sur la densité du bois sur et sous écorce ainsi que sur la forme est plus ou moins variable d'un site à un autre avec respectivement des valeurs comprises entre 7 et 20%, entre 14 et 30% et entre 10 et 58 % de la variabilité totale.

Corrélation entre caractères mesurés et entre gradients du terrain

Les tableaux VII à X présentent par site, d'une part les corrélations calculées entre les valeurs observées des différents caractères mesurés (matrice triangulaire supérieure) et, d'autre part les corrélations calculées entre les gradients du terrain estimés pour les mêmes caractères (matrice triangulaire inférieure).

On constate d'après ces tableaux que, pour chacun des deux caractères de croissance mesurés à différentes dates, les corrélations sont d'autant plus réduites que les observations sont plus éloignées les unes des autres dans le temps et tant pour les données observées que pour le gradient du terrain estimé à chaque mesure. Des corrélations négatives ont été observées entre les deux caractères de croissance et ceux relatifs à la densité du bois. Cette opposition entre les caractères de croissance et ceux relatifs à la densité du bois signifie que les zones les plus fertiles, représentées par les arbres les plus vigoureux, sont celles qui produisent le bois le moins dense et vice-versa.

L'évolution de la corrélation entre le gradient du terrain estimé pour la dernière mesure et ceux estimés pour les différentes autres mesures d'un même caractère démontre le déplacement des zones de fertilité dans le temps. Toutefois, nous constatons que la corrélation entre les gradients de terrains devient très importante pour les deux dernières mesures de la hauteur et du diamètre (1993 et 2000). Ces derniers résultats prouvent que les zones de fertilité sur le terrain sont variables au cours de la vie d'un peuplement et ne se stabilisent qu'à un certain âge. Les zones les plus fertiles au jeune âge ne le sont plus à un âge avancé. A titre d'illustration, la figure 4 schématise pour le site de Korbous la relation entre le gradient du terrain estimé à partir de la mesure de la hauteur en 1993

Tableau VII - Corrélations entre caractères et corrélations entre gradients de terrain pour le site de Korbous.

	H67	H70	H75	H90	H93	H00	Cir75	d93	d00	Psure	Psoue	Forme
H67		0,628	0,419	0,404	0,397	0,349	0,350	0,409	0,358	-0,271	-0,191	0,109
H70	0,728		0,664	0,523	0,502	0,469	0,560	0,481	0,446	-0,317	-0,221	0,215
H75	0,408	0,680		0,763	0,746	0,704	0,779	0,690	0,642	-0,438	-0,278	0,254
H90	0,343	0,478	0,775		0,986	0,963	0,649	0,831	0,797	-0,521	-0,271	0,259
H93	0,321	0,441	0,750	0,990		0,968	0,643	0,836	0,802	-0,534	-0,286	0,262
H00	0,280	0,399	0,703	0,960	0,963		0,600	0,820	0,805	-0,494	-0,219	0,247
Cir75	0,335	0,605	0,848	0,750	0,738	0,689		0,692	0,652	-0,452	-0,273	0,233
D93	0,399	0,483	0,701	0,852	0,878	0,836	0,750		0,963	-0,680	-0,358	0,198
D00	0,350	0,435	0,658	0,865	0,876	0,884	0,715	0,940		-0,677	-0,320	0,172
Psure	-0,313	-0,343	-0,405	-0,499	-0,518	-0,467	-0,459	-0,635	-0,617		0,622	-0,118
Psoue	-0,321	-0,337	-0,311	-0,212	-0,225	-0,154	-0,314	-0,324	-0,258	0,635		-0,124
Forme	0,340	0,450	0,409	0,429	0,421	0,400	0,340	0,316	0,322	-0,183	-0,118	

Matrice triangulaire supérieure : corrélations calculées sur données observées.

Matrice triangulaire inférieure : corrélations calculées sur gradients de terrain estimés.

Tableau VIII - Corrélations entre caractères et corrélations entre gradients de terrain pour le site de Souiniet.

	H67	H75	H91	H93	H00	Cir75	d93	d00	Psure	Psoue	Forme
H67		0,412	0,236	0,232	0,163	0,484	0,283	0,225	-0,300	0,133	0,014
H75	0,441		0,829	0,817	0,725	0,873	0,765	0,709	-0,513	-0,145	0,509
H91	0,099	0,798		0,984	0,908	0,748	0,854	0,808	-0,559	-0,160	0,651
H93	0,89	0,775	0,980		0,920	0,741	0,859	0,812	-0,543	-0,138	0,642
H00	0,64	0,735	0,901	0,919		0,643	0,800	0,800	-0,467	-0,057	0,597
cir75	0,527	0,916	0,688	0,662	0,623		0,780	0,739	-0,597	-0,193	0,410
D93	0,245	0,790	0,843	0,855	0,820	0,744		0,917	-0,683	-0,228	0,535
D00	0,219	0,746	0,743	0,762	0,844	0,709	0,856		-0,652	-0,177	0,505
Psure	-0,264	0,316	-0,230	-0,223	-0,234	-0,389	-0,473	-0,445		0,434	-0,337
Psoue	-0,008	-0,035	-0,030	-0,010	0,063	-0,061	-0,100	-0,019	0,169		-0,049
Formee	-0,112	-0,491	-0,697	0,683	0,596	0,358	0,482	0,419	0,0009	0,075	

Tableau IX - Corrélations entre caractères et corrélations entre gradients de terrain pour le site de Nâam.

