

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen

Faculté des sciences de la nature et de la vie, des sciences de la terre et de l'univers  
Département des sciences agronomiques et forestières



## Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Foresterie  
Option : Gestion et Conservation des Ecosystèmes

Présenté par

**RABHI Khellaf**

Thème

**Ajustement de modèles hauteur – circonférence – âge pour le  
chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans la forêt d'Akfadou  
(Tizi ousou); effet de la densité et de la station.**

Soutenu le / / 2011

Devant le jury :

Président :	M. LETREUCH-BELAROUCI N.	Professeur (U.A.B.B.Tlemcen).
Examineur	M. BOUHRAOUA R.T.	Professeur (U.A.B.B.Tlemcen).
Examineur	M. BENABDELI K.	Professeur (Université de Mascara).
Promoteur	M. MESSAOUDENE M.	Directeur de recherche (I.N.R.F. Tizi ousou).

A la mémoire de ma mère

A la mémoire de mon frère

A mon père

A mes sœurs Saâdia, Ouerdia et Hayet

A Ghanem, Mahmoud et Mohand Arezki

A tous mes ami(e)s

## Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon promoteur, Monsieur M. Messaoudène, directeur de recherche à l'INRF, qui a aimablement accepté de diriger ce travail, je le remercie très vivement pour les connaissances que j'ai acquises tout au long de ce temps passé avec lui. Avec gentillesse, il m'a permis de puiser de son expérience, de sa compétence et de ses connaissances très variées, Pour ses conseils judicieux, sa disponibilité et sa bonté, j'en serai que reconnaissant.

Je remercie monsieur N. Letreuch-Belarouci, professeur à l'université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen) pour l'honneur qu'il me fait d'avoir accepté de présider le jury. J'adresse également mes remerciements à monsieur R. Bouhraoua professeur à l'université de Tlemcen et à monsieur K. Benabdeli, professeur à l'université de Mascara, qui m'honorent d'examiner ce travail.

J'adresse aussi mes remerciements à tous les enseignants et le personnel de la faculté des sciences de l'université de Tlemcen ainsi que mes camarades de la promotion "gestion et conservation des écosystèmes" et des autres options qui, de près ou de loin m'ont aidé pour mettre à terme ce travail. Sans oublier Mm. Boukli-Hacen, bibliothécaire à la faculté qui m'a aidé au cours de la recherche bibliographique.

Je suis aussi reconnaissant envers les forestiers du district d'Akfadou (circonscription des forêts d'Azazga) qui ont mis à ma disposition le transport et m'ont aidé pendant le travail de terrain.

## Liste des abréviations

---

**Acp** : analyse en composantes principales.

**Anova** : analyse de la variance.

**ANRH** : agence nationale des ressources hydriques.

**C** : la circonférence

**D** : le diamètre.

**H** : la hauteur totale

**K-S**: test de Kolmogrov- Smirnov.

**MGAB** : Modèle globale,  $H = F(\text{âge})$  pour la région de basse altitude.

**MGAH** : Modèle globale,  $H = F(\text{âge})$  pour la région de basse altitude.

**MGCB** : Modèle globale,  $H = F(C)$  pour la région de basse altitude.

**MGCH** : Modèle globale,  $H = F(C)$  pour la région de haute altitude.

**MSC1** : Modèle stationnel,  $H = F(C)$  pour la station 1.

**MSC2** : Modèle stationnel,  $H = F(C)$  pour la station 2.

**MSC3** : Modèle stationnel,  $H = F(C)$  pour la station 3.

**MSC4** : Modèle stationnel,  $H = F(C)$  pour la station 4.

**MSC5** : Modèle stationnel,  $H = F(C)$  pour la station 5.

**MSC6** : Modèle stationnel,  $H = F(D)$  pour la station 6.

**St.** : Station.

## Liste des figures

---

Fig.1 : répartition de <i>Quercus canariensis</i> dans le bassin méditerranéen.....	6
Fig.2 : répartition de <i>Quercus canariensis</i> en Algérie.....	7
Fig.3 : planche des différents organes du chêne zéen.....	8
Fig.4 : représentation des tentatives d'intégration et de synthèse des connaissances au travers de la modélisation.....	20
Fig.5 : localisation des stations dans la forêt d'Akfadou.....	23
Fig.6 : Projection des postes météorologique sur le climagramme d'Emberger.....	24
Fig.7 : diagramme ombrothermique pour le point d'altitude (1221m) de la forêt d'Akfadou.....	25
Fig.8 : Schéma du principe de la modélisation en peuplements forestiers.....	31
Fig.9 : présentation graphique (Cir. (A) ; Diam. (B) ; Haut. (C)) pour les six stations.....	39
Fig.10 : projection des variables sur le plan factoriel retenu.....	40
Fig.11 : projection des stations sur le plan factoriel retenu.....	41
Fig.12 : tracé Normale des circonférences (intervalle de confiance 95%).....	44
Fig.13 : distribution par classes de diamètre des individus des stations.....	45
Fig.14 : représentations graphiques des ajustements.....	49
Fig.15 : description graphique des hauteurs estimées par chaque modèle.....	51
Fig.16 : ajustement des deux modèles globaux.....	52
Fig.17 : modèles hauteur – âge construit pour les deux régions.....	55
Fig.18 : histogrammes des résidus pour les modèles retenus.....	60
Fig.19 : tracée Normal (droite de Henry) des résidus des modèles.....	61
Fig.20 : tracée des résidus en fonction des valeurs prévus.....	62
Fig.21 : représentation des résidus en fonction de la densité.....	63
Fig.22 : comparaison des densités et des sommes des carrés des résidus.....	64
Fig.23 : représentation des résidus en fonction de l'âge.....	65

## Liste des tableaux

---

Tab.1 : Description des stations d'inventaire .....	28
Tab.2 : Paramètres et formules de statistique descriptive calculés.....	30
Tab.3 : Modèles repris de la littérature pour ajustement aux données de terrain.....	33
Tab.4 : Analyse descriptive de la circonférence, du diamètre et de la hauteur.....	38
Tab.5: comparaison des moyennes par l'anova (effet station).....	38
Tab.6 : Valeurs propres issues de l'ACP .....	40
Tab.7 : Résultats du test de KOLMOGOROV-SMIRNOV.....	42
Tab.8 : Les modèles retenus pour chaque station .....	47
Tab.9 : Hauteurs issues des modèles (max. et min. de circonférence) .....	50
Tab.10 : Estimation des paramètres du modèle .....	54
Tab.11 : Tableau récapitulatif des modèles retenus et leurs codifications .....	57
Tab.12 : Tableau récapitulatif des tests arithmétiques .....	57

# Sommaire

---

<b>Introduction.....</b>	<b>-1-</b>
<b>Chapitre 1 : Monographie de l'espèce <i>Quercus canariensis</i> .....</b>	<b>- 5 -</b>
I.1. Classification et position systématique .....	- 5 -
I.2. Aire de répartition .....	- 6 -
I.3. Description botanique, dendrologique et anatomique.....	- 7 -
I.3.1. Caractères botaniques (fig.3).....	- 7 -
I.3.2. Caractères anatomique .....	- 7 -
I.4. Qualités technologiques, propriétés physico-mécaniques et usage du bois.....	- 10 -
I.5. Cortèges floristique .....	- 11 -
I.6. Exigences et tempérament .....	- 11 -
I.7. Ennemis et facteurs de dégradation .....	- 12 -
<b>Chapitre 2: La modélisation comme outil de gestion forestière.....</b>	<b>- 13 -</b>
II.1. Définitions et concepts .....	- 13 -
II.2. Classification des modèles.....	- 14 -
II.3. Historique et évolution de la modélisation .....	- 16 -
II.4. Critères de justification des modèles .....	- 17 -
II.5. Objectifs de la modélisation .....	- 18 -
II.6. Relation modélisation – dynamique des peuplements.....	- 19 -
<b>Chapitre 3 : Cadre d'étude et méthodologie.....</b>	<b>- 21 -</b>
III.1. Présentation de la forêt d'Akfadou.....	- 21 -
III.1.1. Relief, substrat géologique et pédologie.....	- 21 -
III.1.2. Le climat et le bioclimat .....	- 24 -
III.1.3. La végétation .....	- 25 -
III.2. Choix des stations, échantillonnage et acquisition des données .....	- 26 -
III.2.1. Choix des stations .....	- 26 -
III.2.2. Inventaire dendrométrique.....	- 27 -
III.2.3. Détermination de l'âge des arbres .....	- 28 -
III.3. Méthode de traitement des données .....	- 29 -

III.3.1. La structure des peuplements.....	- 29 -
III.3.2. Traitement statistique.....	- 30 -
III.3.2.1. Statistique descriptive .....	- 30 -
III.3.2.2. Comparaison et appréciation des différences.....	- 30 -
III.3.2.3. Affinités entre stations et variables .....	- 31 -
III.4.1. Construction des modèles .....	- 32 -
III.4.2. Ajustement à des modèles existants (paramétrage) .....	- 32 -
III.4.3. Qualité et précision des modèles .....	- 33 -
III.4.3.1. Le coefficient de détermination ( $R^2$ ).....	- 33 -
III.4.3.2. L'AIC (Akaike Information Criterion).....	- 33 -
III.4.3.3. Carré moyen résiduel (CMR).....	- 34 -
III.4.3.4. Rapport de variance .....	- 34 -
III.4.3.5. Analyse des résidus .....	- 34 -
<b>Chapitre 4: Résultats et discussions .....</b>	<b>- 36 -</b>
IV.1. Analyse descriptive des paramètres dendrométriques .....	- 36 -
IV.2. Appréciation de l'hétérogénéité des peuplements.....	- 38 -
IV.3. Normalité et structure des peuplements .....	- 42 -
IV.4. Résultats de la modélisation.....	- 46 -
IV.4.1. Construction des modèles.....	- 46 -
IV.4.2. Paramétrage des modèles .....	- 53 -
IV.4.3. Modèle hauteur – âge .....	- 54 -
IV.4.4. Qualité et précision des ajustements.....	- 56 -
IV.4.4.1. Tests arithmétiques .....	- 56 -
IV.4.4.2. Test graphique (Analyse des résidus) .....	- 58 -
IV.5. Influence du gradient écologique sur les modèles .....	- 63 -
IV.5.1. Effet de la densité .....	- 63 -
IV.5.2. Effet de l'âge .....	- 65 -
<b>Conclusion.....</b>	<b>-66-</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>I</b>
<b>RESUMES</b>	

# Introduction générale

Dans de nombreux pays à traditions sylvicoles, la planification et l'organisation des différents travaux sont assurés par les forestiers (GOREAUD et al, 2005). Afin que la forêt réponde au mieux aux différents objectifs fixés en termes de production, de conservation, de protection et de loisir, plusieurs tentatives, surtout en Europe, ont été faites pour développer des outils de planification de la croissance et de la production. Elle concerne principalement les peuplements homogènes, purs et équiennes dont la structure et l'âge facilitent la gestion.

Pour un aménagement durable, l'utilisation de modèles pour l'aide à la gestion forestière devient incontournable. Les chercheurs s'intéressent depuis longtemps à prédire à l'aide de formules mathématiques l'évolution des peuplements forestiers, et s'attachent à mettre au point des outils pour aider les gestionnaires dans l'aménagement et la gestion des forêts (PARDE et BOUCHON, 1988). Depuis, les méthodes ont évolué, on est parti des graphiques tracés manuellement pour passer à des équations établies à partir des courbes par traitement statistique (régression linéaire puis non linéaire) et ensuite des simulations de tout genre sont produites par ordinateur.

Actuellement, les modèles sont à la fois suffisamment complexes pour prendre en compte l'impact des interactions arbre - milieu, et suffisamment robustes pour fournir des prédictions fiables sur le comportement à long terme des forêts. Construire de tels modèles constitue un enjeu très fort pour éclairer les décisions des forestiers.

La recherche dans ce domaine a consisté le plus souvent à constater qu'il existait des liaisons allométriques entre les différentes grandeurs mesurées sur les arbres ou dans les peuplements (BOUCHON, 1979), ces relations, le plus souvent établies entre variables dendrométriques, permettent d'apprivoiser la structure des peuplements et leurs évolutions probables.

Dans ce travail, la hauteur totale a été choisie comme variable expliquée parce que dans la majorité des modèles dit dendrométrique, la hauteur n'est pas à proprement parler une variable d'état interagissant au cours du temps avec les autres (tel le diamètre), mais une variable de sortie à vocation instrumentale (calcul de volume) (DHOTE et DE HERCE, 1994). En outre, COURBAUD *et al* (1993) estiment que la croissance en hauteur individuelle est en effet un processus essentiel pour la caractérisation de la structure des peuplements et de leur stabilité. De plus, elle est vraisemblablement moins dépendante du développement du houppier que la croissance en diamètre.

Sur le plan pratique, l'ajustement d'une relation hauteur-circonférence sur un échantillon restreint du peuplement permet une estimation de la hauteur de tous les arbres, connaissant leur circonférence. De telles relations peuvent être utilisées pour calculer des volumes, pour compléter des modèles dendrométriques de croissance d'arbres (où la variable décrite est généralement la circonférence ou la surface terrière) ou pour analyser la structure du peuplement. Ce type de relation permet aussi de déterminer d'autres indicateurs des peuplements tels que les hauteurs moyenne et dominante. Dans le modèle D'ARNEY (1984) repris par DHOTE et DE HERCE (1994), les courbes résument l'effet de la fertilité de la station sur la croissance individuelle. Une autre utilité est mentionnée par FORTIN *et al* (2009), considérant que la mesure de la hauteur de chaque arbre est une tâche fastidieuse, la hauteur n'est généralement mesurée que sur un sous-échantillon de tiges dans la plupart des inventaires forestiers. Une relation hauteur-diamètre ou hauteur-circonférence est alors étalonnée à partir de ce sous-échantillon et les hauteurs des arbres de la population peuvent ainsi être estimées. L'existence de cette liaison forte est largement utilisée en dendrométrie (appelée aussi «courbe des hauteurs» par les forestiers), puisqu'elle permet de calculer les hauteurs dominante et moyenne du peuplement à partir d'un échantillon restreint de mesures en hauteurs.

Avec l'orientation actuelle vers des méthodes de modélisation fonctionnelle (intégrant les processus éco physiologiques), la hauteur pourrait acquérir plus d'importance. L'étude de la dynamique des peuplements forestiers réguliers (monospécifiques équiennes) nécessite une meilleure compréhension à la fois de la croissance en circonférence et de celle en hauteur. Dans un peuplement fermé où il existe des relations de compétition et une structure sociale, ces deux variables sont bien évidemment liées biologiquement (DELEUZE *et al*, 1996), la hauteur assure un avantage dans la compétition pour la lumière, si bien que des arbres dominants auront une meilleure croissance et en particulier une plus forte circonférence. Cette compétition entretient ainsi une structure sociale dans le peuplement, véritable relation d'ordre entre les arbres.

Il apparaît donc une liaison étroite entre la circonférence et la hauteur. Cependant, les hauteurs ne suivent pas les mêmes variations que les circonférences et la liaison se trouve sujette à de nombreux facteurs plus particulièrement stationnels et sylvicoles.

Mais le choix du modèle pour représenter ces relations est très varié. Parmi les modèles souvent utilisés, citons la droite, la parabole ou les fonctions logarithmiques. Ces modèles ont l'avantage d'être facilement ajustables avec des procédures de régression linéaire ou non linéaire, mais présentent en contrepartie un comportement divergent pour des valeurs extrêmes des circonférences. L'extrapolation de la relation s'avère alors délicate, surtout si l'échantillon utilisé pour l'ajustement est réduit et déséquilibré.

L'objectif justement de la présente contribution est de trouver la forme des modèles la plus adéquate aux mesures effectuées sur les peuplements de chêne zéen dans la forêt d'Akfadou. Cela passera par deux procédures essentielles : l'ajustement au nuage de point et le paramétrage des modèles existants.

En Algérie, la chênaie caducifoliée occupe 65000 à 70000 ha, soit 6.9% de la superficie totale boisée (MESSAOUDENE, 1996). Elle est très inégalement répartie, les plus belles futaies denses occupent les montagnes de Kabylie et à l'est jusqu'à la frontière tunisienne. QUEZEL et BONIN (1980) estiment que l'inconvénient majeur des essences caducifoliées méditerranéennes et bien sûr essentiellement des chênes, réside en fait en une méconnaissance grave des techniques forestières qui leur seraient applicables afin d'obtenir les résultats les plus satisfaisants. Cependant, la valorisation du chêne zéen passe par la promotion et l'application d'une sylviculture axée sur la parfaite connaissance de la croissance des différents paramètres dendrométriques. Dans ce contexte, ce travail porte sur l'étude des relations existante entre les variables dendrométriques pris en considération (hauteur, diamètre, circonférence et âge) afin de tenter de dégager des normes sylvicoles utiles à la conduite des peuplements.

Les travaux de recherche réalisés jusqu'à présent sur le chêne zéen dans la région d'Akfadou ont traité essentiellement de la dendroécologie (MESSAOUDENE, 1989), de la phytosociologie (LARIBI, 2000) et de la qualité du bois (MESSAOUDENE et al, 2008). Il apparaît que le volet modélisation est un peu négligé si l'on excepte l'étude préliminaire de MOKHTARI (2006) pour les zénaies des Ait Ghobri et de Souk Ahras. Pourtant, les chênaies sont les seules forêts du pays capables de produire des bois durs convenant pour la menuiserie fine, à l'ameublement, pour les traverses de chemins de fer et des emplois de hautes qualités de résistance mécanique (LETERUCH-BELAROUCCI, 1994). Aussi elles présentent un grand intérêt tant au point de vue écologique que de la rapidité de sa croissance et de son rôle aux plans biologique, esthétique, paysager et cynégétique.

Prenant en compte ces constatations, nous visons dans la présente contribution la construction de modèles aussi fiables que possible pour chaque type stationnel, évaluer l'influence de l'hétérogénéité du milieu sur les propriétés des modèles, tenter d'extraire le mode d'évolution des peuplements et en fin de fournir un outil même modeste aux gestionnaires des forêts.

Du point de vue méthodologique, l'étude est scindée en quatre chapitres :

- Le premier fait état des connaissances bibliographiques sur l'espèce étudiée (*Quercus canariensis* Willd.).
- Le deuxième exposera un aperçu sur l'historique de la modélisation ainsi que sa place comme outil de gestion forestière.
- Le troisième concernera la description de la zone d'étude, la méthode d'échantillonnage et l'acquisition des données ainsi qu'une explication des méthodes de modélisation.
- Le quatrième portera sur la présentation des données ; sur l'analyse, l'interprétation, la discussion et la confrontation des résultats.

# Chapitre : 1

## Monographie de l'espèce *Quercus canariensis* Willd.

### I.1. Classification et position systématique

La taxonomie du chêne zéen présente de nombreuses difficultés. Celles-ci ont pour principale origine un polymorphisme foliaire extraordinaire, où d'innombrables espèces, sous-espèces, variétés et formes ont été décrites. Parmi les caractères utilisés pour décrire les différentes formes, ceux du tomentum paraissent avoir une valeur taxinomique supérieure (ZINE EL ABDINE, 1987).

Plusieurs auteurs s'intéressaient à la classification des chênes caducifoliés méditerranéens (MAIRE et JAHANDIEZ, 1931 ; DEL VILLAR, 1949 ; CAMUS, 1938). Sans détailler, les séries retenues sont les suivantes :

- *Quercus faginea* Lamk.
- *Quercus mirbeckii* Durieu.
- *Quercus alpestris* Boiss.
- *Quercus baetica* Webb.
- *Quercus fruticosa* Brot.
- *Quercus infectoria* Liv.

Actuellement, dans des travaux plus récents (ACHHAL et al, 1980 ; ZINE-AL-ABDINE, 1987), les formes de chêne zéen sont rattachées à trois sous-espèces appartenant à une seule entité au sens morphologique du terme (*Quercus faginea* Lamk):

- *Quercus faginea* subsp. *eu-faginea* (Maire).
- *Quercus faginea* subsp. *tlemciensis* (Maire et Weiller).
- *Quercus faginea* subsp. *canariensis* (Willd).

Ces trois sous-espèces se distinguent par la taille des feuilles, des branches, le tomentum et les poils. Pour ces raisons, il convient de nommer le chêne zéen de l'Akfadou *Quercus faginea* Lamk. subsp. *canariensis* (Willd.) ou tout simplement *Quercus canariensis* Willd., et ceci pour des raisons d'antériorité (QUEZEL et BONIN, 1980; MEDDOUR, 1993).

L'espèce *Quercus canariensis* Willd. appartient à l'embranchement des spermaphytes, au sous embranchement des angiospermes, à la classe des dicotylédones, à l'ordre des fagales, à la famille des fagacées, à la sous famille des quercinées et au genre quercus.