	H70	H75	H93	H00	Cir75	d93	d00	Psure	Psoue	Forme
H75		0,841	0,505	0,450	0,775	0,559	0,502	-0,320	-0,201	-0,067
H93	0,857		0,651	0,588	0,835	0,640	0,592	-0,394	-0,246	0,040
H93	0,278	0,489		0,916	0,603	0,799	0,797	-0,515	-0,318	0,266
H00	0,196	0,400	0,929		0,546	0,759	0,776	-0,474	-0,298	0,261
Cir75	0,768	0,855	0,395	0,319		0,728	0,663	-0,507	-0,328	0,019
D93	0,059	0,106	0,135	0,174	0,138		0,920	-0,671	-0,410	0,076
D00	0,047	0,122	0,314	0,360	0,134	0,787		-0,654	-0,402	0,057
Psure	0,019	-0,112	-0,313	-0,301	-0,283	-0,257	0,294		0,595	-0,087
Psoue	0,011	-0,062	-0,180	-0,157	-0,182	-0,026	-0,042	0,639		-0,089
Forme	-0,155	0,005	0,452	0,479	0,045	0,057	0,128	-0,360	-0,240	

Tableau X - Corrélations entre caractères et corrélation entre gradients de terrain pour le site de Abderrahman.

	H67	H71	H93	H00	d93	d00	Forme
H67		0,600	0,450	0,393	0,423	0,374	0,031
H71	0,711		0,620	0,570	0,555	0,499	0,170
H93	0,542	0,681		0,929	0,773	0,739	0,247
H00	0,444	0,605	0,921		0,776	0,785	0,224
D93	0,479	0,611	0,787	0,763		0,950	0,195
D00	0,339	0,474	0,725	0,187	0,806		0,165
Forme	0,112	0,162	0,189	0,157	0,199	0,161	

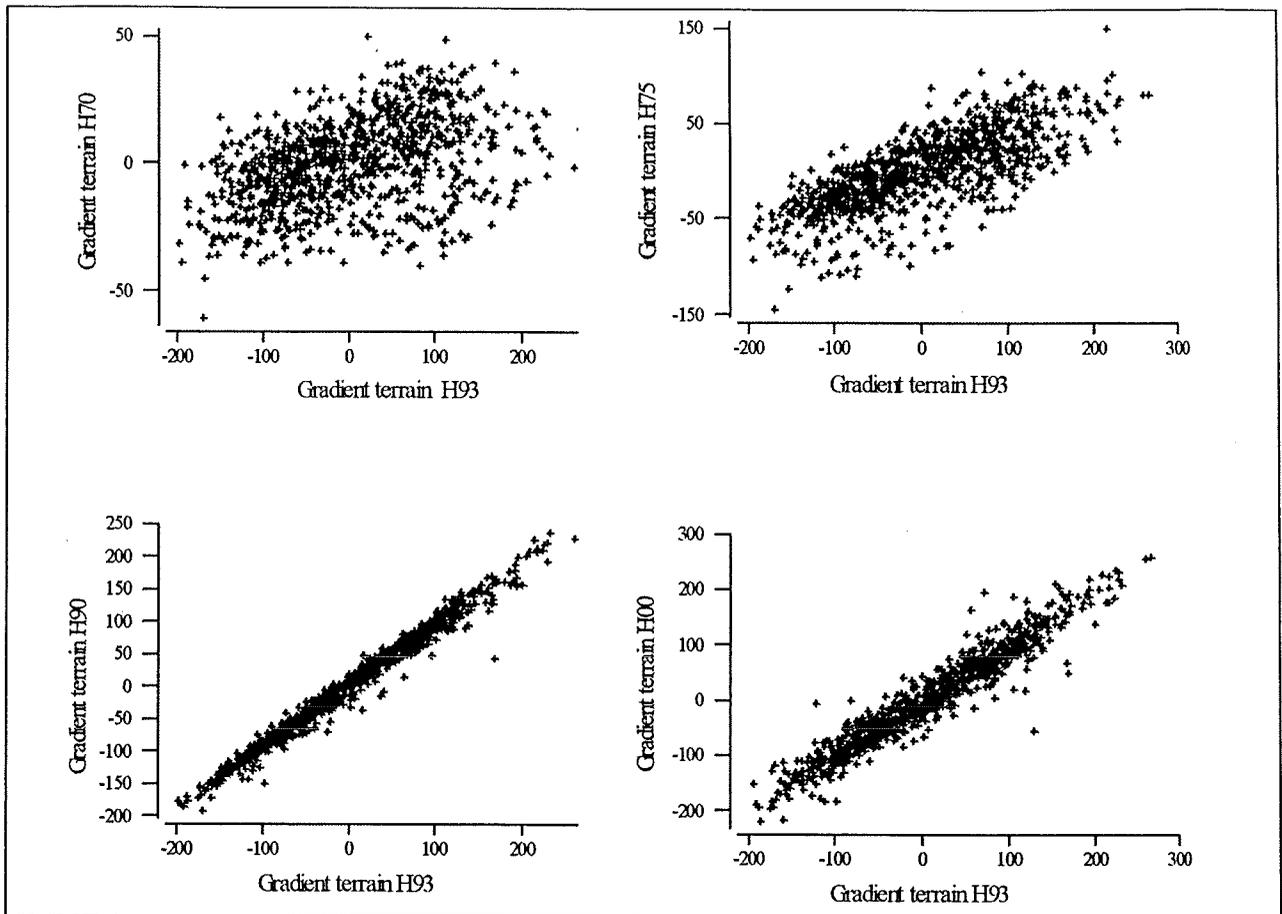


Fig. 4 - Corrélation entre gradient du terrain estimé à partir de H93 et les gradients estimés à partir de H70, H75, H90 et H00 pour le site de Korbous

(à 29 ans d'âge les arbres des différents sites sont bien installés, moins de mortalité qu'en 2000) et les gradients estimés à partir des autres mesures relatives à la hauteur. Cette figure montre l'évolution de la linéarité de la relation entre le gradient de terrain estimé à partir de H93 et ceux des autres mesures du même paramètre.

Fertilité locale du terrain et taux de mortalité des arbres

Dans le but de voir l'effet de la fertilité locale du sol sur le taux global de survie, l'ensemble des parcelles du dispositif de chaque site a été subdivisé en trois classes de mêmes effectifs, qualifiées de bonne fertilité, de fertilité moyenne et de faible fertilité. Cette subdivision est basée sur les valeurs du terrain estimées à partir de la hauteur 1993 à l'aide du modèle d'analyse spatiale utilisé. Ces dernières ont été classées par ordre décroissant et regroupées en trois classes de manière à obtenir 33% de données dans chaque intervalle. La hauteur mesurée en 1993 a été choisie pour déterminer le gradient du terrain du fait que la fertilité locale semble devenir stable à cet âge et que la mortalité enregistrée jusqu'à cette date est beaucoup moins importante que celle enregistrée en 2000 et ceci pour l'ensemble des quatre sites expérimentaux. A titre d'illustration, la figure 5 présente la répartition de ces trois classes de fertilité sur le plan du dispositif de Korbous (les grands carreaux représentent les blocs du dispositif). Cette figure montre qu'il y a des plages de fertilité sur le terrain et que le passage d'un niveau à un autre se fait d'une façon progressive, c'est-à-dire de la faible à la moyenne puis à la bonne fertilité et inversement. Les cases blanches avec les codes des provenances représentent les arbres morts.

Le tableau XI représente par site l'évolution des valeurs moyennes des caractéristiques mesurées ainsi que les taux de la mortalité enregistrée entre 1993 et 2000 en fonction des trois classes de fertilité déterminées à partir du gradient du terrain estimé à partir de la hauteur mesurée

Tableau XI - Evolution pour chaque site des valeurs moyennes des caractéristiques mesurées et des taux de mortalité enregistrée entre 1993 et 2000 en fonction des trois classes de fertilité déterminées à partir de H93.

Site expérimental	Caractéristique mesurée	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Abderrahman	Effectif	380	381	380
	H93 (cm)	807,17	688,79	567,17
	D93 (cm)	10,77	8,89	7,51
	Forme	1,82	1,77	1,75
	Mortalité %	18	32	25
Korbous	Effectif	324	323	323
	H93 (cm)	593,15	469,50	358,76
	D93 (cm)	10,53	8,36	6,05
	Psure	24,63	25,32	26,04
	Psoue	28,08	28,19	28,55
	Forme	2,02	1,90	1,84
Nâam	Mortalité %	3	6	11
	Effectif	764	764	765
	H93 (cm)	751,77	667,67	574,51
	D93 (cm)	11,64	10,53	8,86
	Psure	24,51	25,04	25,90
	Psoue	28,30	28,46	28,72
Souiniet	Forme	2,07	1,92	1,85
	Mortalité %	6	9	11
	Effectif	258	259	259
	H93 (cm)	764,79	561,14	409,31
	D93 (cm)	13,99	10,46	7,37
	Psure	17,80	19,32	19,83
	Psoue	28,00	27,76	28,08
	Forme	1,99	1,76	1,55
	Mortalité %	14	22	24