## I.2. Aire de répartition

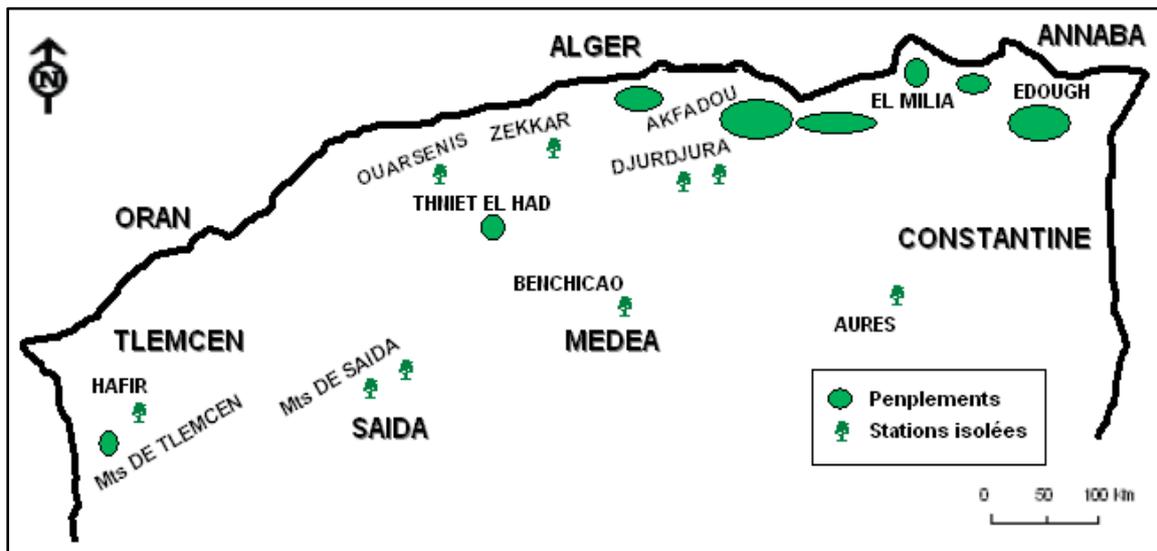
Le chêne zéen représente avec le chêne afares (*Quercus afares*), dont la superficie ne dépasse pas une dizaine de milliers d'hectares, 6.9% de la superficie boisée de l'Algérie. Si l'on se réfère à l'histoire de ces deux chênes, les rares études paléobotaniques montrent qu'ils ont eu, dans le passé, au quaternaire et avant l'invasion romaine, une extension bien supérieure à celle qu'ils connaissent actuellement (MESSAOUDENE, 1989).

L'aire mondiale du chêne zéen se limite à la rive sud-occidentale du bassin méditerranéen (territoire ibéro – maghrébin). Au Maroc, il est présent dans le Rif, le Plateau Central, le Moyen Atlas et même dans le Haut Atlas (ACHHAL et al, 1980). En Tunisie, il est en mélange avec le chêne liège. Il forme toutefois deux vastes massifs à Feidja et Ain Draham (fig.1).

En Algérie, il est commun dans les montagnes depuis l'est jusqu'à la frontière tunisienne. A l'extrême ouest il est représenté par la sous-espèce *Q. tlemciensis* (ALKARAZ, 1989). Il forme de très beaux peuplements en Kabylie (Ait Ghobri, Akfadou, Babors, Tamesguida, Kefrida et Tassentout), dans la région de Jijel (forêt de Guerrouch), à Annaba (forêt de l'Edough), à l'extrême est (Djebel Ghora, El Kala et Souk Ahras). De petits peuplements à l'état disséminé sont localisés dans la région de Ténès, à Teniet El Had, Cherchel, Chréa, Djurdjura, l'Aurès et le Hodna (KAOUANE, 1987) (fig.2).



Figure 1 : Répartition de *Q. canariensis* dans le bassin méditerranéen (QUEZEL et BONIN, 1980).

Figure2 : Répartition de *Quercus canariensis* en Algérie.

### I.3. Description botanique, dendrologique et anatomique

#### I.3.1. Caractères botaniques (fig.3)

*Quercus canariensis* est une espèce monoïque pouvant atteindre plus de 30m de hauteur et un diamètre de 2m à 1,30m du sol, avec un fût très élancé et un houppier étalé en peuplements clairs et fastigié dans le des formations très denses. Son écorce est profondément fissurée de couleur brun foncé. Ces jeunes rameaux sont tomenteux.

Ces feuilles sont obovales ou lancéolées et plus ou moins auriculées à la base. Le limbe forme 10 à 12 paires de lobes mucronées, régulières, arrondies ou obtues. A nervure principale saillante à la face inférieure, elles ont une longueur de 5 à 20cm et une largeur de 4 à 12cm, caduque début printemps (partiellement, certaines feuilles le sont en hiver). Les glands subsessiles à maturité annuelle sont inclus pour un tiers environ dans une cupule recouverte d'écailles lancéolées, planes, imbriquées et longues tout au plus de 5-6mm. Sa longueur varie de 20 à 40mm et son diamètre de 10 à 15mm.

#### I.3.2. Caractères anatomique

Le chêne zéen présente des cernes nettement distincts avec un bois initial de 1 à 4 assises de pores et un bois final composé de pores disposés en plages radiales étroites en forme de flamme, des rayons ligneux unisériés (nombre :36/5mm) et plurisériés (nombre :1/5mm) de taille moyenne comprise entre 0,011dixiemme de mm et 0,224mm ; des vaisseaux de bois initial et final variant de 0,042 à 0,192mm (diamètre radial et tangentiel) ; des bandes de parenchymes d'une épaisseur de 0,021mm ; des fibres de longueur moyenne de 1,545mm (MESSAOUDENE, 1996).

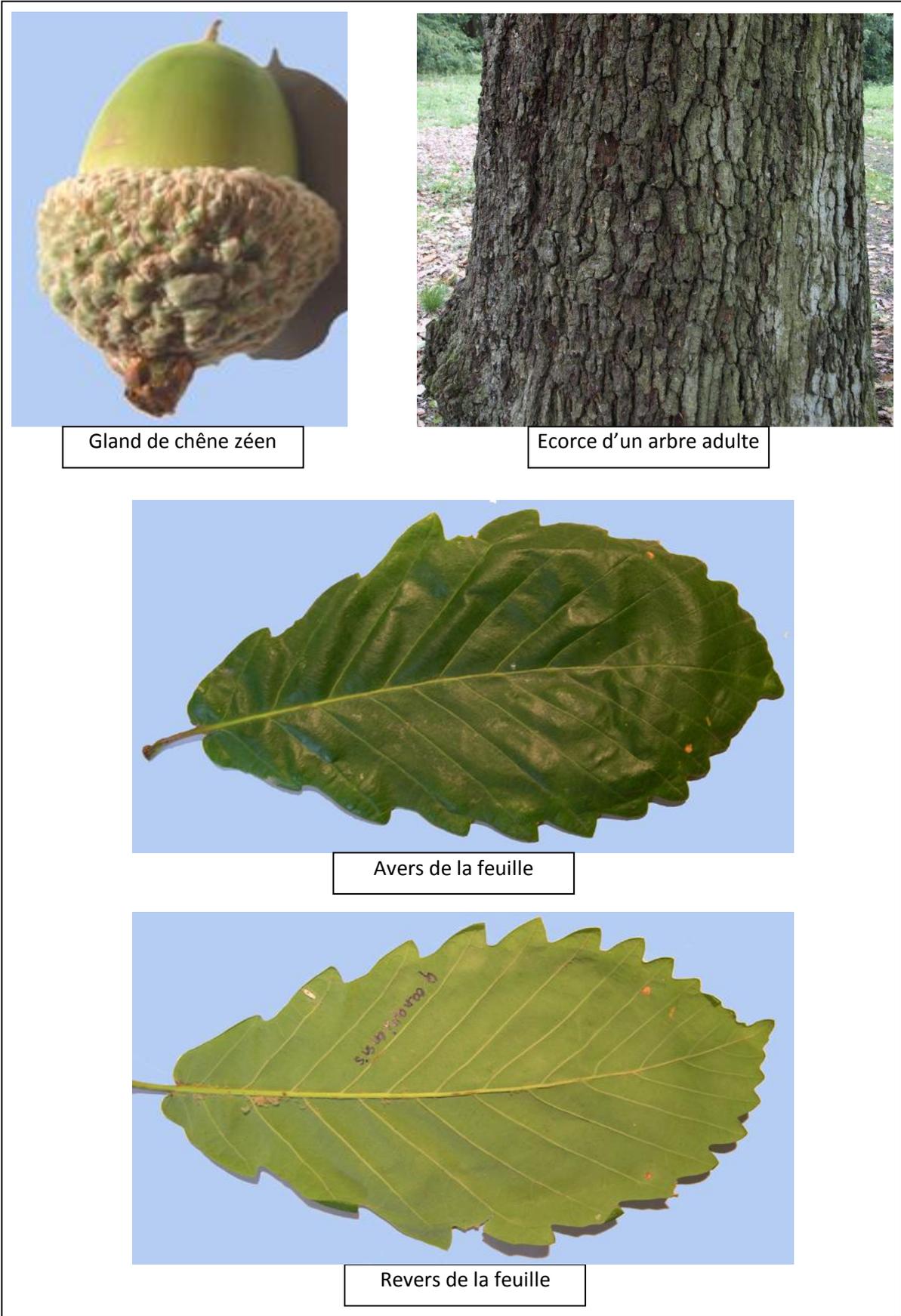


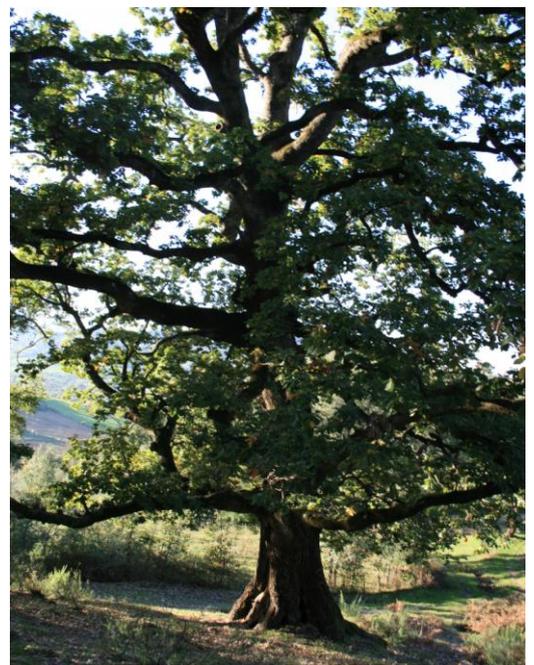
Figure 3 : Planche des différents organes du chêne zéen.



Vue générale d'un peuplement dense du canton Tacharchourt dans l'Akfadou



Perchis dense de chêne zéen



Arbre isolé

#### **I.4. Qualités technologiques, propriétés physico-mécaniques et usage du bois**

En vue macroscopique, le bois de chêne zéen présente de gros rayons ligneux multisériés et de petits rayons unisériés, à l'origine d'une belle maillure du bois lorsqu'il est débité en quartiers. La zone de bois initial se caractérise par de gros vaisseaux alignés en bandes tangentielles et isolés les uns des autres. En revanche, le bois final est formé de vaisseaux nettement plus petits et de taille variable. Les fibres sont très nombreuses dans le bois final, irrégulièrement réparties et à trajet rectiligne-oblique. Aujourd'hui, les avis sur la qualité du bois de ce chêne sont variables et parfois contradictoires. La majorité des forestiers considèrent, sans argument scientifique, le bois de chêne zéen comme étant de qualité médiocre et lui accordent très peu d'intérêt (MESSAOUDENE et *al*, 2009). A cet effet, les résultats des essais effectués par le Centre Technique Forestier Tropical en 1970 montrent que le bois possède des qualités intéressantes incontestables : il est de couleur claire, de droit fil, à grain assez fin et de durabilité naturelle moyenne. D'autres remarques peuvent être résumées comme suit :

- Etant peu abrasif, son usinage est relativement facile en utilisant des machines assez puissantes et des outils de coupe moderne.
- Le séchage est très difficile, tant que le bois est humide, il y a risque de fentes importantes interdisant tout débit large. Le séchage naturel, bien conduit, donne de bons résultats contrairement au séchage artificiel qui donne lieu à de graves difficultés.

Des travaux plus récents (MESSAOUDENE et *al*, 2009) confirment que le bois du chêne zéen est situé dans la catégorie des bois à forts retraits, nerveux à très nerveux et mi-lourds à lourds. La sévérité de ces contraintes physiques dévalorise le bois de cette essence. Toutefois, le chêne zéen se distingue par rapport aux bois de chênes méditerranéens et européens par sa faible anisotropie, caractère indicateur de la stabilité dimensionnelle de son bois.

Le chêne zéen possède un bois très dur et très dense. La résistance aux chocs est excellente. Il est facile à coller mais difficile à clouer sans avant trou. L'aubier est souvent attaqué par les champignons, il ne résiste pas aux termites et autres attaques de parasites. Par contre, le bois parfait présente une bonne résistance.

Malgré que le bois de cette essence ne présente pas des qualités appropriées pour quelques usages, il garde son utilité pour la confection des poutres de ponts, bois de service (piquets de mines, perches...), parquet, manche d'outils et il donne aussi un bon bois de chauffage et un charbon de qualité. Pour les traverses de chemin de fer, bien qu'il soit utilisé dans le passé mais il ne donne pas une entière satisfaction pour cet emploi parce que les fibres une fois soumises aux sels de fer et à l'humidité se désorganisent sous le rail (MAZEGHRANE et MESSAOUDE, 1990).

A coté de son utilisation comme bois de sciage, l'écorce du chêne zéen renferme des quantités considérables de tanin qui sert à la fabrication de produits cosmétiques et surtout dans le tannage du cuir. Mélangé à 20% avec des résineux, le bois peut servir à la fabrication de panneaux de particules (HAMMICHE, 1978). Le taux de cellulose est satisfaisant (54,4%).

En présence de traitements sylvicoles appropriés, le chêne zéen peut fournir un bois de qualité. Les synthèses faites par MESSAOUDENE (1996) et MESSAOUDENE et *al* (2009) ont montré que la qualité diffère d'une station à une autre en fonction de la densité et selon que des éclaircis soit pratiqués ou pas, en effet ces dernières devraient régulariser la croissance de l'espèce, l'alternance de cerne épais et de cernes minces peut être à l'origine de la médiocrité technologique du bois. L'amélioration de celle-ci doit passer par la régularisation du rythme de croissance qui passera nécessairement par la régularité de la largeur des cernes et leur finesse.

### **I.5. Cortèges floristique**

Sommairement et si on se réfère seulement aux travaux sur les zénaies de Kabylie et de l'est algérien, le cortège floristique du chêne zéen est assez riche. En strate arboré, *Quercus canariensis* se partage l'espace avec *Quercus afares* et *Quercus suber* dans le cas d'une chênaie mixte. Il forme aussi des massif avec *Cedrus atlantica*, *Sorbus torminalis*, *Acer obtusatum* et *Acer campestre* (KAOUANE, 1987).

La strate arbustive a une composition spécifique peu diversifiée et assure toujours un degré de recouvrement assez important, de l'ordre de 60%. Il faut y noter la présence et la haute fréquence de *Cytisus triflorus*, *Erica arborea*, *Calycotome spinosa*, *Genista tricuspidata*, des ronces *Rubus ulmifolius*, *R. incanescens* (= *R. numidicus*) et sporadiquement des Rosacées *Crataegus monogyna* et *Rosa sempervirens*.

La strate herbacée est généralement peu développée dans les peuplements adultes, avec l'abondance des espèces vernalles (thérophytes) et se présente en mosaïque dans les taches de lumière de la formation, avec les nombreux semis de chênes (MEDDOUR, 1993).

### **I.6. Exigences et tempérament**

Sur le plan édaphique, le substratum de prédilection est la formation de grés numidien sur laquelle on trouve des sols bruns lessivés, profonds, perméables et légèrement acide.

Du point de vue bioclimatique, le chêne zéen se limite aux variantes tempérée et fraîche du bioclimat humide ; et à un degré moindre, au subhumide (Tlemcen et Theniet El Had). Toutefois, il peut se développer dans le subhumide frais et il n'est pas absent dans l'humide chaud, son optimum de production est atteint dans le supra méditerranéen. (QUEZEL et MEDAIL, 2003).

Le chêne zéen exige annuellement plus de 800mm de pluies (BOUDY, 1955), et ne prenant son développement optimal que dans les zones recevant 1000mm et plus. La nébulosité et le brouillard favorisent son développement. Il résiste bien aux vents violents et

aux neiges abondantes. Quant aux températures, il supporte un froid allant jusqu'à  $-8^{\circ}\text{C}$  ; la température moyenne lui convenant est de l'ordre de  $15^{\circ}\text{C}$ .

L'optimum de la zénaie, sur le plan bioclimatique, correspond à la variante tempérée du bioclimat humide. Dans les autres variantes, le chêne zéen se trouve en association avec d'autres essences forestières dont le sapin de Numidie et le cèdre de l'Atlas dans la variante froide, et le chêne liège dans la variante chaude.

Quant à la topographie, le chêne zéen s'étend depuis le bord de la mer méditerranée (Taza, Guerrouch, Jijel) jusque vers 2000m d'altitude (Babors). Mais il ne forme des peuplements importants que dans une tranche altitudinale allant de 1000m à 1600m. A sa limite supérieure, vers 1800m, il supporte difficilement la concurrence avec le cèdre, et doit lui céder la place peu à peu. A basse altitude, il est rencontré essentiellement dans des conditions stationnelles particulières, ravin humide, fonds de vallons et les versants ombrageux où une humidité constante règne sur une grande partie de l'année (ACHHAL et al, 1980).

En exposition nord de 650m à 1646m d'altitude, le chêne zéen prédomine par rapport au chêne afares (MESSAOUDENE, 1989). Mais il se laisse carrément envahir par *Quercus afares* et *Quercus suber* sur les versants sud, sur les crêtes relativement sèches et à altitudes inférieures à 1400m.

### **I.7. Ennemis et facteurs de dégradation**

D'une manière générale, les arbres de chêne zéen conservent un état sanitaire satisfaisant jusqu'à l'âge de 200 ans (HAMMICHE, 1978). Cependant, ils sont épisodiquement attaqués et c'est dans la classe des insectes que l'on trouve le plus d'espèces nuisibles, appartenant souvent à l'ordre des coléoptères (bostryches et longicornes).

Le grand capricorne (*Cerambyx heros*) creuse des galeries dans le tissu ligneux au niveau de l'aubier, quand les attaques sont importantes, l'arbre risque le dépérissement prématuré.

Les invasions brutales même intermittentes de *Lymantria dispar* et de *Tortrix viridana* sont partout redoutables, leurs attaques provoquent un ralentissement de la croissance résultant de la défeuillaison.

Parmi les maladies cryptogamiques, citons les polypores qui, ordinairement ne s'attaquent qu'aux arbres dépérissants, peuvent s'introduire dans des arbres sains. C'est le cas de *Fomes fomentarius* très fréquent dans la zénaie de Kabylie (SMAIL, 1994 in HAMOUCHE, 1998) et qui cause des dégâts considérables en détruisant le cœur de la grume.

## Chapitre : 2

### La modélisation comme outil de gestion forestière.

#### II.1. Définitions et concepts

La modélisation de la croissance et du rendement est un domaine important de la recherche forestière. En aménagement forestier, la prédiction du développement de l'arbre ou du peuplement forestier (accroissement en diamètre, en hauteur, en surface terrière et en volume) est une opération essentielle pour le gestionnaire.

CHARPENTIER (1995) définit la modélisation comme étant un processus d'analyse de données visant l'élaboration de modèle. Ces derniers sont des représentations simplifiées de certains aspects de la réalité. Dans le contexte des sciences exactes, le modèle est l'expression formelle d'une théorie. Il est constitué d'un système d'équation qui permet de suivre le comportement de certaines caractéristiques dans le temps. Ces équations sont souvent regroupées pour former des logiciels. Le terme modélisation inclut également la logique nécessaire pour relier les équations et la codification informatique pour en faire un outil utile et efficace.

Un modèle peut être aussi considéré comme la transformation de l'ensemble des données expérimentales sous une forme réduite, le plus souvent une forme mathématique, permettant la mise en évidence d'un certain nombre d'informations qualitatives ou quantitatives.

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité : Dessin, Schéma, Equation conceptuelle etc. (GOREAUD ,2000).

Le terme « modèle » est apparu dans le langage scientifique dans les années 1960 et « modélisation » dans les années 1970 affaiblissant et assouplissant la notion de loi, commune à l'époque (SCHMIDT-LAINE et al, 2008).

## II.2. Classification des modèles

On distingue deux types de modèles lorsque l'on se réfère à des procédures d'utilisation différentes (CHARPENTIER, 1995) :

- Les modèles déterministes : lorsque la valeur exacte de la variable dépendante est prédite par une fonction de variable indépendantes.
- Les modèles probabilistes (stochastiques): lorsqu'une valeur probable de la variable dépendante est prédite par une fonction de variable indépendante.

LAROCQUE (2008) propose une synthèse des différents types de modèles de prévision de la dynamique des écosystèmes forestiers et leur utilité dans un contexte des nouvelles exigences en aménagement forestier, dans laquelle il définit trois principaux types de modèles :

- 1- **Les modèles empiriques** : leur temps de projection est court, ils sont utilisés dans le calcul de possibilité et dans l'appréciation des effets des traitements sylvicoles.
- 2- **Les modèles de succession** : la prédiction est à court et à long terme, ils donnent des informations sur la succession forestière dans un contexte d'application des principes de l'aménagement écosystémique. Dans un exemple représentatif, la problématique est posée ainsi : *“est-ce que les activités d'aménagement affectent la dynamique à long terme de telle sorte qu'une succession indésirable puisse se produire ?”*
- 3- **Modèles basés sur les processus** : la projection est à long terme, ils contiennent des représentations mathématiques qui représentent les processus écophysologiques qui gouvernent le développement et la croissance des arbres et des peuplements.

Dans une autre optique, plusieurs types de modèles existent. PARDE et BOUCHON (1988), HOULLIER *et al.* (1991), RONDEUX (1993) distinguent neuf groupes,

- **Les modèles dynamiques** : dans lesquels on cherche à représenter une évolution temporelle, les modèles de production relèvent des modèles dynamiques. Un modèle dynamique est formé par un ensemble de relations mathématiques statistiques ou logiques qui représentent l'évolution d'un ensemble de variables descriptive d'un peuplement forestier donnée.
- **Les modèles statiques** : les tarifs de cubage par exemple, qui rendent compte d'un état existant.
- **Les modèles stratégiques** : qui fournissent des indications générales sur des peuplements théoriques (les tables de production par exemple).
- **Les modèles tactiques** : tentent de simuler l'évolution d'un ou plusieurs peuplements en fonction de scénarios sylvicoles possibles.

- **Les modèles globaux** : HOULLIER et al (1991) parlent de “Modèles de macro population“ : dans ce type de modèle, les variables décrivent de façon globale un ensemble de peuplements divers. L’intérêt de ces modèles réside surtout dans leur simplicité de mise en œuvre pour les problèmes de prédiction aux échelles régionales. Ce type de modèle est dit encore modèle régional (RONDEUX, 1993), c’est un modèle de production destiné à la planification régionale ou à grande échelle.
- **Les Modèles de peuplement** : on se place là au niveau plus fin, mais encore global, puisque les arbres ne sont pas individualisés. On s’intéresse à la dynamique d’ensemble d’un groupe d’arbres formant une population au sens biologique du terme. Les modèles de croissance des peuplements concernent l’évolution probable des peuplements en tenant ou pas compte de la distribution par catégories de grosseur des arbres les constituants, l’unité de référence de ces modèles est donc le peuplement. Les tables de rendement ou de production en sont un exemple. Ces modèles s’appliquent bien en peuplements réguliers monospécifiques et sont d’emploi courant.
- **Les Modèles arbres** : s’attachent à rendre compte de la croissance d’arbres soumis à la compétition au sein d’un peuplement, l’unité de référence de ces modèles est donc l’arbre. La sommation des arbres individuels permet d’obtenir des estimations pour le peuplement. Ils peuvent être à leurs tours divisés en deux types :

**A / Modèles arbre indépendant de la distance ou modèles individuels d’un arbre soumis à la concurrence du peuplement** : dans le cas des modèles indépendants des distances, on utilise plutôt les variables globales du peuplement afin de déterminer la compétition subie par un arbre.

**B / Modèles arbre dépendant de la distance ou modèles individuels d’un arbre soumis à la concurrence de ses voisins** : ces modèles se distinguent des précédents par l’introduction d’une mesure individuelle de la compétition subie par les arbres, basée sur la localisation de chaque arbre à l’intérieur du peuplement. Ils nécessitent la mesure des distances séparant un arbre de ses plus proches compétiteurs dont on mesure également les dimensions. Ces deux types de modèles s’appliquent aux peuplements équiennes et inéquiennes purs ou mélangés et avec des espèces aux caractéristiques écologiques différentes (HOULLIER et al, 1991).

- **Modèle architectural** : caractérisation des modes de croissance et de ramification d’une espèce.
- **Modèle de gestion** : il s’agit en fait de l’application des modèles à la gestion (avec prise en compte d’éléments technico-économiques). Cette application se fait souvent au travers de logiciels.

Les modèles “arbres“ sont les plus raffinés, ils exigent les renseignements nécessaires pour déterminer la compétition que subit chacun des arbres. Pour ce type de modèle, les recherches sont les plus avancées en Amérique du nord (CHARPENTIER, 1995), cela est

probablement dû à l'abondance des informations recueillies dans des placettes échantillons permanentes.

Comparés aux modèles « peuplements entiers », les modèles de croissance « arbre individuel » dépendant de la distance offrent un intérêt plutôt théorique pour étudier des scénarios sylvicole. Ils représentent un moyen efficace pour déterminer le degré de compétitions entre les arbres, la mortalité et la croissance individuelle de la hauteur, du diamètre ou de la cime. En pratique, ces modèles sont d'une utilisation difficile à cause des multiples observations qu'ils requièrent et de la complexité des simulations (CHARPENTIER, 1995).

Les modèles « peuplements entiers » associés à des techniques d'optimisation permettent d'analyser les options d'aménagement. Le grand avantage de ces modèles simples est de prédire le rendement des peuplements avec peu de paramètres et de décrire les peuplements selon la distribution des tiges par classes de diamètre. En outre, ces modèles présentent presque la même précision que les modèles « arbre individuel ».

Pour le choix du modèle en aménagement forestier, les comparaisons précédentes montrent que les modèles « peuplement entiers » sont plus avantageux que les modèles « arbre individuel » pour les peuplements purs et équiennes. En effet, ils sont plus simples et plus maniables pour réaliser des projections de rendement des peuplements. L'une des qualités de ces modèles est le fait que leurs équations contiennent moins de paramètres et qu'ils se prêtent mieux à la recherche d'une solution optimale par approximations successives.

### **II.3. Historique et évolution de la modélisation**

Historiquement, les forestiers se sont souvent préoccupés d'établir des modèles simples ou des outils de décision commodes tant pour estimer que pour prévoir l'accroissement et la production des peuplements. Ces moyens devaient être capables d'orienter les activités d'aménagement (traitements sylvicole) et de procurer des informations sur la dynamique des peuplements. Les tables de production constituent les premiers modèles utilisés pour prédire les différentes caractéristiques des peuplements forestiers. Les premières tentatives datent du 18<sup>ème</sup> siècle. DECOURT (1964) rapporte que les premières tables ont été publiées en Allemagne où elles tiennent une grande place dans la littérature forestière. Depuis, plus d'un millier de tables sont apparues dans les différents pays à vocation forestière.

Au cours du temps, les modèles ont évolué en fonction des objectifs, de nouvelles connaissances techniques et biologiques et de la précision recherchée.

On admet donc que les premiers de ces outils sont les tables de production. En France, la plupart ont été construites entre les années 1960 et 1980 pour une grande variété d'essences en restant dans le cadre de peuplements réguliers monospécifiques (GOREAUD *et al*, 2005). Elles se présentent sous la forme de tableaux de chiffres qui permettent de prédire l'évolution dans le temps d'un peuplement régulier, en fonction de la fertilité du lieu pour la sylviculture

moyenne appliquée ou pour certains scénarios sylvicoles classiques. Ces tables de production sont en fait le résultat d'observations à long terme de l'évolution de peuplements de référence. Ces premiers outils présentent deux principaux inconvénients : ils ne rendent compte que de l'évolution moyenne des peuplements, et, en général, ils ne permettent pas de simuler différents types de sylviculture ou de nouveaux scénarios. De nos jours, plusieurs modèles mathématiques existent. Des logiciels et des programmes informatiques sont disponibles dans le domaine de la prédiction forestière.

Par la suite, les méthodes ont beaucoup varié étant donné les difficultés d'ajuster graphiquement les courbes aux données. Les différences rencontrées entre régions écologiques ont aussi influencé les méthodes afin d'éviter des extrapolations grossières. Ces dernières ont évolué avec la capacité d'utiliser un certain nombre d'équation de régression (BERGEZ, 1988), d'équations différentielles (KHATOURI et *al*, 1990) et de systèmes d'équations incorporés logiquement dans un seul programme (COURBAUD et *al*, 2000). L'évolution des procédures a grandement été favorisée par les performances grandissantes des ordinateurs.

#### **II.4. Critères de justification des modèles**

La justification des modèles peut reposer sur de nombreux critères très différents, et utilisés à divers moments de leur construction. Ci-dessous sont cités les critères qui sont nécessaires pour atteindre l'objectif fixé, en d'autre terme, les critères retenus sont ceux rencontrés systématiquement lors de la construction de chaque modèle :

a) Nécessité de la cohérence rationnelle du modèle

Le seul fait d'utiliser de cadre théorique des systèmes de transformation (principe logique et mathématique) entraîne la cohérence rationnelle du modèle.

b) Ajustement aux données expérimentales

Le choix des protocoles expérimentaux, et en particulier le choix des paramètres et variables de référence, pose un problème très important. Un modèle est construit dans le but d'étudier un phénomène précis et il est nécessaire qu'il y ait une certaine cohérence entre les données expérimentales et cet objectif. Il faut donc définir précisément le phénomène étudié, les paramètres et les variables pertinentes et en conséquence prendre en compte les données expérimentales apportant des informations utiles.

c) Justification de toutes les caractéristiques du modèle

Tous les éléments constitutifs du modèle, dans le langage théorique choisi, doivent être impliqués par les seules données expérimentales ; en particulier le modèle ne doit pas contenir aucune hypothèse non vérifiée. Cependant en pratique, ce critère peut être atténué ; en effet la construction d'un modèle nécessite souvent, la prise en considération de certaines hypothèses.

La construction et l'utilisation du modèle doivent permettre par la suite de nombreux tests sur la validité de ces hypothèses qui peuvent alors se trouver justifiées ou rejetées.

d) Unicité

Il est évident que si plusieurs modèles, voir une infinité, sont en concurrence, aucun d'entre eux n'est assuré, et donc justifié. Notons cependant l'exception qui concerne les informations contenues simultanément dans tous les modèles envisageables. Ces informations sont justifiées, même en l'absence de modèle unique.

e) Falsifiabilité (ou réfutabilité)

Un modèle est falsifiable s'il permet d'imaginer des expériences susceptibles de le mettre éventuellement en défaut.

Le cadre théorique des systèmes de transformation en tant que systèmes axiomatisés (évidences mathématiques non démontrables), constitue un langage de base qui n'est pas en lui-même falsifiable.

Par contre les modèles établis dans le cadre des combinaisons des systèmes de transformation (équations de base) sont falsifiables. On notera à ce propos que la falsifiabilité ne fait pas référence aux possibilités techniques permettant de réaliser en pratique ces tests. Un modèle est falsifiable même si, par exemple, les possibilités expérimentales très limitées ne permettent pas de le tester dans l'immédiat.

f) Pouvoir de prévision

Ce critère a la particularité d'être une condition de justification à la fois non nécessaire et non suffisante. S'il est vrai qu'en pratique, la justesse des prévisions que l'on déduit d'un modèle a une grande importance psychologique et conduit toujours à conforter une opinion favorable sur sa justification, il ne faut pas oublier qu'un tel critère ne constitue pas toujours une preuve de validité.

Cependant, il existe d'autres critères qui ne sont pas mentionnés malgré leurs importances pratique dans l'acceptation ou le refus d'un modèle, à savoir ceux appelés critères psychologiques tels que " la facilité d'interprétation du modèle en termes biologiques" et "la continuité avec les études antérieures".

## **II.5. Objectifs de la modélisation**

Le modèle est tout d'abord un outil dans le processus d'acquisition des connaissances. Son domaine d'utilisation et de précision, c'est-à-dire un domaine de « confiance », est bien défini (SCHMIDT-LAINE et *al*, 2008). Il ne doit pas pouvoir être mis en défaut dans ce domaine. En revanche, aucune assurance n'est donnée sur ses performances en dehors.

D'après CHARPENTIER (1995), HADJAJ (2010), les objectifs visés par la modélisation en foresterie sont :

- Simuler les effets de divers traitements sylvicoles ; les modèles rendent possible une comparaison rapide de plusieurs scénarios sylvicoles, ce qui aurait demandé auparavant de longues années d'expérimentation (GOREAUD *et al*, 2005)
- Prédire la croissance des arbres ou la production du peuplement ;
- Pour pouvoir gérer finement la production de bois en termes de taille des troncs à récolter et de qualité du bois produit, les gestionnaires forestiers ont besoin d'outils qui prédisent l'accroissement individuel de chaque arbre du peuplement.
- Pour prédire l'accroissement individuel des arbres, les dendrométriciens construisent des modèles à l'échelle de l'arbre, qui prennent en compte l'influence des voisins directs sur la croissance par le biais d'indices de compétition (HOULLIER *et al*, 1991).
- La modélisation réduit le nombre, la durée et le coût des essais expérimentaux, de ce fait l'utilisation de ces modèles permet d'analyser des données expérimentales et d'optimiser les expériences. Elle permet aussi de tester différents scénarios sans contraintes de faisabilité.

## II.6. Relation modélisation – dynamique des peuplements

Il est évident que les modèles de croissance reposent sur des bases mathématiques. Pour être efficace, le modèle doit être fondé sur des hypothèses logiques de la croissance des arbres et des peuplements considérés. Des modèles mathématiques "biologiquement raisonnable" proviennent de propositions logiques des relations entre variables, ils peuvent aussi puisés de connaissances théoriques précédemment acquises.

En foresterie, les modèles de prédiction sont formulés sous forme de systèmes d'équations ou de fonctions qui reflètent le plus possible le fonctionnement de l'écosystème. L'apport de la modélisation dans les tentatives de compréhension du fonctionnement des peuplements forestiers est considérable. Des travaux mettant en place des équations qui rendent compte de l'accroissement des arbres survivants et de la qualité de leurs bois (COLIN *et al*, 1992), des effets de la densité (DELEUZE, 1996), de la croissance en relation avec le fonctionnement physiologique (DELEUZE, 1995 ; POUDEROUX S. *et al*, 2001), du passage des tiges d'une classe de diamètre à une autre, de la mortalité et du phénomène de recrutement ainsi que de l'influence des différents traitements sylvicole (DHOTE, 1997).

La figure 4 (HOULLIER *et al*, 1991) légèrement remaniée par CHARPENTIER (1995) symbolise l'effort d'intégration et de synthèse des connaissances acquises pouvant être exploitées par la modélisation.

Au plan des « entrées » : le milieu est par exemple traduit par un indice de fertilité (liaisons station-production), la génétique par un indice de vigueur et la réaction aux traitements sylvicole représente le cœur du système.

Au plan des « sorties » : la production totale des peuplements et la croissance individuelle des arbres constituent les principaux résultats auxquels s'ajoutent des informations qui permettent d'appréhender certains aspects qualitatifs (largeur de cerne, branchaison, ...).

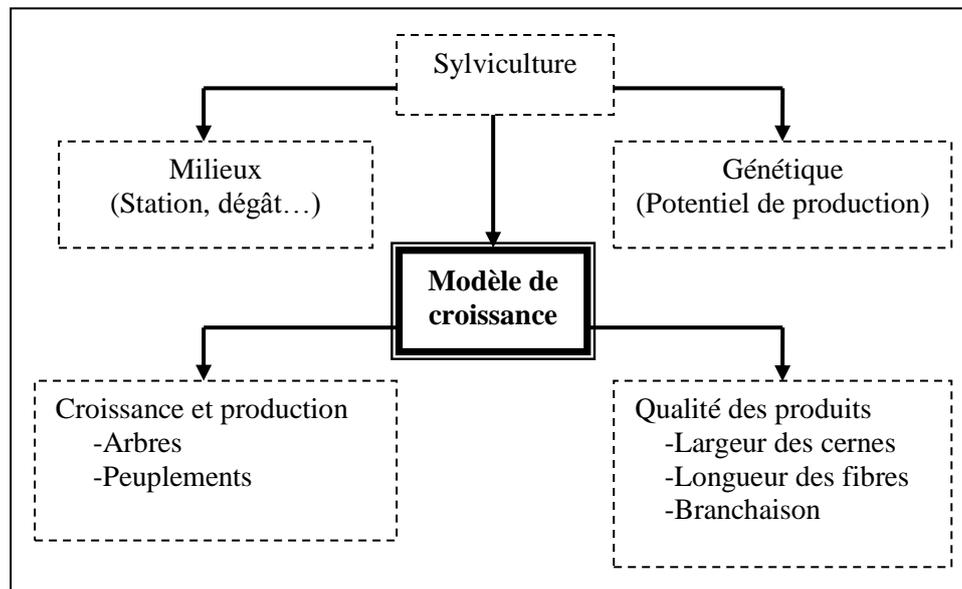


Figure.4 : Représentation des tentatives d'intégration et de synthèse des connaissances au travers de la modélisation.

# Chapitre. 3

## Cadre d'étude et méthodologie

### III.1. Présentation de la forêt d'akfadou

Le massif forestier d'Akfadou est situé en grande partie à l'intersection de deux chaînes montagneuses : la chaîne côtière et celle du Djurdjura. Il est distant du chef lieu de wilaya de Tizi ousou de quelques 50 km et de la mer méditerranée à moins de 20 km à vol d'oiseau. La forêt d'Akfadou s'étend sur 11000ha, soit 18% de la chênaie caducifoliée d'Algérie (MESSAOUDENE et al, 2007). Elle est sous régime domanial, et divisée en deux parties : l'Akfadou ouest et est, dépendant respectivement de la wilaya de Tizi ousou (4600ha) et de Bejaia (6400ha).

Les stations choisies pour cette étude sont localisées dans la partie ouest de ce massif délimité (fig.5):

- Au nord est : par la tranchée par feu séparant l'Akfadou est (Bejaia) et ouest (Tizi ousou).
- Au nord ouest : la forêt domaniale d'Ait Ghobri.
- A l'ouest : la forêt domaniale d'Ait Ghobri et des terrains particuliers.
- A l'est et sud est : le massif forestier de l'Akfadou est.
- Au sud ouest : les terrains particuliers de la daïra de Bouzguène.

#### III.1.1. Relief, substrat géologique et pédologie

L'orographie de la forêt d'Akfadou est assez compliquée : elle s'articule autour d'une succession de lignes de crête globalement orientées nord-est et sud-ouest. Généralement, le relief est assez accidenté (pentes de 15 % à 45 %), notamment dans sa partie sud orientale,

l'altitude de l'Akfadou variant de 560 m (Assif Ouserdoun) à 1646 m (Djebel Ez Zéen) (MESSAOUDENE, 1989).

La carte établie par GELARD (1978), montre que l'Akfadou renferme trois substrats : les grès numidiens, les éboulis et les argiles sous numidiennes de l'oligocène s'intercalant sur les versants (Ighil Rhara au nord est d'Ighil Atmane et une partie de la ligne de crête de la borne 11), le flysch à microbrèche du sénonien occupe les croupes arrondies. DURAND (1950) estime que cette région ne comprend que deux faciès :

- Les grès siliceux du numidien supérieur
- Les argiles du numidien inférieur avec intercalation de bancs gréseux (flysch).

Le même auteur souligne que la plupart des sols du massif d'Akfadou sont brun lessivés légèrement acides. Par endroit, il existe des sols à hydromorphie temporaire en contact avec des argiles sous numidiennes, le sol est humifère et l'humus est de type mull forestier caractérisé par un rapport C/N satisfaisant donnant une bonne minéralisation, le pH est inférieur à 7.

L'étude menée par DURAND (1951) dans la région montre que "le facteur essentiel de différenciation des sols est la roche mère, par sa plus ou moins grande perméabilité conditionne la migration des argiles" d'où une différenciation des sols sur substrat gréseux d'une part et sur substrat argileux d'autre part.



### III.1.2. Le climat et le bioclimat

Le massif de l'Akfadou, s'étendant sur un territoire qui accuse des dénivellations entre ses points extrêmes, est tout naturellement caractérisé par une variabilité microclimatique. Il se caractérise par les bioclimats subhumide et humide à variante fraîche et tempérée. En effet celui-ci reçoit une précipitation importante variant de 1200 à 2000 mm/année ce qui le place parmi les zones les plus arrosées de l'Afrique du Nord, la saison pluvieuse y importante (8 mois) et la période sèche estivale s'étant sur deux mois et demi, le régime saisonnier des précipitations est de type : Hiver – Automne – Printemps – Eté (HAPE). (MESSAOUDENE, 1989).

La localisation des stations sur le climagramme d'Emberger est possible grâce au calcul du quotient pluviométrique (Q<sub>2</sub>) et de la valeur de la température minimale du mois le plus froid.

L'exploitation des données climatiques fournies par l'ANRH sur une période relativement étalée, les quotients pluviométriques calculés positionne le point d'altitude moyenne de l'Akfadou (1400m) dans l'étage bioclimatique humide à variante fraîche (MESSAOUDENE, 1989). (Fig.6).

Q<sub>2</sub> est calculé de la manière suivante :

$$Q_2 = 3,43 \frac{P}{M - m}$$

Q<sub>2</sub> : Quotient pluviométrique d'Emberger;

P : Pluviométrie annuelle en (mm) ;

M: Moyenne des maxima du mois le plus chaud en (°C) ;

m : Moyenne des minima du mois le plus froid en (°C).

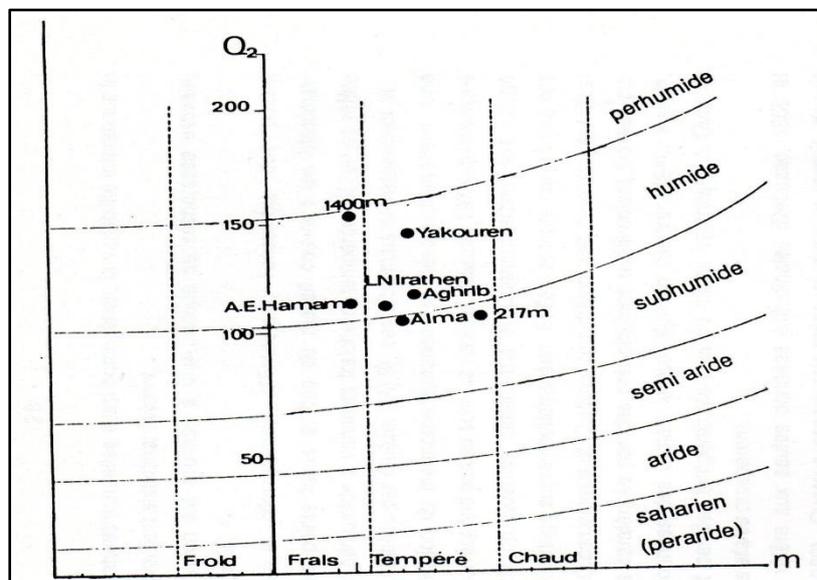


Figure.6 : Projection des postes météorologiques sur le climagramme d'Emberger.

Le diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gausson est une représentation graphique obtenue par la superposition des deux courbes de variation annuelle des précipitations et des températures. Ces dernières sont reliées par la relation :  $P = 2T$ .

Sont portées en abscisse les mois de l'année et en ordonnée les précipitations d'un coté et les températures de l'autre coté. (fig.7).

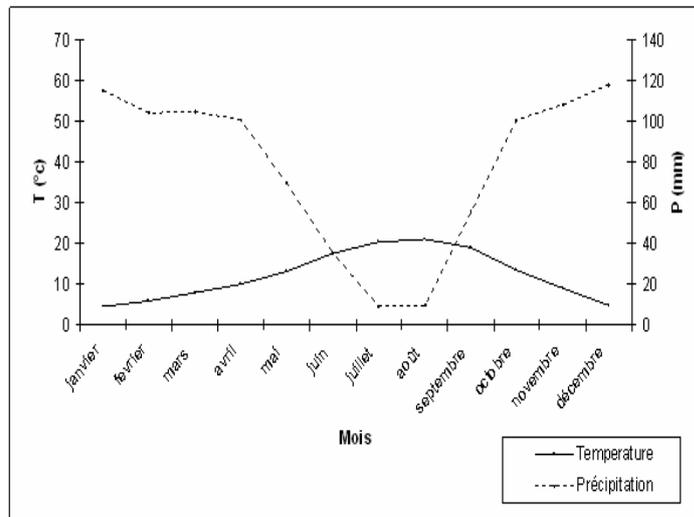


Figure.7 : Diagramme ombrothermique pour le point d'altitude moyenne de la forêt d'Akfadou.