en 1993. Ce tableau montre que les valeurs moyennes de hauteur, du diamètre et de forme diminuent avec la baisse de fertilité et augmentent au contraire pour la densité sur et sous écorce et ceci pour l'ensemble des quatre sites. Les zones les plus fertiles à croissance plus rapide produisent donc le bois le moins dense surtout en ce qui concerne la densité mesurée sur écorce. Il ressort également du même tableau que les zones les moins fertiles sont celles les plus touchées par la mortalité survenue durant la période 1993 - 2000. Ce dernier résultat prouve donc que les arbres les plus chétifs, situés dans les zones les moins fertiles, sont ceux les plus touchés par la mortalité.

D'un autre côté, nous avons vu auparavant que les différentes provenances testées ont été inégalement touchées par la mortalité et que la grande partie de cette mortalité est survenue après 1993 (tableaux IV et V). Les provenances qui ont enregistré les taux de mortalité les plus élevés vont voir leur moyenne grimper par comparaison à celles des autres provenances moins touchées par la mortalité, puisque ce sont les arbres chétifs localisés sur les parties les moins fertiles du dispositif qui ont disparu. Ce dernier résultat est d'un grand intérêt pratique dans le cas d'étude comparative des provenances. En effet, pour des mesures successives, les provenances les moins adaptées vont **gagner des places dans le classement général d'une mesure à une autre**. Ce gain dans le classement des provenances plus touchées par la mortalité par rapport aux autres provenances n'est pas dû aux accroissements plus importants mais à cause de la disparition d'une grande proportion des individus chétifs caractérisés par des faibles valeurs de la variable mesurée. Afin de contourner ce problème qui a un effet direct sur les résultats, il faut par exemple éliminer de l'analyse toutes les provenances dont le taux de mortalité, à un âge avancé, dépasse un certain pourcentage ou bien utiliser le taux de mortalité comme une covariable dans l'analyse définitive des résultats.