Le diagramme réalisé montre que la période sèche s'étale de la mi-juin au début de septembre.

### III.1.3. La végétation

Sur le plan historique, les travaux de SALAMANI (1990, 1991) montrent que le cèdre de L'Atlas (*Cedrus atlantica*) avait connu une extension considérable dans les montagnes de Kabylie. Quant à la chênaie caducifoliée, elle a régné à moyenne altitude depuis au moins 9000 ans. L'auteur estime qu'il y a peu d'exemple d'une telle stabilité multimillénaire d'une formation forestière qui a pu s'entretenir, cette chênaie "monolithique" confirme certainement les grandes potentialités forestière de la zénaie de l'Akfadou. Il a été noté aussi un développement important du houx (*Ilex aquifolium*) durant près d'un millénaire indiquant des températures fraîches pendant cette période.

Bien avant, les macrorestes végétaux rencontrés dans les sédiments ont permis d'identifier le genre *Abies* à basse altitude (730m). Sur la base de la datation au  $C^{14}$ , ce genre couvrait l'actuelle zénaie et remontait à 25000 ans (MESSAOUDENE et DERRIDJ, 1996)

La réduction importante de l'aire du chêne liège qui est une espèce frileuse indiquerait une baisse des températures postérieurement à 7000 ans. La subéraie de la région a subi une régression au détriment des chênes à feuilles caduques.

Concernant d'autres espèces sylvatiques, des notations faibles de *Quercus ilex*, *Olea sp.*, et de *Pinus halepensis* s'expriment mieux durant la période actuelle, ce qui semble confirmer leur récente extension.

Actuellement, la forêt d'Akfadou est constituée essentiellement de peuplements de chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.), de chêne afarès (*Q. afares* Pomel) et de chêne liège (*Quercus suber* L.). Ces peuplements présentent une mosaïque d'âges divers. Le chêne zéen est l'essence dominante jusqu'à 1646 m d'altitude, où il occupe environ 45 % de la superficie boisée. Le chêne afarès abonde sur quelques lignes de crête, les versants sud et sud-ouest et les terrains caractérisés par des sols plus ou moins argileux. Le plus souvent, il est situé au dessous de 1250 m d'altitude. Les peuplements purs occupent environ 15 % de la surface boisée. Les peuplements mixtes de chêne zéen et de chêne afarès se retrouvent partout dans les zones de transition. Il en est de même pour les peuplements mixtes de chêne zéen et de chêne liège, limités à une altitude de 1100 m. Ces peuplements mixtes couvrent environ 25 % de la zone boisée. Quant au chêne liège à l'état pur, il occupe 15 % de la zone périphérique de l'Akfadou. De gros chênes zéens et afarès, âgés de plus de 500 ans, sont présents dans de nombreux sites. Ces individus témoignent de l'origine ancestrale de la chênaie de l'Akfadou (MESSAOUDENE, 1989). L'arboretum d'Agoulmine Aberkane, la châtaigneraie de Mahagga et celle de Tala-Kitane, la cédraie d'Adekar, les nombreuses aulnaies, les bouquets d'ifs (*Taxus baccata* L.) et de houx (*Ilex aquifolium* L.) méritent aussi une attention particulière. Bien qu'introduit en 1890 puis en 1948 à Agoulmime Aberkane et aux alentours, à Tala Kitane et à Adekar, plus précisément dans le cadre de programmes d'amélioration forestière, le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) forme actuellement de très belles cédraies perpétuées par une régénération naturelle très importante. Il en est de même pour le châtaignier (*Castanea sativa* Mill.), le pin noir (*Pinus nigra* Ait.), le pin coulter (*Pinus coulteri* D. Don.) et le cyprès (*Cupressus horizontalis* L.), introduits aussi en 1890 et 1948 dans l'arboretum d'Agoulmime Aberkane et à Lazella. *Abies numidica* (De Lann.) est représenté par 75 individus inventoriés au sud de la cédraie d'Agoulmime Aberkane. L'aulne glutineux (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.), l'if et le houx colonisent partout les stations les plus humides à tendance marécageuse de l'Akfadou, ainsi que les sources et cours d'eau. Parmi les espèces caducifoliées figurent aussi l'érable (*Acer obtusatum* W. et K.), le sorbier (*Sorbus torminalis* (L.) Crantz) et le merisier (*Cerasus avium* L.). L'érable peut parfois codominer avec le chêne zéen, voire le dominer pour constituer de véritables érablières occupant des surfaces assez réduites malgré tout. Le sorbier et le merisier, bien qu'assez fréquents, sont rarement abondants. Mais leur intérêt écologique est suffisamment important pour que les aires réduites où poussent ces espèces dans l'Akfadou soient protégées. (MESSAOUDENE et al, 2007).

## III.2. Choix des stations, échantillonnage et acquisition des données

### III.2.1. Choix des stations

La forêt d'Akfadou est caractérisée par une variabilité topographique, édaphique, géologique et floristique. Cette multitude de facteurs physiques a créé de nombreuses conditions microclimatiques d'où une différence à l'échelle des peuplements. Cette hétérogénéité structurale, résultat des exploitations antérieures (surtout entre 1939 – 1945) et

des conditions écologiques ci-dessus cités influence l'agencement des variables dendrométriques, la production et la productivité.

Le choix des stations a été dicté par deux impératifs essentiels. D'une part, la station doit être homogène en terme de densité et se trouvant dans une "ambiance forestière" (RATHGEBER et *al*, 2004).de ce fait, nous avons choisi des stations plus ou moins représentatives de l'Akfadou, tout en excluant les zones perturbées ou en lisière. Aussi, le site choisi doit pouvoir être appréhendé comme une station forestière, homogène sur les plans climatiques, édaphique, topographique et fournit une même production pendant la même période d'aménagement.

Le type d'échantillonnage préconisé dans de tell situation est l'échantillonnage stratifié (RONDEUX, 1993). Il sera opportun de diviser la population en sous unités plus homogènes appelées "strate" et de sonder celles-ci indépendamment les unes des autres. Ce type d'échantillonnage s'efforce de couvrir au maximum la variabilité en termes de sol, d'altitude, d'exposition et de densité dans la zone d'étude. Dans la mesure du possible, le choix s'est porté sur les peuplements les moins perturbés par le pâturage, le feu ou d'autres actions anthropiques.

En tout, six stations ont été choisies, où trois à quatre placettes circulaires de 200m<sup>2</sup> ont été délimitées et matérialisées sur terrain. Le choix de placette de forme circulaire est dicté par leur installation facile et rapide sur terrain. Elles permettent également de réduire considérablement le nombre de cas douteux d'appartenance ou non d'arbres à la placette (RONDEUX, 1993).

### III.2.2. Inventaire dendrométrique

L'inventaire et la description des peuplements sont un préalable indispensable à toute démarche de gestion forestière et de planification sylvicole (HUART et al, 2004). On s'intéresse à réaliser cet inventaire pour mettre en évidence la structure, la densité du peuplement et la différence du point de vue développement pour chaque station. Dans ce sens, la structure des peuplements est définie comme étant la manière avec laquelle sont agencées les variables dendrométriques d'un peuplement (STEWART et ROUSTIDE, 1974).

L'inventaire pied par pied a été réalisé dans chacune des placettes. Les mesures dendrométriques réalisées sont :

- Le diamètre (D) à 1,30m et estimé à l'aide du compas forestier ;
- Les circonférences (C) à 1,30 m estimés avec un ruban mètre ;
- La hauteur totale de l'arbre (H) mesurée à l'aide du "VERTEX III". Cet appareil suédois est préconisé dans ce genre d'étude nécessitant un maximum de précision (PAUWELS, 2001) ; L'erreur admise est de l'ordre de 5 cm avec des lectures directes ne nécessitant aucun calcul. De plus, plusieurs mesures peuvent être mémorisées. Le

*VERTEX III* de par son mode de conception effectue une correction automatique des mesures de hauteur en terrain présentant une forte pente.

Pour mieux caractériser chaque station, on a déterminé la pente moyenne (P%) mesurée par un clysimètre et la densité des peuplements par comptage d'arbre par surface de placette. Elle exprime une mesure quantitative absolue du degré d'occupation d'une surface par les arbres, elle est traduite par le volume ou le nombre d'arbre à l'hectare (RONDEUX, 1993). C'est un paramètre important permettant d'évaluer le facteur compétition dont son influence sur la croissance, la production et la structure des peuplements.

Elle est calculée par la formule suivante (exprimé en nombre de tige par hectare):

$$d = n \frac{10^4}{Sp} \quad (\text{O.N.F, 1981})$$

$\left\{ \begin{array}{l} d : \text{densité.} \\ n : \text{nombre de tige.} \\ Sp : \text{surface de la placette.} \end{array} \right.$

En plus des variables dendrométriques, la description de la station sur le plan édaphique et topographique (altitude et exposition) a été faite en utilisant un altimètre et une boussole forestière. Le tableau 1 récapitule les données stationnelles des six stations étudiées.

Tableau1. : Description des stations d'inventaire.

Station	Pente (%)	Exposition	Densité (tige/ha)	Altitude (m)	Substrat et sol
St. 1	10%	Sud-est	612 tiges/ha	1140	Sol filtrant, sur éboulis, charge caillouteuse moyenne.
St. 2	13%	nord	300 tiges/ha	1170	Sol argileux (zone de transition éboulis du quaternaire – argile sous numidienne).
St. 3	46%	Nord-est	1416 tiges/ha	1080	Sol brun lessivé, profond et humifère (sur grés numidien).
St. 4	40%	Nord-ouest	1133 tiges/ha	1100	Sol brun lessivé, profond et humifère. (sur grés numidien).
St. 5	58%	ouest	867 tiges/ha	1030	Sol brun lessivé, sur grés (présence de signe d'érosion).
St. 6	15%	Nord-ouest	1015 tiges/ha	1550	Sol brun lessivé, peu d'humus, signes de piétinement accentué.

### III.2.3. Détermination de l'âge des arbres

Dans l'objectif de modélisation et/ou d'ajustement de modèles entre le diamètre, la hauteur et l'âge, nous avons caractérisé l'âge des arbres par comptage des cernes sur des rondelles prélevées à 1.30m du sol et ce en raison des contraintes d'extraction de carottes avec la tarière de Pressler.

Au totale, 63 rondelle ont été sélectionnées ; celles qui présentant des déformations sont éliminées). Après polissage, l'âge absolu est estimé sur trois directions pour éviter sa surestimation ou sa sous-estimation.

### **III.3. Méthode de traitement des données**

#### **III.3.1. La structure des peuplements**

Dans le contexte de ce travail, l'inventaire dendrométrique réalisé a pour objet supplémentaire la mise en évidence de la structure des formations étudiées. Cette dernière est définie comme étant la manière avec laquelle sont agencées les variables dendrométriques d'un peuplement (STEWART et ROUSTIDE, 1974) et que nous considérons comme variable explicative de la croissance, de la production et du développement global d'un peuplement.

La structure du peuplement est représentée par la répartition du nombre de tiges en fonction des classes de diamètre qui obéit à certaines lois. Dans un peuplement régulier, les tiges se répartissent suivant la loi de Gausse (loi Normale), alors que dans un peuplement irrégulier la distribution des tiges est représentée par une courbe exponentielle (PARDE et BOUCHON, 1988). L'analyse de la stabilité des peuplements requiert une bonne description de leur structure, c'est-à-dire de la distribution des caractéristiques individuelles des tiges (généralement représentée sous forme d'histogrammes) et de leur répartition spatiale.

Malgré l'implication importante de la structure, dont la hiérarchie sociale en dépend fortement, dans la construction de la plupart des modèles surtout ceux architecturaux (GOREAU, 2000). On s'est limité, dans notre cas, aux caractéristiques dendrométriques classiques et à la densité, les modèles issues s'avèrent suffisants pour reproduire l'hétérogénéité écologique et structurale des stations (FORTIN et *al*, 2009).

De nombreuses distributions théoriques ont été utilisées pour caractériser la structure de peuplements forestiers (LEJEUNE, 1994). Parmi les principales, il convient de citer les distributions normales, log-normale, gamma, beta et Weibull. DAGNELIE et RONDEUX (1971) considèrent que la distribution Log-normale donne des résultats satisfaisant. Dans ce travail, nous avons opté pour la distribution normale dont la mise en œuvre et les testes de représentativité sont simples (conformité des mesures au modèle théorique).

Au cours de l'inventaire, nous avons mesuré au total 342 tiges réparties aux six stations et regroupées en classes de 5cm d'intervalle. Les histogrammes de fréquence des classes sont donnés par le logiciel STATISTICA, l'avantage de ce dernier est qu'il permet au même temps un ajustement graphique avec la loi Normale et ce pour vérifier la nature de la distribution. L'approximation des distributions établies par la loi Normale est une opération primordiale, elle permet la confirmation de la représentativité de l'échantillon par rapport à la population (DAGNELIE, 1973) ainsi que des tests statistiques qui seront utilisés tout au long du travail exigent que la population suit une loi Normale. Pour vérifier cette condition, on utilise souvent le test de KOLMOGOROV - SMIRNOV.

L'utilisation de la droite d'HENRY permet aussi une vérification de la Normalité, c'est une méthode graphique pour ajuster une distribution gaussienne à celle d'une série d'observations, son avantage est qu'on peut tester la distribution normale suivant chaque classe de diamètre ou de hauteur.

### III.3.2. Traitement statistique

#### III.3.2.1. Statistique descriptive

Cette partie concernera la description aussi exhaustive que possible des mesures prises en compte sur terrain pour chaque station. Elle regroupe les nombreuses techniques utilisées pour décrire un ensemble relativement important de données. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories : La tendance centrale, les paramètres de dispersion et les paramètres de forme. Les paramètres utilisés sont représentés dans le tableau (2).

Tableau2 : Paramètres et formules des statistiques descriptives calculés.

Catégories	Paramètres	Formule de calcul
<b>Tendance centrale</b>	Moyenne arithmétique	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$
<b>Paramètres de dispersion</b>	Ecart type	$\sigma = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
	Variance	$\sigma^2$
	Coef. de variation	$CV = \frac{\sigma}{\bar{X}}$
<b>Paramètres de forme</b>	Coef. d'aplatissement (Kurtosis)	$\beta = \frac{(n+1)n}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} - \frac{(n-1)^2}{(n-2)(n-3)}$
	Coef. d'asymétrie	$\gamma = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \right)^3$

#### III.3.2.2. Comparaison et appréciation des différences

Pour comparer les moyennes des différentes séries de données, on a opté pour l'analyse de la variance à un seul facteur de classification afin de mettre en évidence les différences éventuelles qui pourrait exister entre les groupes. Le tableau d'analyse de la variance issue de cette analyse permettra de vérifier s'il y a une différence significative de la croissance en hauteur et en diamètre entre les stations étudiées.

### III.3.2.3. Affinités entre stations et variables

L'analyse de la variance permet de déceler des différences significatives entre groupes mais elle est incapable de préciser quels groupes ont une affinité entre eux. Cette problématique peut être résolue par une analyse en composantes principales, elle est utilisée pour la détermination d'éventuels groupes homogènes pour les stations étudiés ainsi que pour étudier les corrélations entre les variables d'une part et avec mesures effectuées d'autre part.

### III.4. Méthode de modélisation

Les modèles de croissance des forêts ont été construits à partir de la théorie dendrométrique de la production des peuplements (HOULLIER et *al*, 1991), reposant sur deux propriétés d'invariance fondamentales. La première, appelée loi de Eichhorn, exprime le fait que la croissance en hauteur et la production en volume des peuplements denses sont liées par une équation unique, quelle que soit la fertilité de la station. La seconde exprime la quasi-insensibilité de la croissance en hauteur vis-à-vis de la compétition (LANNER, 1985). (Fig.8). Dès lors, les différences de productivité entre stations, liées au climat ou au sol, peuvent être estimées grâce à des variations analogues de la croissance en hauteur, résumées dans le concept d'indice de fertilité (GOREAUD et *al*, 2005).

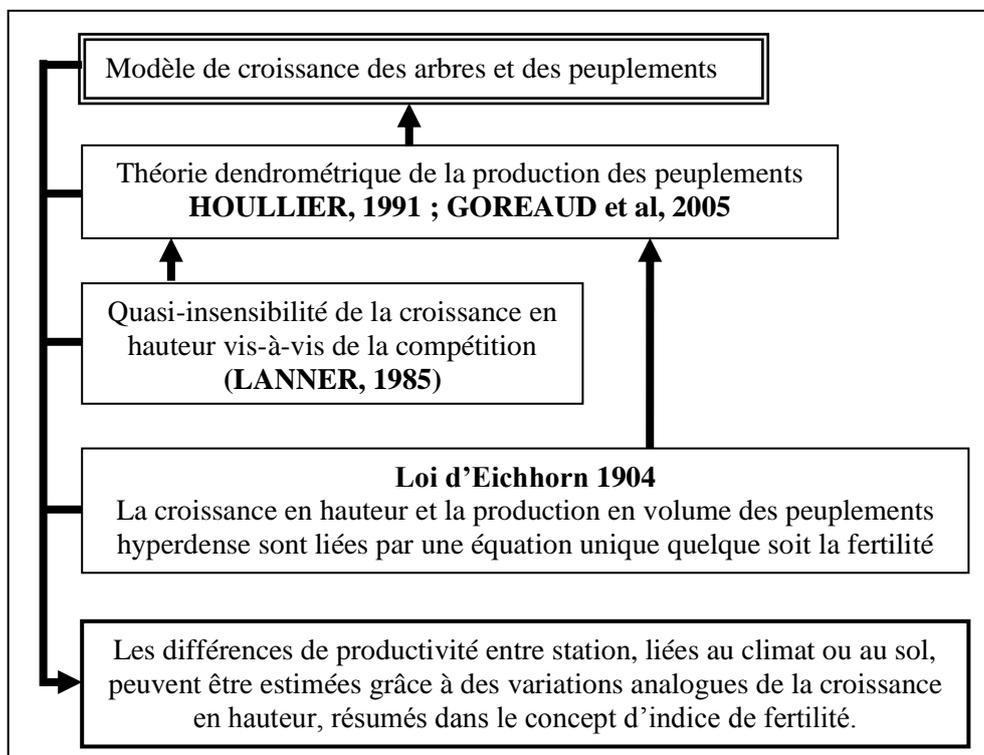


Figure.8 : Schéma du principe de la modélisation en peuplements forestiers.

### III.4.1. Construction des modèles

Les opérations qui consiste à aménager et à gérer un espace forestier tient compte du milieu physique (sol, climat...) et biotique (essence, peuplements...), pour lesquels la modélisation de la croissance des arbres et des peuplements cherche à trouver des structures représentatives des données (GOREAUD et *al*, 2005).

Les phénomènes biotique, abiotique et leur interactions susceptibles d'être schématisés par la modélisation sont tellement hétérogène et complexes qu'il n'existe pas une structure unique commune à tout les modèles, souvent, la nature des données disponibles déterminera le structure du modèle.

Le volet modélisation de la croissance pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) est très peu abordé en Algérie si l'on excepte les travaux de MOKHTARI (2006) pour les chênaies des Ait Ghobri (Tizi – ouzou) et de Souk Ahras. Dans notre travail, nous étions affronté à l'absence de modèles pour le chêne zéen, la première tâche dans ce genre de situation a consisté à rechercher une équation qui s'ajuste bien aux données (FONWEBAN et HOULLIER, 1995).

Nous avons testé des équations d'ajustement des nuages de points proposé par le logiciel STATISTICA. En effet, c'est une méthode de régression basé sur la méthode des moindres carrés et qui a montré son efficacité dans l'explication des variables appelées "expliquée" en fonction d'autres dites "explicative" (BESSE, 2003). La suppression des outliers (valeurs aberrantes ou extrêmes) a pour rôle l'amélioration de la qualité de la régression. Pour l'ajustement des données de terrains, on a utilisé les modèles suivant :

- Modèle linéaire :  $Y = a_0 + a_1X + \varepsilon$ .
- Modèle polynomiale :  $Y = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_nX^n + \varepsilon$ .
- Modèle logarithmique :  $Y = a_0 + a_1\log X + \varepsilon$ .
- Modèle de puissance :  $Y = a_0 + a_1X^{a_2} + \varepsilon$ .
- Modèle exponentiel :  $Y = a_0 + a_1e^{a_2X + a_3} + \varepsilon$ .

### III.4.2. Ajustement à des modèles existants (paramétrage)

Comme nous l'avons signalé ci-dessus, l'inexistence de modèles pour le chêne zéen nous a incités à tester des modèles déjà initiés par de nombreux auteurs et appliqués à de nombreuses espèces pour vérifier leur compatibilité avec nos données. Cette démarche est motivé par la constatations d'une origine commune de la plus part des modèles de croissance (CHAPMAN-RICHARDS, 1959-1961) ainsi que des travaux déjà réalisés dans ce sens (DELEUZE et *al*, 1996 ; BEDARD, 2002; RATHGEBER et *al*, 2004 ; FORTIN et *al*, 2009 ; SGHAIER et GARCHI, 2009).

Cependant, le champ d'application des modèles est biotiquement et abiotiquement limités et que toute extrapolation sera hasardeuse à condition que les tests de compatibilité (coefficient de détermination maximal, variance résiduelle minimale...) soient significatifs.

Le tableau (3) représente les différents modèles repris de la littérature. Nos données de terrain seront par la suite ajustées.

Tableau 3 : Modèles retenus pour l'ajustement aux données de terrain.

Auteurs	Variables	Modèles
CHAPMAN-RICHARDS (1959)	H-âge	$H = k_1 (1 - \text{Exp}(k_2 \cdot \text{âge}))^{k_3}$
DOHTE et De HERCE (1994)	H - C	$H(C) = \frac{U_1 + U_2 C - \sqrt{(U_1 + U_2 C)^2 - 4U_1 U_2 U_3 C}}{2U_3} + 1.3$
BEDARD (2002)	H - âge	$H = 1,3 + b_1 [1 - e^{(-b_2 \cdot \text{âge})}]^{b_3}$
DUPLAT et TRAN-HA (1986) in RATHGEBER et al (2004)	H - âge	$H = (a - \ln(\text{âge} + 1) + b) \left[ 1 - \exp\left(-\left(\frac{\text{âge}}{c}\right)^d\right) \right]$

La méthode de cet ajustement consiste à estimer les paramètres inconnus du modèle à l'aide d'un logiciel permettant des régressions non linéaires personnalisées (SAS ou STATISTICA), La méthode repose sur une estimation non linéaire par itération des moindres carrés utilisant un algorithme de type LEVENBERG-MARQUARDT ou de type GAUSS-NEWTON (DELEUZE et al, 1996).

### III.4.3. Qualité et précision des modèles

La qualité des ajustements est étroitement liée à sa précision, celle-ci est évaluée par plusieurs paramètres statistiques (arithmétiques et graphiques) parmi lesquelles on se contentera de ceux-ci :

#### III.4.3.1. Le coefficient de détermination ( $R^2$ )

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est un indicateur qui permet de juger la qualité d'une régression linéaire, simple ou multiple. D'une valeur comprise entre 0 et 1, il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées. Certes, le  $R^2$  a ses imperfections, mais son utilité n'a d'égale que sa simplicité. Le ( $R^2$ ) se définit comme la part de variance expliquée par rapport à la variance totale.

Il est exprimé par la formule suivante :  $R^2 = 1 - \frac{SCR}{SCT}$

#### III.4.3.2. L'AIC (Akaike Information Criterion)

C'est un outil efficace pour le choix et la sélection du modèle qui représente le mieux la réalité du terrain (AKAIKE, 1973 in BEAL, 2005). Il est basé sur la méthode du maximum de vraisemblance dont les résultats et le principe serait identiques avec la méthode des moindres carrés. En fait, l'AIC évalue la ressemblance entre le modèle estimé et le modèle "réel théorique", donc les meilleurs modèles montrent des valeurs minimales d'AIC.

Il est fonction du nombre d'observation ( $n$ ), de la somme des carrés des résidus (SCR) et du nombre de variables, comme le montre la formule suivante :

$$AIC = n \cdot \ln\left(\frac{SCR}{n}\right) + 2p$$

### III.4.3.3. Carré moyen résiduel (CMR)

Appelé aussi variance résiduelle sans biais (PAUWELS, 1999). C'est un indicateur des écarts entre les observations et les estimations du modèle, il représente la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les prévisions et les observations, le modèle est d'autant plus efficace que le CMR tend vers zéro. L'avantage de son utilisation par rapport à la moyenne des résidus (MR) est qu'il tient compte du nombre de paramètre surtout en cas d'une régression multiple. Il est formulé par l'équation suivante ( $p$  étant le nombre de paramètres dépendants et indépendants) :

$$CMR = \frac{1}{n-p} \sum_{j=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

### III.4.3.4. Rapport de variance

Utilisé par SGHAIER et GARCHI (2009), c'est une comparaison entre la variance estimée et observée. Si le rapport est proche de 1, le modèle est acceptable :

$$RV = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum_{j=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

### III.4.3.5. Analyse des résidus

Les testes arithmétiques précédemment énumérés s'avère insuffisants pour contrôler la qualité d'un modèle construit. FONWEBAN et HOULLIER (1995) estiment que l'examen visuel et le comportement qualitatif des résidus sont essentiels pour se prononcer sur la validation et la cohérence des modèles. Ces testes supplémentaires sont présentés comme suit :

- **Histogramme des résidus** : c'est un examen visuel qui permet de vérifier la normalité des résidus ainsi que leur moyenne nulle.
- **Tracée normal des résidus** : Dans le cadre d'une régression ou d'un lissage, on peut visualiser la droite de Henry des résidus afin de s'assurer que leur distribution ne s'éloigne pas trop d'une loi normale. Elle permet en outre de détecter d'éventuels valeurs aberrantes.

- **Postulat d'homogénéité des résidus** : c'est une représentation graphique sous forme de nuage de points des résidus en fonction des prévisions. Il permet d'évaluer la divergence des valeurs prévues autour de la droite représentative des résidus nuls (FORTIN et *al*, 2009). Pour une divergence acceptable, le nuage de point forme une masse homogène autour de la droite de résidus nuls.
- **Tracée des résidus en fonction d'un gradient écologique** : la méthode consiste à classer un paramètre écologique sous forme d'un gradient croissant ou décroissant, ensuite représenter graphiquement les résidus en fonction du gradient choisi. L'interprétation va se basé sur la tendance et l'allure suivis par les résidus. La méthode est inspirée des travaux de FONWEBAN et HOULLIER (1995) portant sur la modélisation par hauteur dominante de la croissance de l'eucalyptus. Pour notre travail, on a classé les paramètres écologiques comme suit : la pente, l'altitude et la densité par ordre croissant ; l'exposition est classée par ordre décroissant de fraîcheur.

# Chapitre : 4

## Résultats et discussions

### IV.1. Analyse descriptive des paramètres dendrométriques

On déduit du tableau 4 que les moyennes des circonférences varient entre 114.02 et 76.65cm, la valeur maximale est observée dans la St.1 par contre celle minimale dans la St.3. Les diamètres ne varient pas grandement, de 23cm (St.6) à 25.5cm pour la (St.1). L'absence de diamètre faible est la conséquence de la stratégie d'échantillonnage qui omet d'inclure les tiges de faibles et de grands diamètres et cela pour éviter le biais que peut provoquer ce genre de valeurs extrêmes.

Quant aux hauteurs totales, le tableau récapitulatif ne montre pas de grandes dissimilarités des hauteurs moyenne des six stations, elles sont comprises entre 10.88m (St.2) et 13.57m (St.3). La mise en exergue des différences de densité par le choix des stations échantillonnées ne semble pas avoir un effet sur les hauteurs totales. L'insensibilité de la croissance en hauteur des peuplements moyennement denses à l'espacement a été mise en évidence par LANNER (1985). En effet, l'auteur a montré que les phénomènes physiologiques inhérents à la croissance et au comportement des méristèmes apicaux tel que l'élongation des entre-nœuds contenus à l'intérieur des bourgeons sont indifférent aux conditions environnementales. Cependant, l'élongation est plutôt liée au nombre d'ébauches d'entre-nœuds formé l'année précédente. Par contre, le comportement des méristèmes latéraux comme l'a souligné FRITTS (1976) ne montre pas d'éléments de préformation.

Dans toutes les stations et pour tous les paramètres dendrométriques, les valeurs du coefficient de variation observées sont sensiblement faibles (0.04 à 0.19), cela traduit une dispersion insignifiante des mesures autour de leur moyenne à l'intérieur de la station. Un

paramètre de dispersion faible témoigne de l'homogénéité des caractéristiques dendrométriques des tiges mesurées à l'intérieur de l'unité d'échantillonnage, ils attestent la qualité de l'échantillonnage progressif stratifié entrepris ainsi que sur le bon choix des stations.

La St.6 se discrimine par des valeurs les plus faibles, elle renferme le plus jeune peuplement issu des exploitations et des coupes délictuelles très marquées dans la région. En revanche, la St.1 se caractérise par les valeurs les plus élevées. Les données disponibles ne nous permettent pas de se prononcer sur l'origine de cette différence de croissance. Certes, un contraste écologique existe entre les deux stations (tab.1). Les éboulis semblent être plus favorables à la croissance du chêne zéen (MESSAOUDENE, 1989). En outre, la densité de la St.1 apparaît également, plus favorable ; la St.6 est plus dense où les compétitions seraient accrues.

La St.2 fait exception, bien qu'elle renferme une faible densité, elle ne répond pas à cette règle. On peut penser que son substrat argileux en serait la cause. Dans ce type de substrat, les sols à hydromorphie temporaire provoquent l'asphyxie des racines d'ou l'impact sur la croissance en hauteur et en diamètre.

Les facteurs sus-cités à savoir l'effet de la densité et du type du sol expliquent probablement les différences de grandeur des paramètres dendrométriques (diamètre et circonférence). L'absence de données plus précise notamment sur l'historique des peuplements et les constituants du sol ne nous permet pas d'être catégoriques sur cette question.

L'observation du coefficient d'aplatissement (Kurtosis) et du coefficient d'asymétrie montre une légère hétérogénéité des placettes quant à la distribution de leurs hauteurs et de leurs diamètres (tab.4). Les valeurs du Kurtosis observées pour tous les paramètres et pour toutes les stations sont inférieures à 3 ( $\beta = -0.003$  à  $1.63$ ), les distributions issues sont platykurtiques (trop plate comparée à la distribution Normale). Quant au coefficient d'asymétrie, il présente des valeurs positive et négative sans beaucoup s'éloigner de 0 ( $\gamma = -0.26$  à  $1.36$ ) donc les distributions sont légèrement décalées de part et d'autres de la distribution Normale. Ceci pourrait résulter des opérations sylvicoles menées dans le passé (MESSAOUDENE, 1989).

Ces résultats qui confirment la normalité de nos échantillons sont en réalité la conséquence du choix des stations inventoriés. En effet, l'inventaire n'a pas pris en compte les valeurs trop petite ou trop grande (valeurs extrêmes) qui peuvent biaiser les résultats. La discussion approfondie de ces deux paramètres de forme ( $\beta$  et  $\gamma$ ) aura un intérêt certain dans l'étude de la structure des peuplements qui sera détaillé dans les paragraphes suivants.

Tab.4 : Analyse descriptive de la circonférence, du diamètre et de la hauteur.

Station	Par.den.	$\bar{X}$	$\sigma$	$\sigma^2$	CV	Kurtosis	Coef. d'asymétrie
St.1	C	114.02	16.61	276.02	0.14	-0.26	0.11
	D	35.69	5.27	27.81	0.15	-0.003	0.16
	H	12.74	1.72	2.96	0.13	1.63	1.36
St.2	C	83.93	8.79	77.24	0.10	-0.96	0.27
	D	26.13	2.83	8.05	0.11	-0.80	0.16
	H	10.88	1.10	1.22	0.11	-0.10	-0.63
St.3	C	76.65	5.92	35.12	0.07	0.16	0.44
	D	24.17	1.91	3.68	0.08	0.21	0.48
	H	13.57	1.54	2.40	0.11	-1.20	0.18
St.4	C	84.11	5.21	27.14	0.06	-0.41	-0.26
	D	26.58	1.68	2.85	0.06	-0.19	-0.39
	H	12.83	0.90	0.81	0.07	-0.49	0.70
St.5	C	95.21	6.74	45.50	0.08	-0.51	-0.35
	D	30.27	2.27	5.19	0.07	-0.43	-0.36
	H	12.00	0.58	0.34	0.04	-0.53	0.01
St.6	C	77.29	13.99	195.77	0.18	-0.06	0.52
	D	23.13	4.52	20.47	0.19	0.90	0.91
	H	10.90	1.17	1.37	0.10	0.35	0.54

$\bar{X}$  : moyenne arithmétique ;  $\sigma$  : écart-type ;  $\sigma^2$  : variance ; CV : coefficient de variation.

C : circonférence (cm) ; D : diamètre (cm) ; H : hauteur totale (m).

#### IV.2. Appréciation de l'hétérogénéité des peuplements

L'analyse de la variance à un facteur de classification a été réalisé pour vérifier l'hypothèse d'égalité des hauteurs, des diamètres et des circonférences au niveau de significativité  $\alpha = 0,05$  (tab.5).

Tableau.5 : Comparaison des moyennes par l'analyse de la variance (effet station).

	Source de variation	DDL	SCE	CM	F	P
Circonférence	V. factorielle	5	54986	10997	108.96**	0.000
	V. résiduelle	336	339112	101		
	V. totale	341	88898			
Diamètre	V. factorielle	5	5868.1	1173.6	112.03**	0.000
	V. résiduelle	336	3519.8	10.5		
	V. totale	341	9387.9			
Hauteur	V. factorielle	5	337.27	67.45	42.93*	0.000
	V. résiduelle	336	527.89	1.57		
	V. totale	341	865.16			

\* niveau de significativité à  $\alpha = 0,05$ .

L'observation du tableau (5) montre que la variabilité des circonférences et des diamètres des tiges indique un très haut niveau de significativité, mais une variabilité moins marquée est observée pour les hauteurs. Cette variabilité est expliquée par le facteur

espacement qui influe sur la densité ; cette dernière varie de 300 tige / ha (St.2) à 1416 tige / ha (St.3). La croissance en hauteur est favorisée par des peuplements serrés alors que celle en diamètre par des peuplements moins denses.

La figure 9, représentant les écarts-types à la moyenne des trois variables (circonférence, diamètre et hauteur), fournit d'autres éléments d'information sur la variabilité constatée. Elle montre pour A et B un profile identique, cela est lié à la redondance des variables (diamètre et circonférence).

La figure C schématise une tendance différente où la St.3 s'individualise par la variabilité de ces hauteurs ; elle représente la station la plus dense (1416 tiges /ha). La fermeture du houppier et du peuplement avantage la compétition au niveau de la cime d'où la stimulation de la croissance en hauteur du chêne zéen. Néanmoins, l'irrégularité du facteur espacement à l'intérieur du peuplement explique la variabilité des hauteurs observées dans cette station. Dans cette même optique, LETREUCH-BELAROUCI (1998) estime que la relation inversement proportionnel "densité – accroissement en diamètre" est limitée, il admet que pour les densités suffisamment faibles, le potentiel d'accroissement stationnel n'est plus utilisé et que ce dernier chute sensiblement.

A partir de ces résultats, on dira que l'effet station est bien présent donc les six stations sont hétérogènes du point de vue circonférence, diamètre et hauteur.

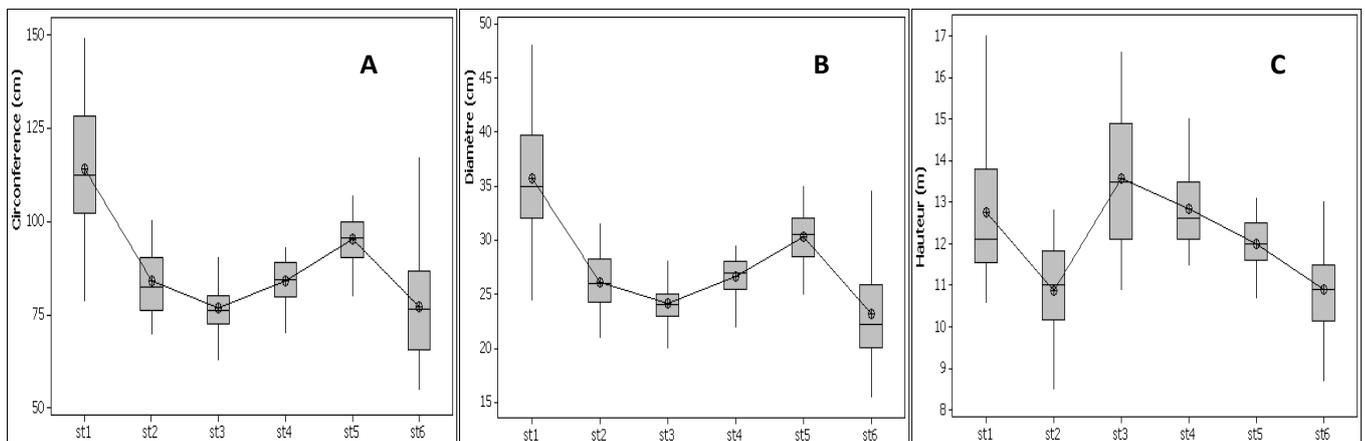


Figure.9 : Présentation graphique de la variabilité de la Cir. (A), Diam. (B) et de la Haut. (C) entre stations et à l'intérieur du peuplement.

### IV.3. Affinités entre les variables et les stations

Comme indiqué en méthodologie, l'analyse en composantes principales (ACP) est utilisée pour dégager les affinités entre les différentes variables introduites dans cette étude et éventuellement des ressemblances entre les stations (DECOURT et *al*, 1969). Ainsi, la matrice des données est composée des paramètres de terrain (densité, pente, exposition, type de sol et altitude) et les critères dendrométriques (H, C, D).

L'examen des valeurs propres issues de l'ACP permet de retenir le plan factoriel 1\*2, qui expliquent 79,54 % de la variance totale, soit 47,61% pour l'axe 1 et 31,93% pour l'axe 2 (tab.6).

Tableau 6 : Valeurs propres issues de l'ACP.

	Val. propres	% Total	Cumul	Cumul %
<b>1</b>	3,80	47,61	3,80	47,61
<b>2</b>	2,55	31,93	6,36	<b>79,54</b>
<b>3</b>	0,98	12,32	7,34	91,87
<b>4</b>	0,63	7,96	7,98	99,83
<b>5</b>	0,01	0,16	8,00	100,00

La projection des variables sur le cercle des corrélations montre une nette opposition entre les deux variables dendrométriques (D et C) et la densité. Par ailleurs la hauteur s'oppose à l'altitude, ce qui semble expliquer que la hauteur diminue avec l'altitude. L'effet des neiges abondantes peut expliquer d'une part ce résultat. D'autre part on peut l'attribuer à la corrélation positive entre l'altitude et le gradient croissant de la fertilité des sols. En effet, l'étude des sols de l'Akfadou (GELARD, 1978) montre que plus on s'éloigne des vide forestiers (terrains argileux) plus on rentre dans les moins argileux (grés numidiens).

La corrélation négative entre la pente et la croissance en grosseur s'expliquerait par une perturbation, en cas de forte pente, de l'alimentation hydrique. LEMOINE (1981) établit le même constat sur le pin maritime et montre l'importance qu'occupe ce facteur. D'après cet auteur, la position topographique conditionne aussi bien l'alimentation en eau (pertes et apports latéraux) que la nutrition (érosion, entraînement des éléments et accumulation en bas de pente) (fig.10).

Les relations positives entre la densité et les variables de grosseur de l'arbre expliquent la logique déjà abordée sur l'influence de la densité sur la croissance en hauteur et en diamètre du chêne zéen.

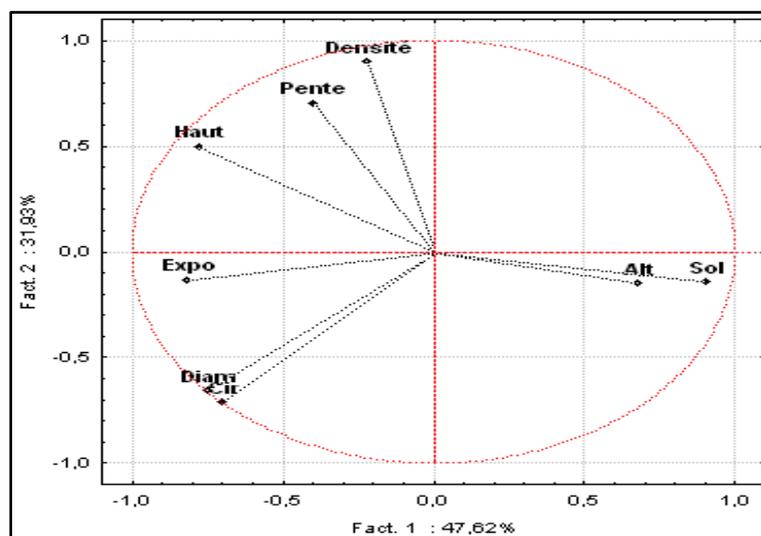


Figure.10 : Projection des variables sur le plan factoriel retenu.

Par rapport à ces variables, la projection des stations sur le plan factoriel retenu montre des divergences et des analogies entre elles (fig.11). Ainsi, trois groupes sont formés :

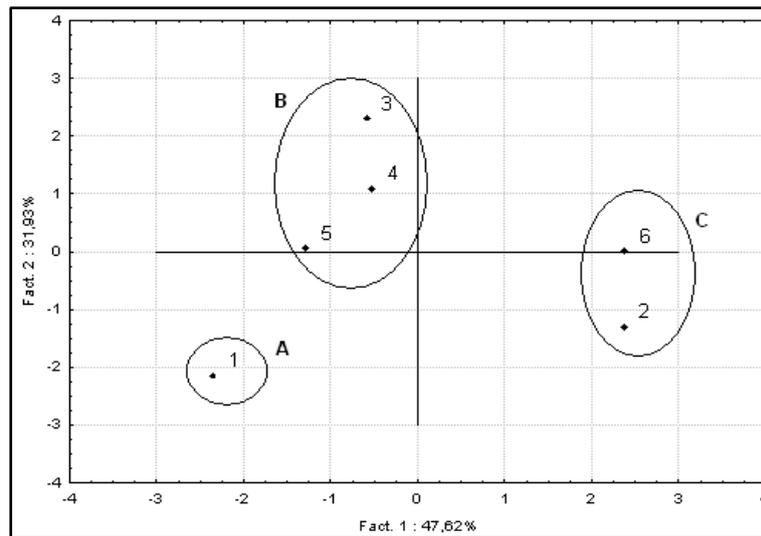


Figure.11 : Projection des stations sur le plan factoriel retenu.

Groupe A : où seule la St.1 apparaît ; elle est située dans la zone la plus productive, et enregistre la plus grande valeur de la croissance en diamètre. Les arbres y trouvent les conditions les plus favorables (sol filtrant, densité acceptable, pente moyenne).

Groupe B : regroupe les stations 3, 4 et 5 où les conditions stationnelles sont en générale favorable mais elles sont intermédiaires en termes de croissance en diamètre. En revanche, la croissance en hauteur se caractérise par des valeurs élevées.