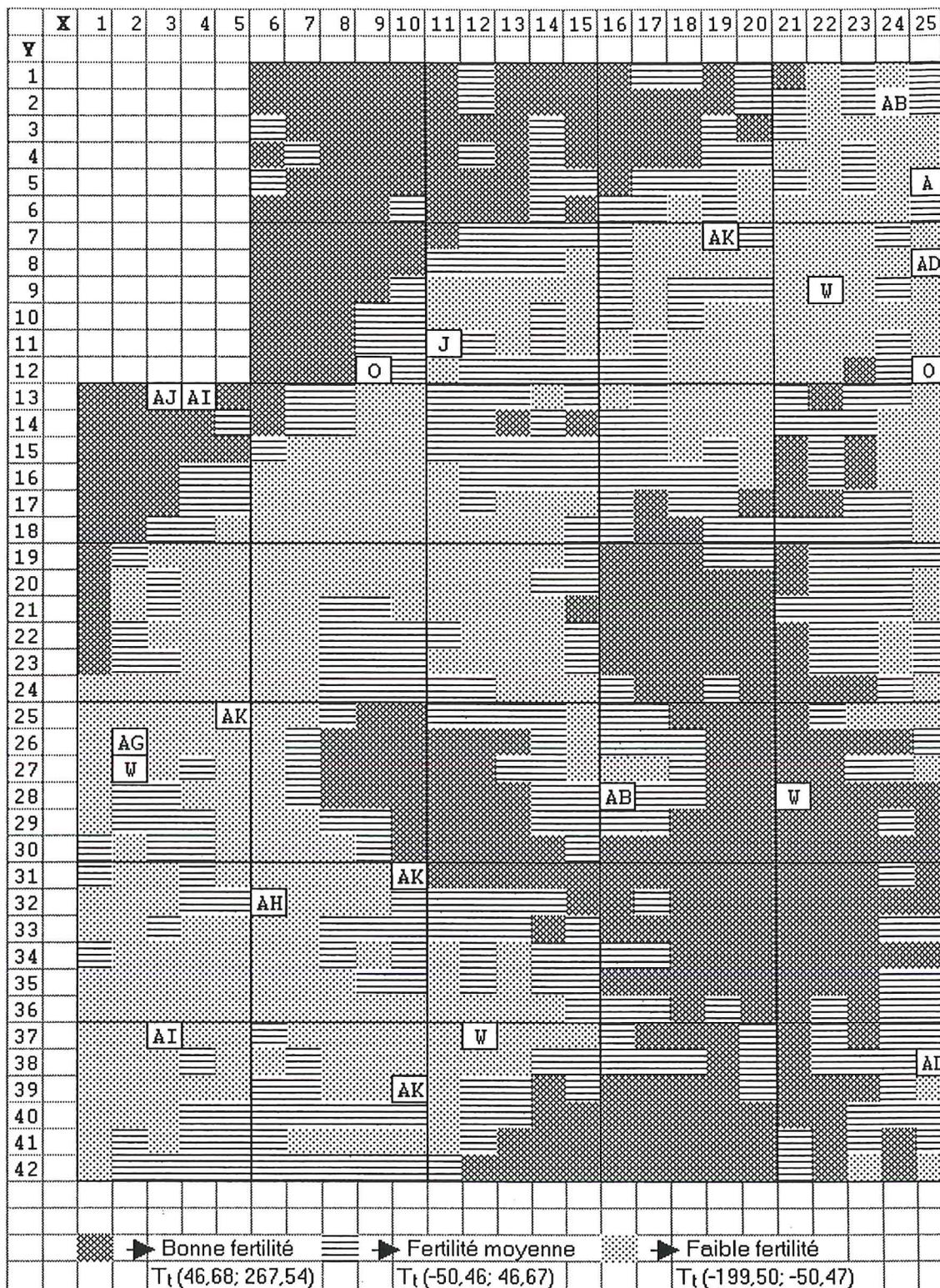


Fig. 5 - Cartographie de la fertilité du terrain du dispositif de Korbous estimée à l'aide du modèle des plus proches voisins et d'une répartition des parcelles de l'essai en trois classes de fertilité.

Evolution de la hauteur moyenne en fonction de l'âge et caractéristiques de croissance

Afin de décrire la cinétique de la croissance en hauteur, nous avons ajusté sur les données collectées aux différentes mesures un modèle de croissance qui décrit l'évolution de la hauteur en fonction de l'âge par site. Après élimination dans chaque site de toutes les provenances dont le taux de mortalité a atteint ou a dépassé 50% en 2000 (tableau V), le modèle de Gauss modifié a été ajusté aux différents couples de données individuelles (hauteur corrigée à l'effet terrain - âge), corres-

pondant aux hauteurs des différentes mesures réalisées depuis la plantation jusqu'à l'âge de 36 ans. Le tableau XII présente par site l'évolution en fonction de l'âge de la moyenne des hauteurs ajustées à l'effet terrain.

Le tableau XIII présente les valeurs des paramètres estimés, le coefficient de détermination et l'écart type résiduel (ETR) relatifs à ce modèle ainsi que les différentes caractéristiques de la croissance pour chacun des quatre sites.

Tableau XII - Evolution par site de la hauteur moyenne en fonction de l'âge.

Année de mesure	Age (années)	Hauteur moyenne (cm)			
		Abderrahman	Korbous	Nâam	Souiniet
1967	3	81,28	69,23	-	79,59
1970	6	-	132,86	288,72	-
1971	7	221,41	-	-	-
1975	11	-	237,65	423,54	255,30
1990	26	-	450,61	-	-
1991	27	-	-	-	557,40
1993	29	714,90	472,04	666,82	601,22
2000	36	831,44	513,35	709,17	686,58

Tableau XIII - Paramètres estimés, coefficient de détermination et écart type résiduel du modèle ajusté et caractéristiques de croissance pour chaque site.

Site expérimental	Paramètres du modèle			précision		Vitesse de croissance (cm/an)		Coordonné vitesse maximale		Temps de croissance
	M	a	b	R ²	ETR	Max.	Moy.	x (an)	y (cm.)	(an)
Abderrahman	916,24	-7,08	28,65	0,959	64,290	27,42	20,04	13,18	361,00	45,72
Korbous	519,60	-5,81	21,96	0,906	55,917	20,29	14,83	9,72	204,72	35,04
Nâam	715,79	-11,18	23,69	0,873	65,910	25,91	18,93	5,57	282,02	37,80
Souiniet	778,95	-7,79	30,16	0,774	124,514	22,15	16,18	13,84	306,91	48,13

La figure 6 représente deux graphiques: le premier correspond à la projection des hauteurs moyennes corrigées à l'effet terrain, déterminées aux différentes mesures (tableau XII), et les courbes de croissance ajustées sur les hauteurs individuelles à partir desquelles ont été calculées ces hauteurs moyennes par site, le deuxième représente les courbes relatives à l'évolution en fonction de l'âge de l'accroissement courant annuel (AAC) ou de la vitesse absolue de croissance en hauteur. Il s'agit des courbes qui décrivent, par site, l'évolution de la hauteur moyenne en fonction de l'âge toutes provenances confondues.

Nous constatons d'après le tableau XIII et la figure 6 que la cinétique et les caractéristiques de la croissance moyenne sont différentes d'un site à un autre. En effet, les asymptotes horizontales, correspondant aux valeurs maximales vers lesquelles tend la hauteur moyenne et qui peuvent être définies comme le potentiel final de production de chaque site varient de 5,20 m pour Korbous à 9,16 m pour Abderrahman en passant par 7,16 m pour Nâam et 7,79 m pour Souiniet. La vitesse maximale de croissance a varié de 20,29 cm/an pour Korbous à 27,42 cm/an pour Abderrahman avec des vitesses moyennes de 14,83 cm/an pour le premier et de 20,04 cm/an pour le deuxième. L'âge où la vitesse maximale de croissance est atteinte a été estimé à 6 ans pour Nâam, à 10 ans pour Korbous, à 13 ans pour Abderrahman et à 14 ans pour Souiniet. Finalement, le temps sur lequel s'étend la croissance en hauteur moyenne pour atteindre environ 93,4% de sa valeur maximale attendue a également été estimé à 35 ans pour Korbous, à 38 ans pour Nâam, à 46 ans pour Abderrahman et à 48 ans pour Souiniet. Ce temps de croissance qui semble être lié à la pluviométrie annuelle (paragraphe 2.2) peut correspondre à l'âge d'exploitabilité du pin d'Alep

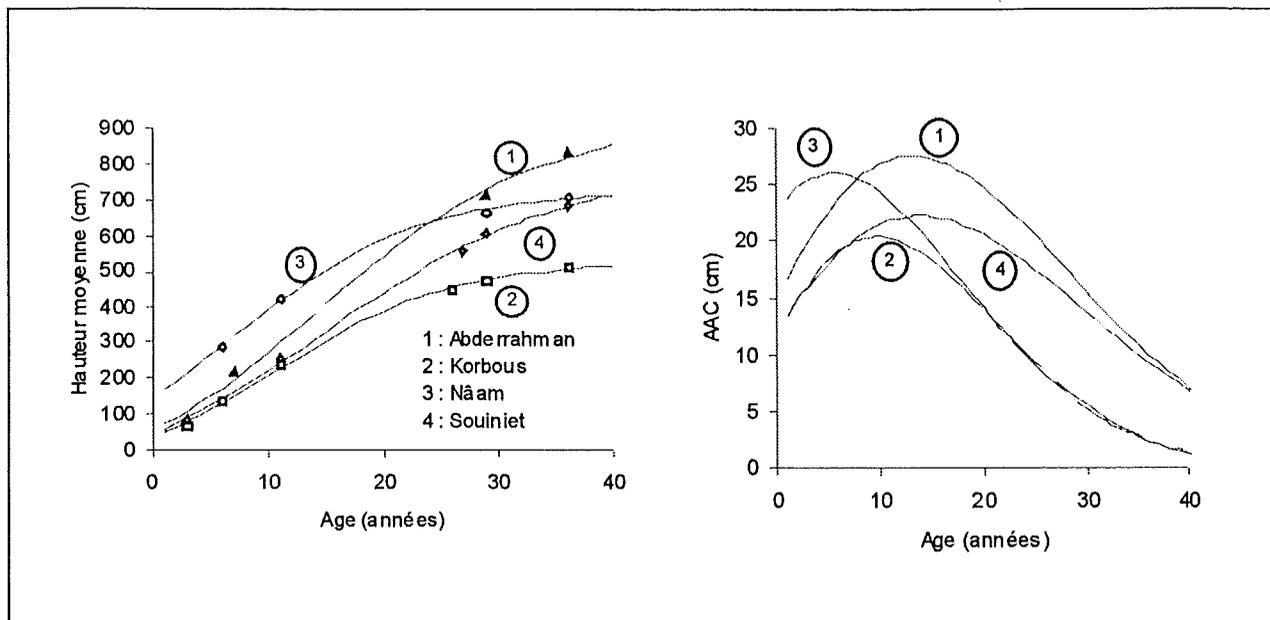


Fig. 6 - Evolution de la hauteur moyenne par site en fonction de l'âge et vitesse de croissance absolue ou accroissement courant annuel (AAC).

dans chacune des quatre régions concernées par l'étude. Il faut signaler à ce niveau que la variabilité ou l'imprécision qui caractérise le modèle ajusté, mesurée par l'écart type résiduel (ETR), est environ deux fois plus importante à Souiniet que dans les trois autres sites.

En se basant sur les valeurs présentées ci-dessus et les courbes des deux graphiques de la figure 6, on peut répartir les 4 sites étudiés en deux groupes. On trouve d'une part les sites de Korbous et de Nâam et, d'autre part les deux autres sites de Abderrahman et de Souiniet. Ces deux groupes diffèrent principalement par la période sur laquelle s'étale la croissance qui est plus importante pour Abderrahman et Souiniet. Le site de Nâam se distingue par le temps mis depuis la plantation pour atteindre le maximum de croissance, caractérisé par le point d'inflexion et qui correspond à environ 6 ans. Il faut rappeler que le dispositif expérimental de ce site a été installé sur un terrain agricole, ce qui peut expliquer cette accélération de la croissance par rapport aux autres sites dont les dispositifs sont installés sur des terrains forestiers.