Groupe C : renferme les St.2 et St.6, avec des accroissements faibles en grosseur liés à des conditions défavorables. La St.2 située sur un sol argileux non approprié à la croissance du chêne zéen. Par contre la St.6, malgré qu'elle est constituée d'arbres jeunes, elle est soumise à des conditions extrêmes de haute altitude et qui pourrait être la cause de ce ralentissement de la croissance.

Il ressort que l'axe 1 interprète le gradient de fertilité des stations en relation avec l'altitude et le sol. Quant à l'axe 2, il traduit l'effet de la densité sur les composantes D et H. En effet, la différence entre les deux stations réside dans leurs densités d'arbres à l'hectare, 612 arbres/ha pour la St.1 et 1416 arbres /ha pour la St.3. les deux stations s'oppose nettement par rapport à l'axe 2.

#### IV.4. Normalité et structure des peuplements

L'application de l'ajustement à la loi Normale avec l'intervalle de confiance (IC : 95%) sert à rechercher la qualité de l'approximation de la distribution de la variable par cette loi et de savoir si nos échantillons proviennent d'une population qui suit une loi Normale. Il est important aussi de pouvoir apprécier si la distribution théorique que l'on utilise donne une bonne représentation de la distribution des tiges d'un peuplement. Pour cet objectif, on a utilisé le test de KOLMOGOROV-SMIRNOV ainsi qu'une méthode graphique (Droite de Henry avec IC).

Le test de K-S compare la fonction de répartition empirique des données échantillons (K-S observé) à la distribution qui pourrait être attendue si les données étaient normales (K-S théorique). Si cette différence observée est suffisamment importante, le test rejette l'hypothèse nulle de la normalité de la population. Si la valeur de  $p$  de ce test est inférieure au niveau de signification ( $\alpha = 0,05$ ), on rejette l'hypothèse nulle et conclure que la population est non Normale. Les résultats représentés dans le tableau (7) montrent que les individus de toutes les stations suivent parfaitement la loi Normale, autrement dit de structure régulière ou équiennne

Tableau 7 : Appréciation de la distribution des arbres par le test K-S.

Station	K-S observé	K-S théorique	$P$
St. 1	0.096	0.188	> 0.150
St. 2	0.110	0.269	> 0.150
St. 3	0.074	0.145	> 0.150
St. 4	0.085	0.159	> 0.150
St. 5	0.091	0.188	> 0.150
St. 6	0.092	0.172	> 0.150

Egalement, l'ajustement des données à la droite d'Henry montre que les mesures à l'intérieur de l'intervalle de confiance sont, dans l'ensemble Normales (fig.12). Cependant, on remarque que les individus des catégories minimales et maximales s'éloignent de cet intervalle que nous pouvons attribuer aux perturbations que les arbres jeunes ou vieux peuvent subir au cours de leurs croissances, par conséquent la régularité de croissance du peuplement se trouve à son tour perturbée.

En langage forestier classique, la structure d'un peuplement c'est simplement l'histogramme du nombre de tige par catégories de diamètres (BOUCHON, 1979). La figure 13 confirme la régularité des peuplements ; les arbres suivent la distribution unimodale caractéristique des peuplements équiennes (RONDEUX, 1993). Dans ce cas, les dimensions sont réparties autour de la moyenne selon une distribution gaussienne en cloche dissymétrique (LETREUCH-BELAROUCCI, 1992). Cette équienneté est aussi confirmé par l'âge plus ou moins proche des arbres de chacun des peuplements, et ce par comptage des cernes. Néanmoins, une dissymétrie à droite ou à gauche caractérise l'ensemble des stations qu'on pourrait rattacher aux coupes et exploitations du passé.

Pour évaluer quantitativement cette dissymétrie par rapport à la distribution théorique, nous avons calculé les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Les valeurs du coefficient d'asymétrie calculé varient de -0.26 (St.4) à 0.91 (St.6), à l'exception de la station 1 dont la distribution des hauteurs est légèrement décalée à gauche ( $\gamma = 1.36$ ), c'est le résultat d'une dominance de l'effectif des individus de faible diamètre.

Cependant, le kurtosis des distributions de toutes les stations est inférieur à 3 donc les distributions sont plates par rapport à celle Normale, ce résultat est attribué aux faibles effectifs des dimensions centrales, il signifie aussi une grande dispersion par rapport à la moyenne. Quant à l'évolution probable des peuplements, il indique qu'un déséquilibre futur (perte de la normalité) peut toucher les peuplements.

Naturellement, les distributions des stations sont presque identiques. Les classes de diamètres de toutes les stations se distribuent selon une fonction voisine d'une courbe de Gausse. Néanmoins, l'examen visuel des histogrammes suggère quelques commentaires :

- La présence de certaines classes dans certaines stations et leur absence dans d'autres pourrait correspondre à des événements spécifiques qui ne se présentent pas uniformément dans les stations, et qu'on peut rattacher à des perturbations liées aux coupes ou aux exploitations et même au passage d'incendies.
- Les effectifs de la St.6 apparaissent déséquilibrés et la structure montre un décalage vers les petites catégories. Il n'est pas douteux que la jeunesse du peuplement soit l'origine de cette situation. Cependant, le décalage à droite de la St.1 est la conséquence de la domination des gros diamètres. Ce résultat est un signe de production élevée, mais l'absence des petits diamètres est un indicateur d'une régénération faible. La St.5 apparaît la plus équilibrée, les effectifs sont graduellement représentés avec la dominance de ceux des classes centrales (proche de la moyenne).

A ce stade d'analyse, on peut conclure que malgré la présence de ressemblance entre les stations, le contraste écologique qui les caractérise a induit des différences significatives au niveau structural et de la croissance. L'effet de la densité et du type du sol sur les paramètres dendrométriques mesurés est assez bien mis en évidence.

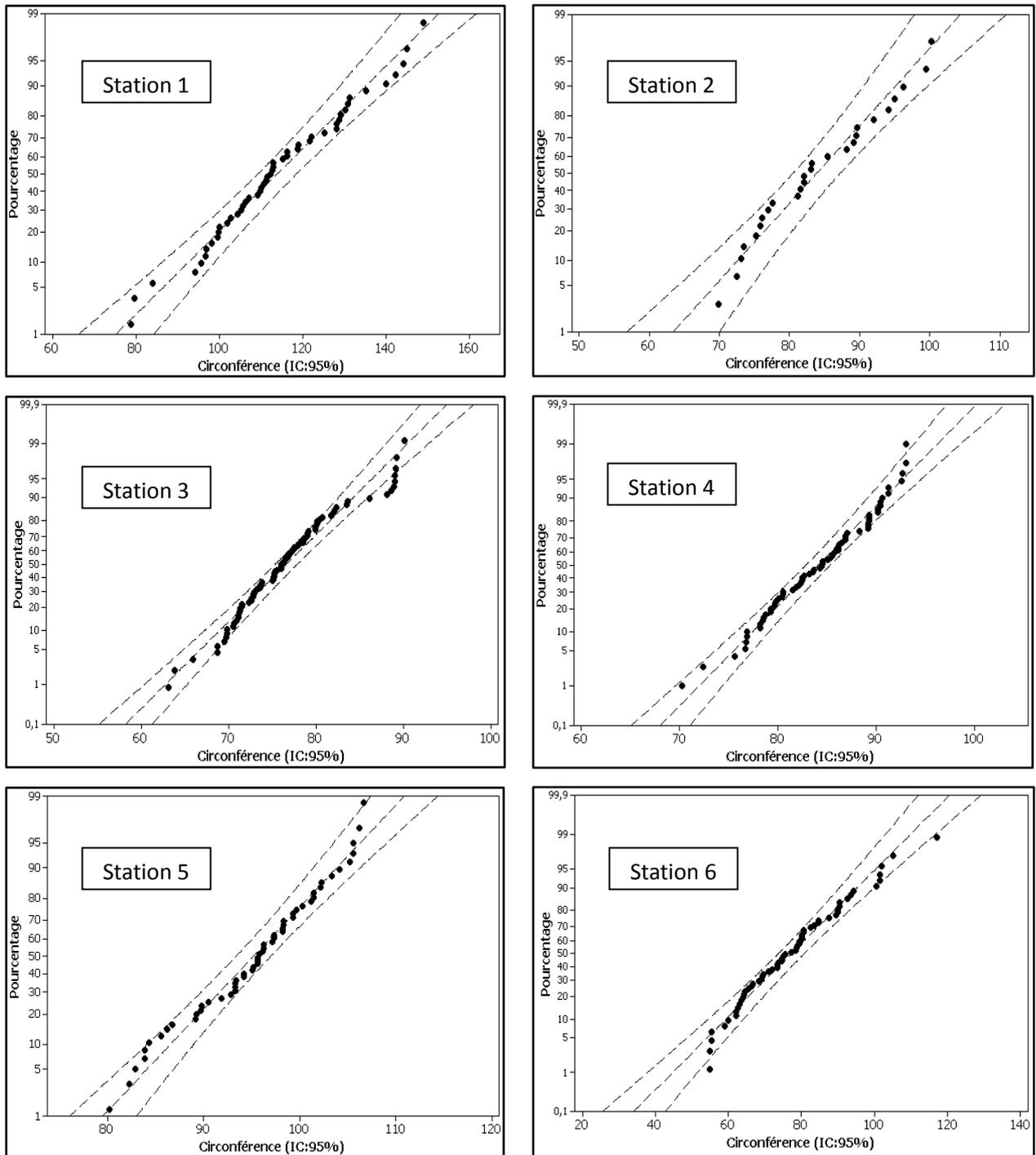


Figure.12 : Tracé Normal des circonférences (intervalle de confiance 95%).

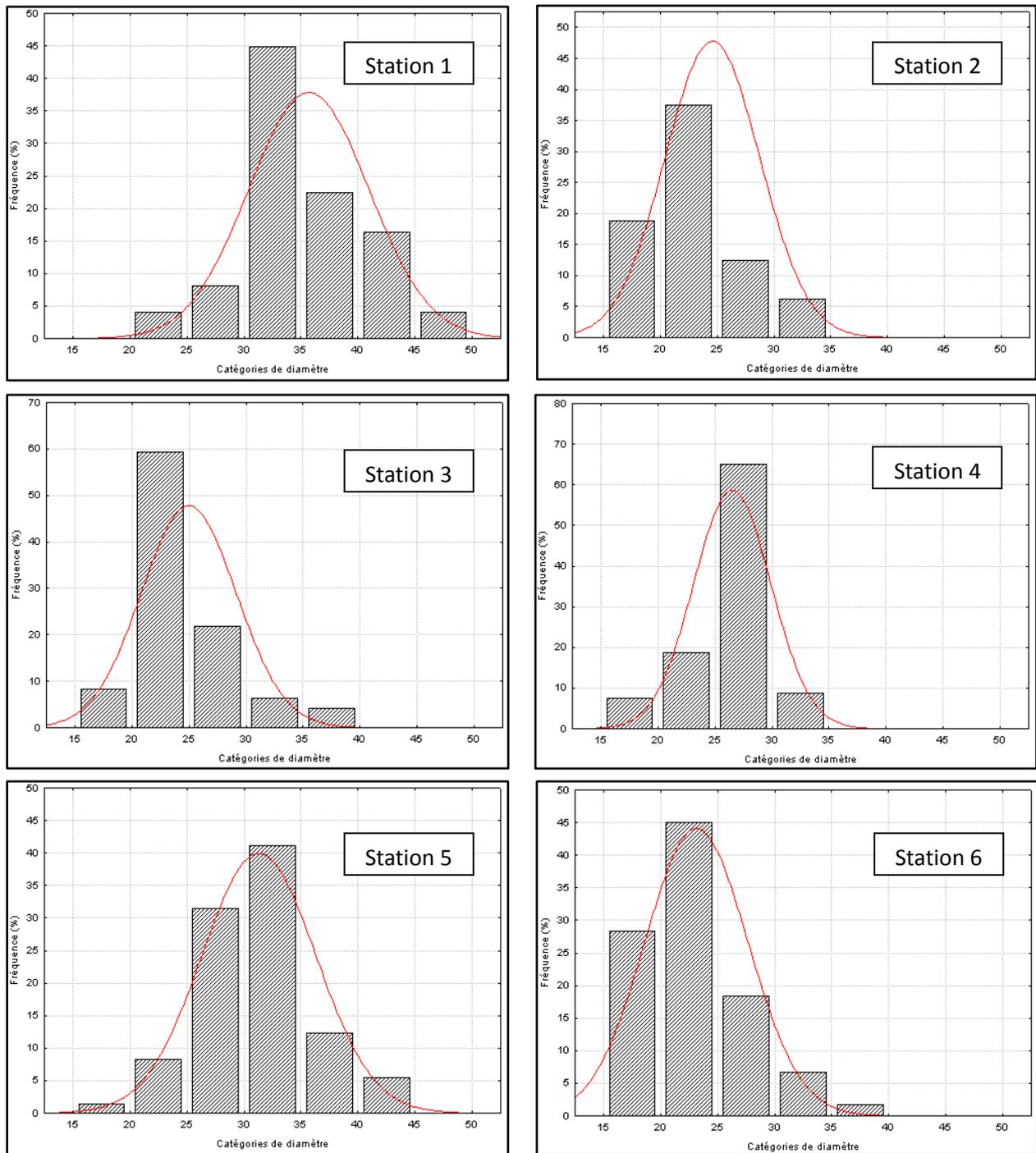


Figure.13 : Distribution par classes de diamètre des individus des stations.

## IV.4. Résultats de la modélisation

### IV.4.1. Construction des modèles

Dans cette partie, nous avons tenté d'établir une forme de modèle cohérente avec la géométrie des nuages de points, relativement simple à paramétrer et dont l'interprétation permet une intégration des facteurs biotique et abiotiques dans la croissance simultanée en hauteur et en diamètre.

Pour le choix de la forme du modèle hauteur-diamètre pouvant être ajusté aux données, trois critères doivent être satisfaits :

- Un ajustement correct aux nuages de point, ne présentant pas de biais flagrants.
- La recherche d'une bonne adéquation du nuage de points à la fonction choisie.
- La valeur plus élevée du coefficient de détermination ( $R^2$ ).

Nous avons utilisé toutes les équations possibles (citées en méthodologie). Comme il été signalé, le  $R^2$  est un paramètre de contrôle de la qualité de l'ajustement mais nous l'avons utilisé comme critère de choix préliminaire des modèles. Les modèles retenus sont présentés dans le tab (8).

Dans la plupart des cas, une analyse graphique préliminaire est nécessaire malgré qu'elle ne permette pas de noter des différences très manifestes (fig.14). Il en résulte :

- Les St.1 et St.4 montrent une géométrie similaire (fonctions paraboliques convexes). Pour les circonférences faibles, la hauteur apparaît insensible à l'augmentation de la grosseur, puis on observe un redressement de la courbe. Cette dynamique est caractéristique d'une augmentation de la vitesse de croissance en hauteur.
- La St.2 montre aussi une fonction parabolique mais concave. Pour les petits diamètres, la hauteur augmente rapidement et presque linéairement avec la circonférence, puis s'incurve et plafonne, ce palier renseigne sur le ralentissement de la vitesse de croissance en hauteur.
- La forme de la St.3 est parabolique mais elle tend vers la linéarité, ceci est probablement lié au caractère régulier de la croissance concomitante en hauteur et en circonférence. A noter que la concavité et la convexité d'une fonction parabolique est déterminé par le signe (positif et négatif) du coefficient "a" de la fonction polynomiale de forme :

$$Y = ax^2+bx+c$$

- Cependant, les St.5 et St.6 suivent des formes géométriques particulières. La relation hauteur – circonférence pour la St.5 suit un modèle linéaire simple :

$$Y = ax+c$$

Ceci est très rare. Les résultats de DHOTE et DE HERCE (1994) montrent que la relation hauteur – circonférence est généralement schématisée par des paraboles ou des hyperboles. En faisant référence aux analyses descriptives effectuées ci-dessus, on remarque que c'est la St. 5 qui montre une Normalité de la distribution la plus accentuée, une relation indirecte entre la Normalité des peuplements et la linéarité du modèle pourrait être établie.

En plus de la particularité géométrique observée dans la St. 6, contrairement aux autres stations, la hauteur ne montre pas un bon ajustement avec la circonférence. En comparant les coefficients de détermination, on a pu ressortir un modèle de puissance hauteur – diamètre de la forme :

$$“Y = ax^b”$$

Ces particularités sont probablement imputables à des perturbations survenues en altitude et à l'irrégularité de la croissance qui caractérise généralement les peuplements jeunes. De leur travail sur l'épicéa, DELEUZE et al (1996) confirme que le modèle hyperbolique (et même parabolique) n'était pas valable pour les peuplements jeunes où les arbres sont en croissance libre, dans ce cas la relation hauteur – circonférence pourrait être limitée en premier lieu par des contraintes de stabilité. En prenant en compte cette condition de stabilité CUSSET (1980) in DELEUZE et al (1996) propose la relation allométrique :

$$H = 33.29 * D^{0.59}$$

Ce modèle est comparable à celui ajusté pour la St.6 (tab.8). Bien que les paramètres de puissance se rapprochent, la divergence se situe au niveau du coefficient. Elle pourrait être rattachée à l'unité de mesure utilisée qui est dans notre cas le mètre.

Tableau 8 : Les modèles ajustés pour chaque station.

Station	Type de relation	Modèles retenues	R <sup>2</sup>	Signification de R <sup>2</sup> (valeur de p)
St. 1	Haut - Cir	$H = 10^{-3}C^2 - 0.23C + 22.05$	0.57	0.001
St. 2	Haut - Cir	$H = -0.005C^2 + 1.02C - 35.54$	0.55	0.005
St. 3	Haut - Cir	$H = 0.002C^2 - 0.22C + 15$	0.59	0.000
St. 4	Haut - Cir	$H = 0.008C^2 - 1.25C + 59.28$	0.69	0.000
St. 5	Haut - Cir	$H = 0.07C + 5.13$	0.70	0.000
St. 6	Haut - Diam	$H = 2.36D^{0.49}$	0.75	0.000

Les coefficients de détermination sont hautement significatifs ; la plus petite valeur est enregistrée par la St.2 (0.55) et la plus importante par la St.6 (0.75). La difficulté d'adéquation du nuage de points de la St.2 avec la fonction polynomiale est liée au faible effectif mesuré dans cette station. Les coefficients trouvés restent relativement faibles par rapport à ceux calculés par MOKHTARI (2006) pour la forêt des Ait Ghobri limitrophe à notre zone d'étude, ils varient de 0.61 à 0.83.

Pour la comparaison des modèles retenus (tab.8), nous avons utilisé les étapes de description algébrique des fonctions quadratiques, linéaires et de puissances.

Pour une fonction polynomiale  $y = ax^2+bx+c$  : “a” désigne l'écartement de la parabole, “b” la position horizontale et “c” la position verticale. L'écartement des fonctions représentatives des stations 1, 2, 3, et 4 est très large. Sur ce point, les quatre stations semblent avoir un même comportement, ce coefficient donne un aperçu sur la vitesse de variation de la hauteur par rapport à la circonférence. Ainsi, plus la valeur tend vers zéro, plus la courbe apparaîtra aplatie. Comme résultat final, la hauteur ne variera pas aussi rapidement que la circonférence.

Sur le plan horizontal, les quatre stations ne montrent pas de grandes différences, leurs dispositions horizontales sont sensiblement rapprochées. Par contre, la grande divergence est notée dans l'ordonnée à l'origine, les stations ont une position verticale très différentes. La détermination des axes de symétrie permet de déceler des ressemblances entre les fonctions, ils sont  $x = 115 ; 102 ; 55 ; 78.12$  respectivement pour les stations 1, 2, 3, 4. Ce résultat mène à classer séparément les stations 1 et 2 d'un côté et 3 et 4 de l'autre côté. La comparaison des densités moyennes des deux groupes montre que celle du premier (456 tiges/ha) est nettement inférieure à celle du deuxième groupe (1274 tiges/ha).

Quant au modèle linéaire de la St.5, la pente ( $a = 0.07$ ) symbolise la vitesse de variation de la hauteur par rapport à la circonférence. Elle est faible, cela traduit une vitesse d'évolution de la circonférence supérieure à celle de la hauteur (le grossissement est favorisé au détriment de l'élancement). Cette situation est généralement observée dans les peuplements lâches ou après une forte éclaircie. Le traitement sylvicole peut avoir une influence sur la croissance des deux paramètres, notamment sur la différenciation des vitesses de croissance entre eux (DHOTE et HERVE, 2000). Dans la forêt en question, il n'y a pas eu de traitement sylvicole hormis celles de 1939-1945 et quelques délits observés. Mais les fluctuations de la densité, considérées comme l'indicateur des pratiques sylvicoles antérieures, causées par des coupes ou même par une sélection naturelle active peut engendrer les mêmes résultats. En conséquence, on pouvait s'attendre à ce que les courbes hauteurs – circonférences diffèrent entre station d'une même forêt.

L'exception est observée dans la St.6 ; elle montre un modèle de puissance hauteur – diamètre. Une modélisation de ce type ressort dès que des rapports égaux entre les valeurs du diamètre induisent des rapports égaux entre les valeurs de hauteur. C'est-à-dire la dynamique des deux paramètres est presque similaire. La vitesse de croissance en hauteur et en diamètre des arbres jeunes de cette station ne diffère pas grandement parce que la hiérarchie sociale ne s'est pas encore installée et la course à la lumière qui est souvent à l'origine de l'accélération de la croissance en hauteur dans les peuplements serrés ne commence pas tant que le peuplement est jeune.