D'autre part, le même graphique 4 montre que les différentes mesures de la hauteur effectuées dans les quatre sites peuvent être divisées en deux groupes. Les mesures effectuées au jeune âge, réalisées depuis la plantation jusqu'à l'âge de 11 ans (1975) et les mesures effectuées à l'âge adulte (26 à 36 ans), réalisées de 1990 jusqu'à 2000. Les mesures du premier groupe sont situées sur la partie la plus accentuée des courbes de croissance correspondant à la phase de croissance intense, tandis que celles du deuxième groupe sont situées sur la partie la plus couchée des mêmes courbes correspondant à la phase de ralentissement de la croissance.

Afin d'étudier le comportement des provenances par site du point de vue classement durant ces deux phases de croissance, les provenances ont été classées, dans chaque site et pour chaque mesure, par ordre décroissant en fonction des moyennes annuelles ajustées à l'effet terrain. Le coefficient de concordance de Kendall W a été calculé par la suite pour chaque site et pour chaque phase de croissance.

Etant donné le nombre élevé des provenances dont les tables de valeurs critiques relatifs au test du coefficient de concordance de Kendall W ne couvrent pas, les valeurs de ce coefficient ont été transformées en valeurs χ^2 d'indépendance. Le tableau XIV présente pour chaque site les résultats relatifs à ce test sur les mesures de la hauteur réalisées au jeune âge et à l'âge adulte. Le chiffre entre parenthèse représente le nombre d'années de mesures.

Tableau XIV - Test de concordance de KENDALL effectué par site sur les rangs occupés par les provenances aux différentes années de mesures.

Site expérimental	Hauteur ajustée	
	1967 -1975	1990-2000
Abderrahman	31,37 ^{NS} (2)	42,55 ^{**} (2)
Korbous	70,90 ^{***} (3)	83,16 ^{***} (3)
Nâam	72,58 ^{***} (2)	75,24 ^{***} (2)
Souinie	41,15 ^{NS} (2)	91,97 ^{***} (3)

** : test significatif à 1%, *** : test significatif à 1⁰/∞

NS : test non significatif

Le tableau XIV montre que le test de concordance réalisé sur les mesures effectuées au jeune âge (1967-1975) s'avère non significatif dans deux des quatre sites, à savoir Abderrahman et Souiniet. L'acceptation de l'hypothèse nulle signifie que le changement des rangs d'une année à une autre durant cette première période de croissance est significatif. Tous les tests relatifs aux mesures réalisées à l'âge adulte (1990-2000) sont hautement à très hautement significatifs, ce qui signifie que les changements des rangs occupés par les provenances d'une année à une autre ne peuvent pas être considérés comme significatifs.

CONCLUSIONS

Sur l'ensemble des caractères étudiés, la hauteur totale des arbres s'est montrée le paramètre le plus influencé par l'hétérogénéité locale du terrain. Pour ce paramètre, l'incidence de l'hétérogénéité non contrôlée par le modèle d'analyse adopté sur la précision des résultats s'accroît avec l'âge des plantations. En ce qui concerne le diamètre où des mesures répétées ont également été effectuées, contrairement à la hauteur, l'efficacité du modèle d'analyse spatiale utilisé pour le contrôle local de l'hétérogénéité du terrain diminue avec l'âge des arbres. Pour ce paramètre, la réduction de l'efficacité du modèle utilisé est due à la compétition entre les arbres qui s'installe à partir d'un certain âge et qui s'accroît dans le temps. Ce résultat permet de conclure que le modèle utilisé, bien qu'il semble bien maîtriser le contrôle de l'hétérogénéité spatiale pour les différentes mesures de la hauteur et également pour la première mesure du diamètre effectuée au jeune âge des dispositifs, devient peu efficace pour ce second paramètre dès l'apparition de la compétition entre les arbres. Dès lors, le recours dans ce cas à un modèle qui tient compte à la fois de l'hétérogénéité spatiale et de la compétition entre les arbres s'avère nécessaire. Une telle technique a été utilisée notamment par CORRELL et ANDERSON, (1983).

La mobilité des zones de fertilité dans le temps qui est mesurée par l'évolution de la corrélation entre les gradients du terrain, estimés à partir des mesures successives de la hauteur, montre l'existence d'une hétérogénéité en profondeur. Cette hétérogénéité de profondeur, non visible au moment de la mise en place des essais et dont l'effet se manifeste de plus en plus avec l'âge des plantations, ne sera jamais contrôlée par le modèle de départ qui est conçu sur la base de l'hétérogénéité superficielle du terrain. D'où l'utilité de l'utilisation d'un modèle d'analyse spatiale pour contrôler localement cette hétérogénéité non visible surtout pour des essais de longue durée. D'un autre côté, il est apparu que les zones les moins fertiles sont celles les plus touchées par la mortalité. L'étude de la relation entre la mortalité et la fertilité locale du terrain pourrait être approfondie en utilisant par exemple un modèle statistique probabiliste de mortalité intégrant les différents facteurs, dont la fertilité locale du terrain.