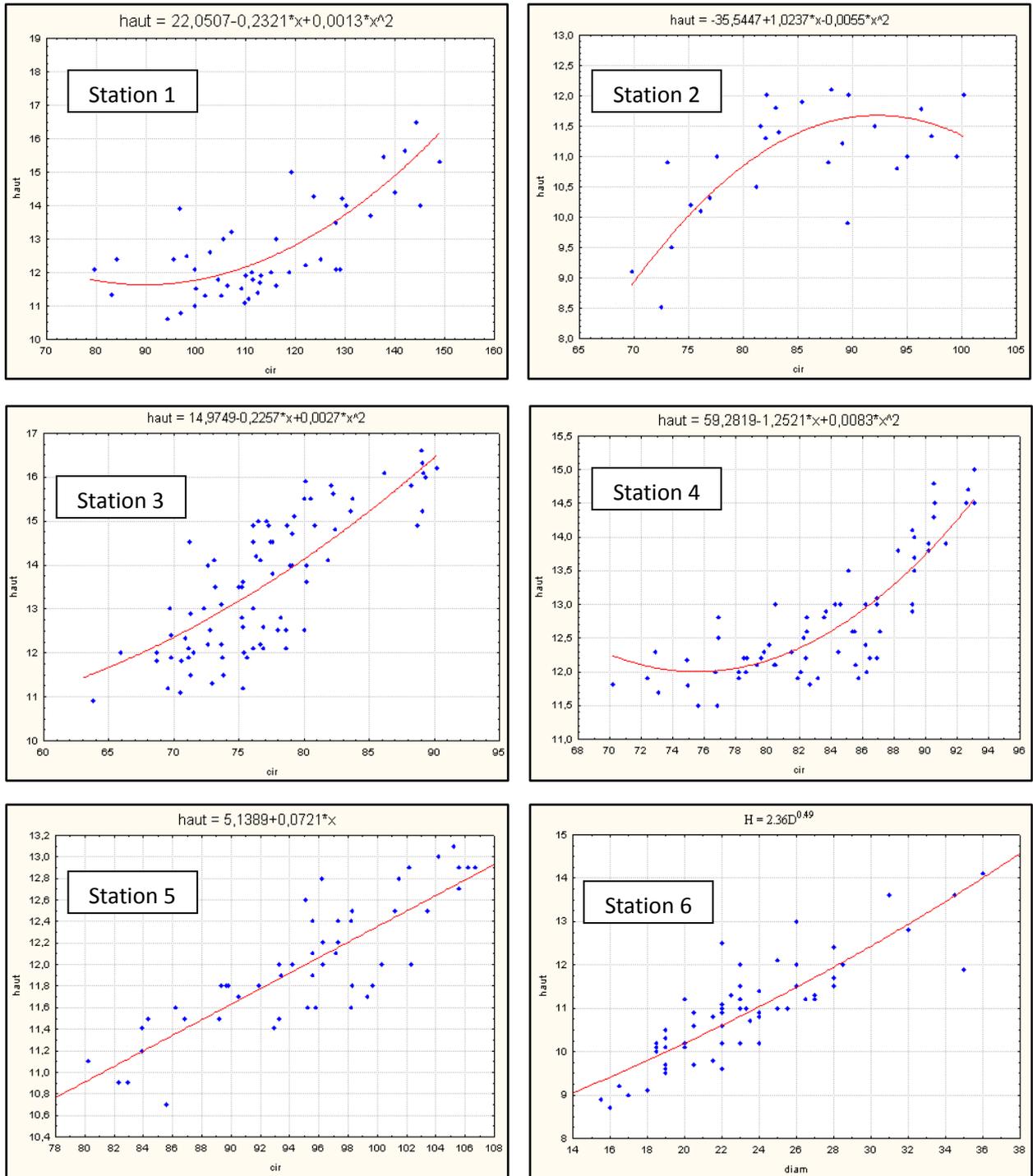


Figure.14 : Représentations graphiques des ajustements.

L'étude des extremums d'une fonction a pour objectif de définir le maximum et le minimum ainsi que le sens de variation. Pour les modèles construits, ce sont seulement des parties de la parabole qui sont représentées, donc les extremums auront peu d'importance. Nous proposons de discuter seulement les hauteurs issues du minimum et du maximum de circonférence. Les résultats sont présentés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Hauteurs issues des modèles (max. et min. de circonférence).

Station	Min. cir.	Max. cir.	H. modélisées (min. – max.)
St. 1			9.98 – 12.42 m
St. 2			5.43 – 16.48 m
St. 3	55 cm	149 cm	8.95 – 26.62 m
St. 4			14.73 – 50.63 m
St. 5			8.98 – 15.56 m
St. 6			9.59 – 15.65 m

Ce tableau montre qu'à une même valeur de la circonférence correspond une hauteur plus faible pour la St.1, plus importante pour la station 4 et 3. Ces dernières sont caractérisées par des densités les plus élevées (1133 – 1416 tige/ha). Ce résultat confirme qu'à une même évolution de la circonférence, les peuplements denses (st. 3 et 4) montrent une culmination précoce par rapport aux autres. En confrontant ces résultats avec les caractéristiques stationnelles, on notera que les minima des prévisions semblent suivre un gradient de fertilité de la station (seul le paramètre édaphique est pris en compte) et les maxima le gradient croissant de la densité, résultat complémentaire aux groupes déduit de l'analyse en composantes principales.

En cas de densité élevée, la hiérarchisation du peuplement s'accélère et la différenciation des vitesses de croissance des arbres de différent statut social apparaît (DHOTE et DE HERCE, 1994). Ces deux phénomènes très liés à la densité et à la croissance en hauteur détermineront les chances de survie d'un individu qui dépend étroitement de son accès à la lumière. La meilleure stratégie pour les arbres est de s'élancer en perdant en grossissement et suivre ainsi la course en hauteur imposée par les culminants précoces (dominants) puisque un retard même minime est sanctionné par une baisse de l'énergie lumineuse incidente (fermeture du peuplement).

Comme il a été déjà signalé, des ressemblances et des divergences existent entre les modèles issues des stations donc une comparaison des hauteurs estimées par le modèle s'impose pour voir si un modèle globale pouvait être établi. Pour cela nous avons opté pour le teste de Fisher et la description graphique pour chaque station (fig.15).

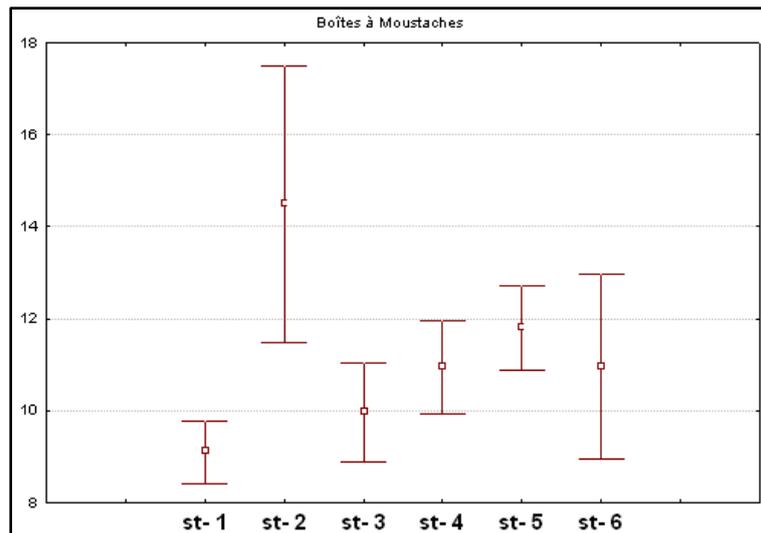


Figure 15 : Description graphique des hauteurs estimées par chaque modèle.

Le test de Fisher montre un très haut niveau de signification des différences constatées pour les hauteurs estimées ( $F = 225.36$ ). L'observation de la figure 15 mène à exclure la station 2, elle montre une moyenne très distingué et une grande dispersion par rapport à celle-ci. Cela n'est pas le résultat des caractéristiques dendrométriques mais plutôt du mauvais ajustement ( $R^2$  le plus faible) ce qui a conduit à des valeurs très éloignées de l'ensemble du groupe. Dans un souci d'inclure les petits diamètres dans le modèle globale, nous avons préféré de garder la St.6 malgré qu'elle montre une petite dissimilarité par rapport à l'ensemble.

Après élimination de la St.2, le  $F$  est descendu à 150.23. Nous nous attendions à ce que la significativité demeure élevée, parce que les ajustements ne sont pas de très haute qualité ( $R^2$  ne dépasse pas 0.75) ce qui induit cette différence beaucoup plus marqué comparé aux hauteurs brutes dont le  $F$  égale à 42.93.

La modélisation globale ressortit un nuage de point très hétérogène. Du faite, les ajustements avec les équations déjà utilisées montrent des coefficients de déterminations faibles preuve d'un mauvais ajustement. Pour tenter d'améliorer la qualité de l'ajustement, la catégorisation du nuage de point permet de le classer en groupes à tendances claires. Le nuage de point  $H = F(C)$  n'apporte pas de tendances satisfaisantes, par contre en inversant les variables explicative et expliqué, la fonction deviendra  $C = F(H)$ . Ainsi, la figure 16 affiche deux tendances bien distinctes : linéaire et parabolique.

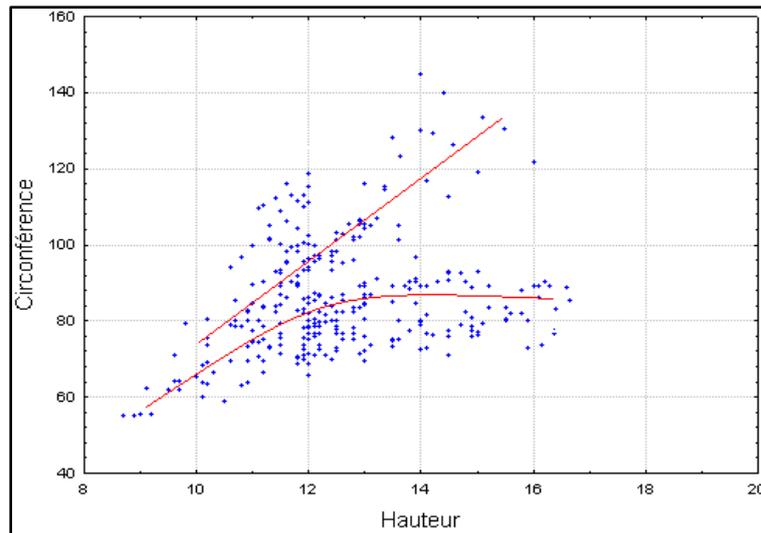


Figure.16 : Ajustement des deux modèles globaux.

Il résulte de cette figure que la séparation relativement nette des deux ajustements est localisée de part et d'autre une tranche de circonférence comprise entre 80 et 85 cm. De ce fait, deux modèles peuvent être construits pour l'ensemble de la forêt :

- $C = 3.82H + 55.56$ . Pour les grosses circonférences.
- $C = 0.09H^2 - 0.66H + 70.65$ . Pour les petites circonférences.

Cette relation H-C mis en évidence des divergences de comportement à différents stade de développement. Pendant la phase juvénile la circonférence varie faiblement en fonction de la hauteur, mais au stade adulte elle varie rapidement.

Eu égard de l'hétérogénéité qui caractérise les stations, les ajustements globaux ne seront pas certainement de qualité supérieure ( $R^2$  faible). Par conséquent, nous pouvons conclure que la recherche d'un modèle globale pour l'ensemble de la forêt n'aura pas un intérêt dans la mesure où les stations montrent un comportement différent quant à la dynamique des hauteurs et des circonférences. De ces résultats, on peut confirmer l'influence prépondérante du contraste stationnelle dans cette forêt.

La discrimination des deux tendances par la variation de la circonférence nous mène à intégrer l'âge moyen (paramètre étroitement lié à la circonférence) dans le choix du modèle globale. La St.6, étant très éloignée des autres en terme de circonférences et d'âge moyens peut faire l'objet d'une modélisation globale à part. Il apparaît donc nécessaire pour construire un modèle globale représentatif de séparer la St.6 qui, sur le plan âge, sol et altitude diffère de l'ensemble des stations. Ensuite, les stations 1, 3, 4 et 5 seront regroupées pour tenter un deuxième modèle globale.

Les deux modèles globaux finalisés sont :

❖  $[H = 2.36D^{0.49}] :$

Modèle globale de puissance rattaché aux zones de haute altitude, contenant des arbres dont l'âge moyen est de 69 ans, marquées par une fertilité du sol moyenne.

$$\diamond [H = 2,75.10^{-3}C^2 - 0.40C + 25.36] :$$

Modèle globale polynomiale établi à partir des zones d'altitude moyenne (1080m), les individus sont plus âgés (âge moyen : 145 ans), avec une fertilité des sols meilleur (substrat gréseux, sol profond et humifère).

#### IV.4.2. Paramétrage des modèles

Pour mieux discuter les relations hauteur – circonférence, les modèles polynomiaux s'avèrent limités. Nous nous proposons de tester un ajustement à un modèle hyperbolique qui a montré son efficacité pour les peuplements équiennes de hêtre et de chêne sessil (DHOTE et DE HERCE, 1994) et pour l'épicéa commun (DELEUZE et *al*, 1996). Malgré qu'il existe une multitude de modèles traitant de cette relation (cités par HUANG et *al*, 1992 et PAUWELS et *al*, 1999), nous avons préféré de se référer à ce modèle parce qu'il a le privilège de faire évoluer ces paramètres en fonction de l'âge, de la fertilité de la station et des prédispositions génétiques.

L'effet du traitement sylvicole est souvent matérialisé par les variations de la densité qui est logiquement quantifié par le rapport entre la hauteur et la circonférence, et qui à son tour reflète une certaine hiérarchie sociale issue de la compétition inter arbres. De ce point de vue, il est largement reconnu que la croissance en circonférence diminue avec la densité (OTTORINI, 1978). En revanche, la croissance en hauteur semble beaucoup moins sensible au traitement sylvicole, au moins pour une large gamme de densités (LANNER, 1985). Donc, si l'une des variables est défavorisée pendant que l'autre reste stable, leur liaison sera certainement affectée.

La formule du modèle est la suivante : 
$$H(C) = \frac{U_1 + U_2 C - \sqrt{(U_1 + U_2 C)^2 - 4U_1 U_2 U_3 C}}{2U_3} + 1.3$$

Ce modèle comporte trois paramètres qui varient en fonction des stations et de leurs caractéristiques :

1.  $U_1$  : caractérise la courbure de la fonction dans la variable expliquée et représente l'estimation de la hauteur pour les circonférences maximales. DELEUZE et *al* (1996) considère que ce paramètre est très lié à la hauteur moyenne des 100 plus gros arbres à l'hectare (hauteur dominante).
2.  $U_2$  : symbolise la pente à l'origine, H/Cir (le rapport de la hauteur sur la circonférence). Il permet d'apprécier l'évolution simultanée de l'élancement et du grossissement.
3.  $U_3$  : paramètre de forme (géométrie de la courbe). La forme des courbes est interprétée comme l'effet de la dominance sur la croissance en hauteur et en diamètre dans les peuplements hiérarchisés. DHOTE et HERVE (2000) estiment que la forme du modèle n'as pas d'importance, mais plutôt l'intérêt réside dans la discussion des deux premiers paramètres.

Les résultats de l'ajustement (estimation des paramètres) sont présentés dans le tableau (10).

Tableau 10 : Estimation des paramètres du modèle.

	$U_1$	$U_2$	$U_3$
<b>Zone de basse altitude</b>	27.49	0.13	0.95
<b>Zone de haute altitude</b>	17.47	0.24	0.89

Les résultats affichent une nette différence des deux zones d'étude quant au paramètre  $U_1$ . Il exprime la hauteur asymptotique atteinte pour un maximum de circonférence. En effet, la région de basse altitude renferme des gros diamètres par contre celle de haute altitude montre des diamètres relativement faibles ce qui se répercute inévitablement sur les hauteurs maximale. On attribue souvent à ce paramètre une signification relative à la hauteur dominante donc d'une manière indirecte à la fertilité de la station (PAUWELS *et al*, 1999). La description des stations et les résultats obtenus ci-dessus montrent que la région de haute altitude est beaucoup moins fertile par rapport aux stations de basse altitude.

Le rapport H/Cir traduit par le paramètre  $U_2$  est plus grand dans la station de haute altitude. Cela exprime une vitesse d'élancement plus grande comparée au grossissement. Ce résultat est en parfaite concordance avec le stade de développement des deux zones (l'accroissement en hauteur étant dominant en peuplement jeune). Pour le paramètre de forme, les deux valeurs (0.95 et 0.89) apparaissent presque égales. A ce sujet, les résultats de la littérature montrent que l'effet de l'âge se traduit par une augmentation régulière de la pente à l'origine (le paramètre  $U_2$ ). Le paramètre de forme observe une stabilité autour de 0.9 pour l'épicéa, le hêtre et le chêne rouvre, résultats concordant à ceux déduits pour le chêne zéen (0.89 – 0.95).

Finalement, et suite à ce diagnostic, il apparaît bien que l'influence de la densité est constatée sur les modèles stationels. Par contre, pour la construction des modèles plus globaux, l'effet de la zone, de la fertilité du sol et de l'âge interviennent d'une façon accentuées. Il reste la détermination de la part de chacun de ces facteurs dans la croissance en hauteur et en diamètre, cela nécessite des études plus poussées et des modèles plus sophistiqués. Rien n'empêche, l'établissement de modèle hauteur – âge peuvent apporter d'autres éléments d'information.

#### IV.4.3. Modèle hauteur – âge

Deux modèles linéaires ont été établis pour les deux zones précédemment décrites (fig.17). La relation linéaire témoigne d'une corrélation linéaire entre la hauteur et l'âge. Les modèles sont :

- $[H = 0.03 \text{ âge} + 9.83]$  pour la région de basse altitude.
- $[H = 0.07 \text{ âge} + 6.78]$  pour la région de basse altitude.

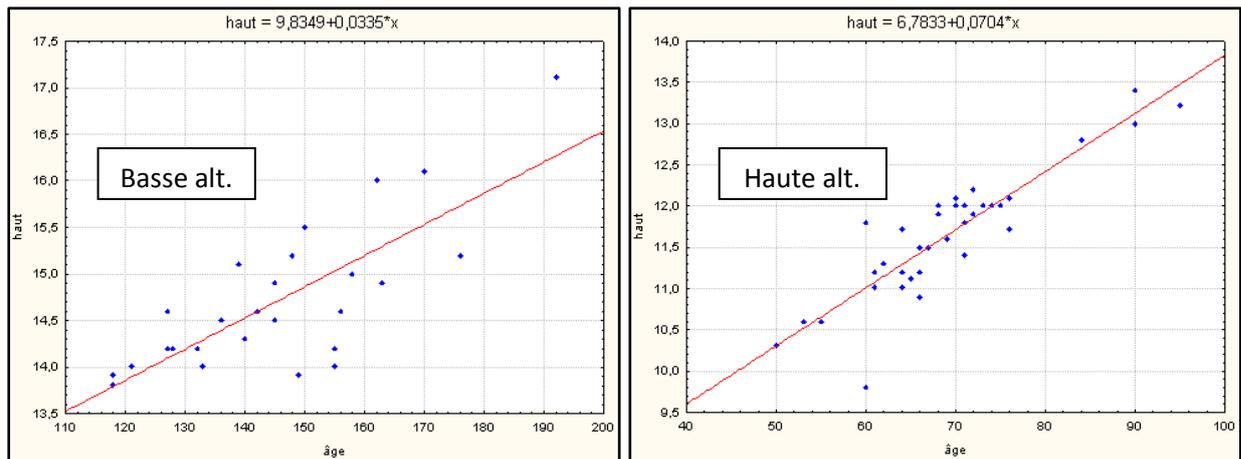


Figure17 : Modèles hauteur – âge construits pour les deux régions.

La différence de pente entre les deux modèles (0.07 et 0.03) renseigne sur la différence de vitesse de croissance en hauteur. La région de basse altitude montre une vitesse relativement inférieure par rapport à celle de haute altitude, cela est lié à la différence d'âge entre les deux zones puisque au stade jeune, les arbres montrent une vitesse de croissance élevée.

A des âges très divergents comme dans le cas ici présent (69 à 145 ans), on ne peut pas comparer la productivité des deux zones. Cependant, à des âges égaux une relation entre la productivité et la qualité de la station peut être envisagée. L'indice de la qualité de la station (IQS) s'exprime par la hauteur dominante atteinte à un âge de référence fixé, NIGH (2004) le définit comme la hauteur atteinte à 50 ans à hauteur de poitrine.

Le modèle classique de CHAPMAN RICHARDS (1959) :

$$[H = k_1 (1 - \text{Exp}(k_2 \cdot \text{âge}))^{k_3}]$$

dont  $k_1$  est un paramètre libre dépendant de l'arbre, il représente la hauteur de l'arbre atteinte à un âge avancé. Les  $k_2$  et  $k_3$  sont des coefficients d'ajustement des courbes (propres à chaque station).

Ce modèle permet d'évaluer la hauteur dominante à partir des relations H – âge. Après estimation des paramètres  $k_1$ ,  $k_2$  et  $k_3$ , les modèles issus sont :

- Zone de basse altitude :  $H = 14.55 (1 - \text{Exp}(-9.05 \cdot \text{âge}))^{9.05}$ .
- Zone de haute altitude :  $H = 11.61 (1 - \text{Exp}(-11.24 \cdot \text{âge}))^{11.24}$ .

L'ajustement de nos données à ce modèle n'a pas donné de résultat satisfaisant à cause de la redondance des prédicateurs (STATISTICA online Doc). Cette imperfection de l'ajustement est due à la relation linéaire qui caractérise les données et à l'effectif réduit des échantillons. D'après LEJEUNE (1994), l'imprécision constatée dans les modèles est causée par un bruit expérimental lié à l'échantillonnage et aux mesures.

Dans le cas où la relation linéaire est robuste, pour évaluer l'IQS nous utilisons donc les modèles linéaire dont leurs qualités d'ajustement est largement supérieur à ceux de CHAPMAN-RICHARDS. Les résultats sont comme suit :

$IQS_{B. alt.} = 11.33$  m et  $IQS_{H. alt.} = 10.28$ . Les sites index sont presque identiques, mais la région de basse altitude apparaît plus productive.