La corrélation négative observée entre les paramètres de croissance et ceux relatifs à la densité du bois mesurée sur et sous écorce montre qu'il est difficile d'opérer en une seule étape la sélection des provenances ayant les meilleures performances pour les deux types de paramètres à

la fois. Il faut procéder dans ce cas à une sélection par étapes.

Enfin, en plus de la caractérisation de la croissance de l'espèce dans les différents sites expérimentaux, la modélisation de la croissance en hauteur a permis de localiser les différentes mesures effectuées sur la courbe de croissance et de les répartir en deux phases selon l'âge durant lequel ces mesures ont été réalisées. Une première phase de croissance intense, variable selon le site et qui s'étale de 3 ans à environ une quinzaine d'années d'âge, et une deuxième phase où la croissance perd de son intensité d'une façon progressive. L'étude du comportement des provenances par phase de croissance et par site expérimental du point de vue classement a révélé la stabilité des rangs occupés par les provenances durant la deuxième phase de croissance. Au vu de ces résultats, la mesure qui doit être retenue pour la comparaison définitive des provenances afin de sélectionner les meilleures d'entre elles, doit évidemment être choisie parmi celles effectuées durant la phase finale de croissance où l'accroissement annuel courant devient très faible et le classement des provenances ne change plus ou change peu d'une année de mesures à une autre. Toutefois, parmi les mesures réalisées à partir de 1990 et qui représentent le début de la phase finale de croissance, seules les deux dernières (1993 et 2000) ont concerné la hauteur et le diamètre en même temps et ont été réalisées dans les quatre sites à la fois. Etant donné la forte mortalité survenue après 1993 et qui a touché plus particulièrement les deux sites de Abderrahman et de Souiniet et à un degré moindre ceux de Korbous et Nâam, c'est la mesure réalisée en 1993 sur la hauteur et sur le diamètre qui devra être retenue pour la comparaison intra et inter-sites des provenances avec l'élimination des provenances qui ont enregistré des taux élevés de mortalité en 2000.

BIBLIOGRAPHIE

- AASVEIT A.H., 1982. Random variation and correlation in agricultural field trials. *Biom. Praxim.* 22: 91-114.
- CORREL R.L. & ANDERSON R.B., 1983. Removal of Intervarietal Competition Effects in Forestry Varietal Trials. *Silvae Genetica*, 32: 162-165.
- DANIEL W.W., 1978. Applied Non parametric statistics. Georgia State University, 503 p.
- DEBOUCHE C., 1979. Présentation coordonnée de différents modèles de croissance. *Revue de Statistique Appliquée*, Vol. XXVII, 4 : 5-22.
- GOUMARI A., 1990. Analyse comparative des résultats d'essais en champ selon les techniques des blocs aléatoires complets, des lattices et des plus proches voisins. *Biom.Praxim.* 30 : 91-105
- GOUMARI & CLAUSTRIAUX J.J., 1990. Etude comparative de modèles des plus proches voisins ajustés à des essais à blanc. *Biom.Praxim.* 30 : 49-64
- KHOUJA M.L., 1997. Variabilité géographique du pin d'Alep en Tunisie. Perspective d'amélioration de la productivité et de la qualité physique du bois. Thèse de doctorat en Sciences agronomiques. Université catholique de Louvain. Faculté des Sciences agronomiques. Unité des Eaux et Forêt, 181 p.
- PALM R., 1989. Construction de tables de production à partir de placettes temporaires : présentation d'une méthode. *Ann. Sci. For.* 46: 387-396.
- PALM R & CHENTOUF J., 1986. Ajustement de faisceaux de courbes : application au cas de hauteurs d'arbres. *Notes Stat. Inform. Gembloux*, 2 : 14 p.
- PICHOT C., 1993. Variabilité au stade adulte chez *Populus trichocarpa* Torr. & Gray et prédiction juvénile - adulte chez *P. trichocarpa* et *P. deltoides* Bartr. Thèse de doctorat de l'Institut National agronomique Paris-grignon, 235 p. + annexes.
- SGHAIER T., CLAUSTRIAUX J.J. & BEJI M.L.. Intérêt des modèles des plus proches voisins pour le contrôle de l'hétérogénéité spatiale : application à un essai de provenances de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. (en cours de publication).
- SGHAIER T. & AKRIMI N., 2004. Etude comparative des provenances de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie par la méthode des plus proches voisins. (à paraître dans le Vol. 18 n°2 de la Revue de l'INAT)
- SGHAIER 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.
- SGHAIER T., AMMARI Y., GARCHI S. & KHALDI A., 2001. Croissance en hauteur dominante et classes de fertilité du pin d'Alep. *Les annales de l'INRREF*, numéro spécial, 45-53.
- WHITTLE P., 1954. Stationary processes in the palne. *Biometrika* 41: 434-449