#### **IV.4.4. Qualité et précision des ajustements**

Cette démarche est essentielle pour pouvoir se prononcer sur la qualité des modèles. On appliquera certains tests arithmétiques et graphiques sur tous les modèles construits et ajustés. La comparaison des modèles est complétée par une analyse des résidus et par un examen visuel qui permettent de juger de l'adéquation du modèle ajusté.

##### **IV.4.4.1. Tests arithmétiques**

En plus du coefficient de détermination ( $R^2$ ) utilisé comme test d'évaluation préliminaire, d'autres beaucoup plus fiables sont calculés pour permettre une bonne évaluation des modèles. Ceux-ci sont : l'Akaike Information Criterion (AIC), le carré moyen résiduel (CMR) et le rapport de la variance (RV). Tous ces tests seront appliqués à dix modèles retenus. Pour simplifier la présentation des résultats, nous avons attribué à l'ensemble des modèles une codification. Les modèles retenus, leur codification et les résultats des tests arithmétiques sont récapitulés respectivement dans les tableaux 11 et 12.

Les tests de vérification de la qualité d'ajustement intègrent souvent les valeurs résiduelles dans leurs calculs mais ceux présentés ci-dessus prend en compte aussi le nombre d'observations et de paramètres dans le calcul final, ce facteur semble l'influencer en limitant considérablement le biais (DEBOUCHE, 1977 in RATHGEBER et al, 2004).

Pour définir les modèle de qualité les valeurs de chaque test apparaissent discordant, ce résultat est attendu puisque le nombre d'observation diffère surtout entre les modèles stationnels et globaux.

L'AIC est d'autant plus petit que le modèle soit acceptable, les valeurs calculées sont comprises entre -99.93 et 479.34. Les modèles MSC5 et MGCB montrent respectivement les valeurs minimale et maximale de ce test. A part le MSC5 et MSC6 tous les modèles stationnels montrent une valeur de l'AIC élevée. Les modèles globaux de hauteur (MGAB et MGAH) sont aussi favorables à ce test.

Pour le CMR, quand il tend vers zéro le modèle signifie un bon ajustement et que la variance non expliquée par le modèle est minimale. Les modèles MSC5, MSC6 et MGAH montrent les valeurs les plus proches de zéro probablement grâce à la linéarité de la relation. Les modèles globaux de circonférence (MGCB et MGCH) montrent aussi des résultats relativement satisfaisants comparés aux autres modèles stationnels.

Tableau 11 : Tableau récapitulatif des modèles retenus et leurs codifications.

Code	Formulation	Description
MSC1	$H = 10^{-3}C^2 - 0.23C + 22.05$	Modèle stationel, $H = F(C)$ pour la station 1.
MSC2	$H = -0.005C^2 + 1.02C - 35.54$	Modèle stationel, $H = F(C)$ pour la station 2.
MSC3	$H = 0.002C^2 - 0.22C + 15$	Modèle stationel, $H = F(C)$ pour la station 3.
MSC4	$H = 0.008C^2 - 1.25C + 59.28$	Modèle stationel, $H = F(C)$ pour la station 4.
MSC5	$H = 0.07C + 5.13$	Modèle stationel, $H = F(C)$ pour la station 5.
MSC6	$H = 2.36D^{0.49}$	Modèle stationel, $H = F(D)$ pour la station 6.
MGCB	$H = \frac{27.49 + 0.13C - \sqrt{(27.49 + 0.13C)^2 - 13.58C}}{1.9} + 1.3$	Modèle globale, $H = F(C)$ pour la région de basse altitude.
MGCH	$H = \frac{17.47 + 0.24C - \sqrt{(17.47 + 0.24C)^2 - 14.92C}}{1.78} + 1.3$	Modèle globale, $H = F(C)$ pour la région de haute altitude.
MGAB	$H = 0.03 \text{ âge} + 9.83$	Modèle globale, $H = F(\text{âge})$ pour la région de basse altitude.
MGAH	$H = 0.07 \text{ âge} + 6.78$	Modèle globale, $H = F(\text{âge})$ pour la région de basse altitude.

Tableau 12 : Tableau récapitulatif des tests arithmétiques.

	MSC1	MSC2	MSC3	MSC4	MSC5	MSC6	MGCB	MGCH	MGAB	MGAH
<b>R<sup>2</sup></b>	0.57	0.55	0.59	0.69	0.70	0.75	0.44	0.41	0.61	0.80
<b>AIC</b>	139.94	72.74	231.15	95.98	-99.93	-58.11	479.34	168.93	-12.41	-74.47
<b>CMR</b>	16.71	15.24	14.82	3.99	0.15	0.13	6.45	3.16	0.58	0.12
<b>RV</b>	0.04	1.92	0.12	0.32	0.64	0.76	1.48	0.10	0.40	0.79

L'observation des valeurs du rapport de la variance (RV) mène à conclure que les modèles acceptables sont MGAH, MSC5 et MSC6. Quant à la faible qualité d'ajustement constaté pour les autres modèles stationnels, les résultats sont en concordance avec les deux premiers tests. Le rapport entre la variance estimée par le modèle et celle des données brutes permet d'évaluer le changement de tendance dû au modèle. Il apparaît que pour les MGCH,

MSC1, 2 et 3 le modèle a accentué l'évolution de la hauteur. Cependant, on constate une stabilité de la variabilité pour les autres.

L'analyse de l'ensemble des résultats affirme que les modèles polynomiaux sont les moins adaptés à décrire la croissance en hauteur en fonction de la circonférence. La nécessité de trouver une adéquation en parabole du nuage de point entraîne une augmentation de la variance résiduelle mais les modèles linéaires et de puissance (MSC5, 6, MGAB et MGAH) sont de qualité meilleure.

Cependant, l'ajustement des modèles globaux au modèle de DHOTE et DE HERCE (1994) (MGCB et MGCH) sont acceptables, malgré que les résultats des tests soient inférieurs à ceux de ces derniers et à ceux de DELEUZE et *al* (1996). Le faible effectif d'échantillonnage en serait probablement la cause. Il témoigne de l'efficacité modeste des modèles globaux, donc il serait probablement admis que l'hétérogénéité qui caractérise la région d'étude ne peut pas permettre un modèle régionale suffisamment explicatif, et ce eu égard à la diversité des milieux.

Dans un massif forestier, même de surface limité, l'hétérogénéité stationnelle crée une multitude de microclimats dont leur influence sur la croissance des arbres est remarquable. Dans la relation arbre – microclimat, l'action combinée des facteurs édaphiques et topographiques avec les paramètres climatiques, et plus particulièrement les facteurs thermiques et hydrométriques, règle les conditions d'existence des arbres et détermine la croissance de leurs paramètres dendrométriques ainsi que leur évolution respective. Le rôle de la végétation dans la détermination des microclimats n'est pas à négliger (AUSSENAC, 1973), En effet d'une part l'action du couvert forestier affecte le climat et d'autres part la densité et la structure des peuplements influencent les processus d'infiltration, de ruissèlement et de la pénétration de la lumière.

L'action conjuguée de tous ces facteurs sera appréciée par la croissance et le développement des arbres. L'amélioration de la relation arbre – microclimat en vue d'optimiser les potentialités de production passera nécessairement par la maîtrise de la physiologie de l'essence dont la compréhension du comportement de ses paramètres dendrométriques est primordiale.

#### **IV.4.4.2. Test graphique (Analyse des résidus)**

##### **IV.4.4.2.1. Histogramme des résidus (Fig.18)**

L'examen visuel préliminaire des histogrammes donne un aperçu sur les signes des résidus qui permet de décider sur l'adéquation des modèles. Les résultats montrent un comportement différent quant à leurs répartitions. La nullité des résidus est vérifiée pour les modèles MSC5, MSC6, MGCB, MGCH et MGAH. Un léger décalage vers les résidus positifs est observé pour le modèle MGAB. Cependant une tendance négative est à noter pour le modèle MSC2. Le décalage positif flagrant observé pour les modèles MSC1, 2 et 3 peuvent être vus comme une différence de rapprochement des modèles à la loi Normale.

#### **IV.4.4.2.2. Tracée normal des résidus (Fig.19)**

Pour tous les modèles, la Normalité des résidus est perturbée sur les extrêmes positifs et négatifs, par contre, ceux disposés autour de la valeur nulle sont parfaitement Normaux.

Excepté le modèle MSC4 et les modèles globaux qui montrent un optimum d'ajustement à la loi Normale, les autres modèles stationnels s'éloignent légèrement de la distribution Normale. Dans l'ensemble, la disposition des résidus sur la droite de Henry justifie l'adéquation des modèles qui montrent que les résidus sont distribués d'une façon susceptible d'être ajustée par une loi Normale.

#### **IV.4.4.2.3. Homogénéité des résidus (Fig.20)**

Le nuage des résidus des modèles MSC1 et 2 est très hétérogène mais les autres sont plus ou moins homogène, cette caractéristique est essentielle pour évaluer l'efficacité et la robustesse d'un modèle. Néanmoins, les dispositions relativement correctes ne sont observées que pour les modèles MSC6 et les modèles globaux dépendant de l'âge (MGAB et MGAH). Les autres modèles montrent une certaine tendance due à un biais entraîné par les prévisions du modèle, à noter que les tendances flagrante sont observées pour les modèles globaux paramétrés à partir de l'équation générale déjà établie.

On remarque que pour le modèle MGCB, le nuage des résidus le plus important se trouve dans un intervalle d'hauteur compris entre 8 et 13m, au-delà ils exposent une nette diminution. On déduit que ce modèle surestime les résidus pour les hauteurs faibles donc il ne sera pas intéressant de l'utiliser pour des hauteurs relativement basses. Par contre la tendance observé dans le modèle MGCH est plutôt centrale, les résidus sont importants autour des prévisions moyennes.

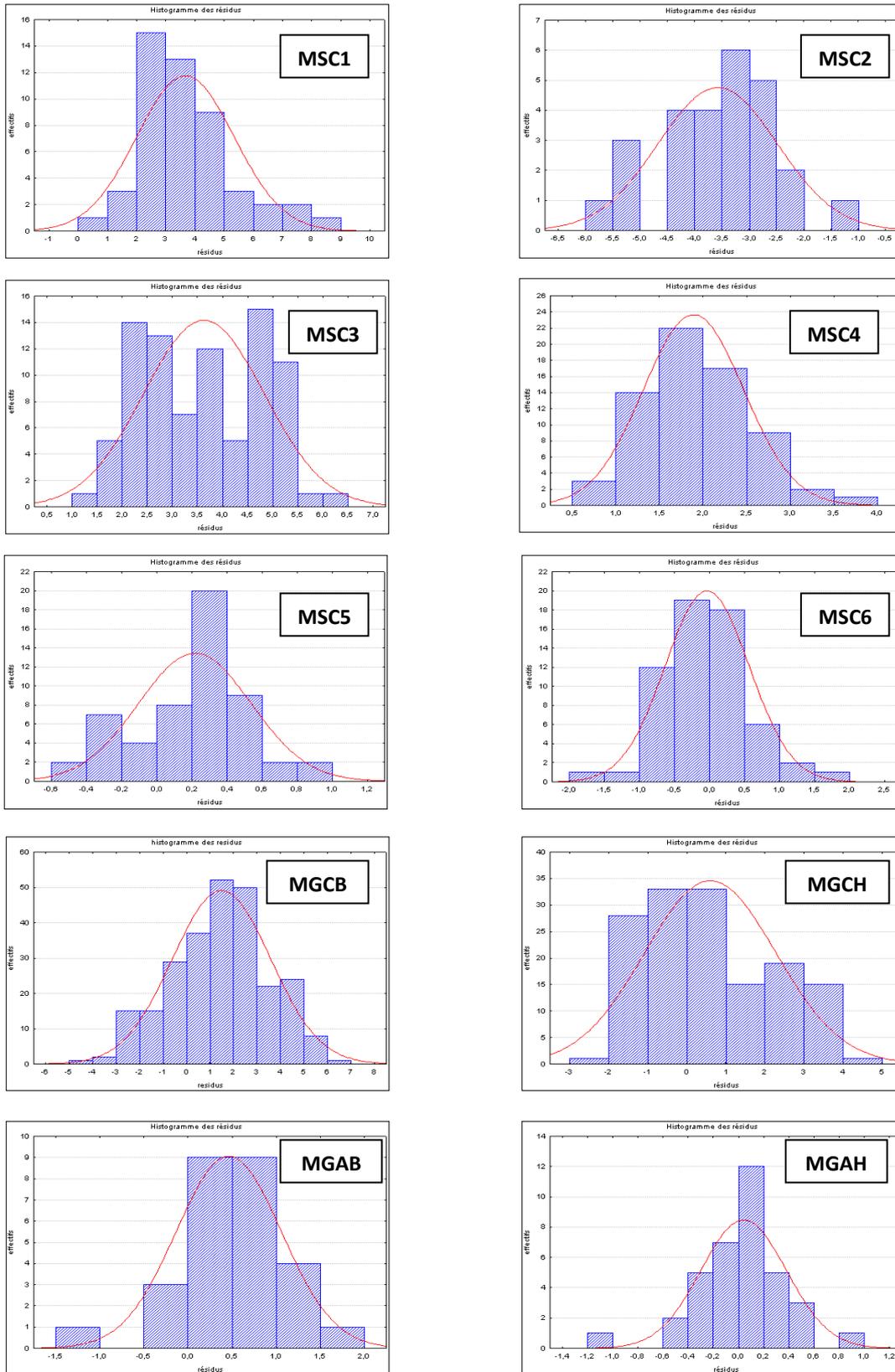


Figure.18 : Histogrammes des résidus pour les modèles retenus

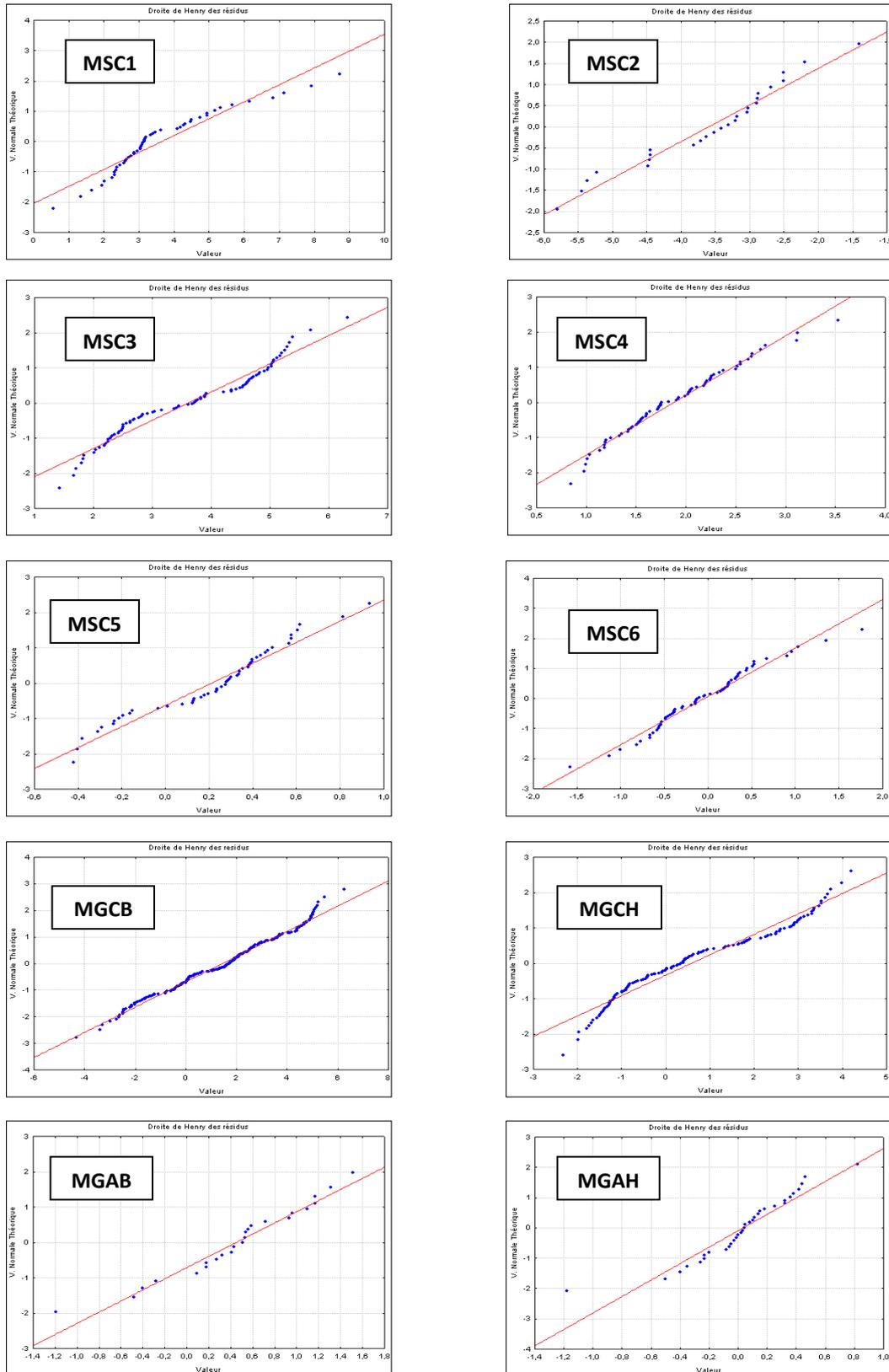


Figure.19 : Tracé Normal (droite de Henry) des résidus des modèles.

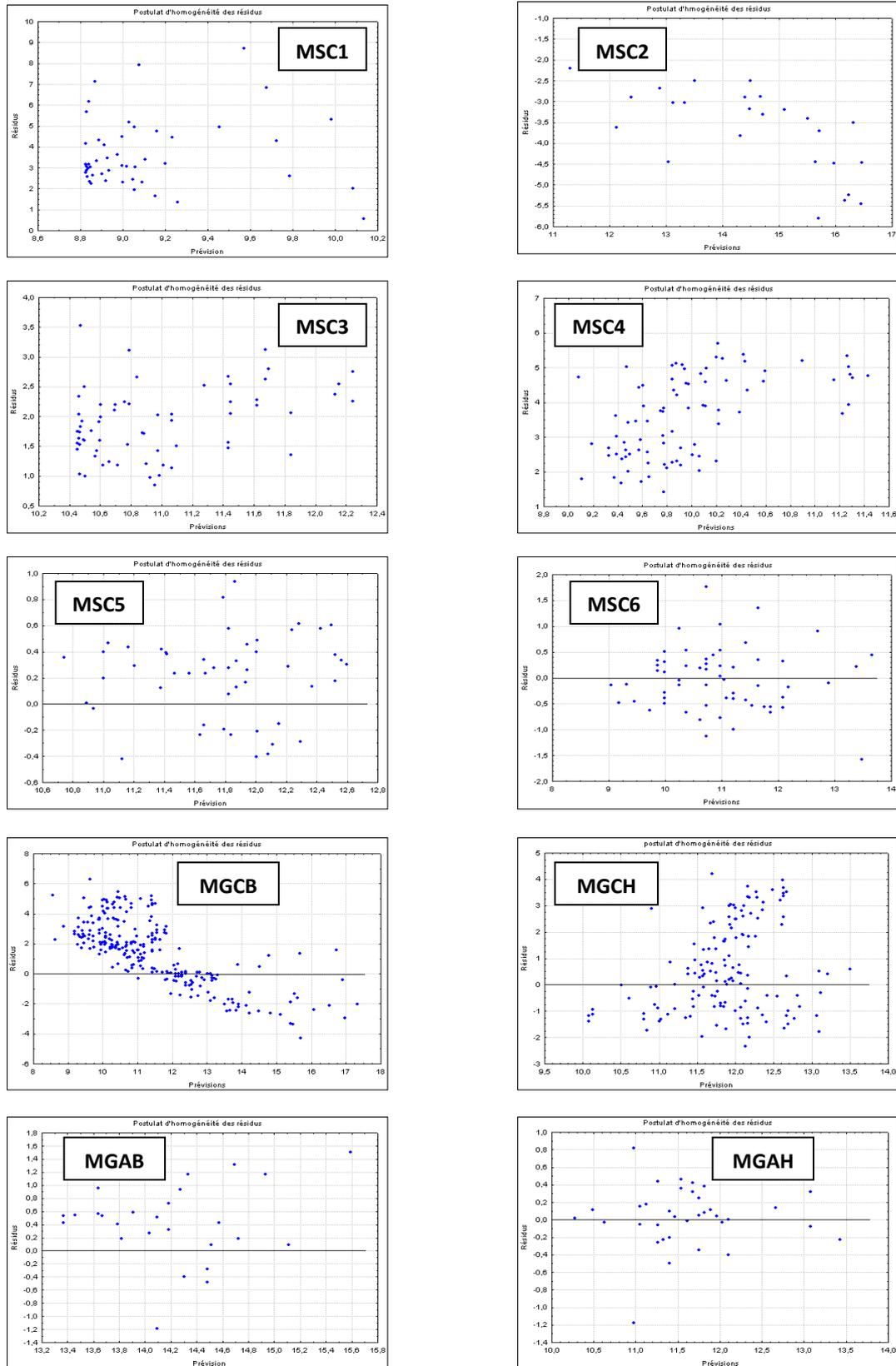


Figure.20 : Tracée des résidus en fonction des valeurs prévus

## IV.5. Influence du gradient écologique sur les modèles

La méthode décrite par FONWEBAN et HOULLIER (1995) consiste à représenter les résidus en fonction d'un gradient écologique choisi (croissant ou décroissant), l'orientation du nuage des résidus déterminera l'influence éventuelle du facteur écologique sur les prévisions établie par le modèle. Cette procédure est suivie pour la pente, l'altitude, l'exposition, la densité et l'âge mais seul ces deux derniers seront discutés parce qu'aucune tendance claire n'est observée dans le nuage des autres facteurs.

### IV.5.1. Effet de la densité

Pour vérifier si la densité a une influence sur la relation hauteur - circonférence et si elle influe significativement sur les paramètres des modèles, nous avons représenté les résidus des modèles stationnels en fonction d'un gradient croissant.

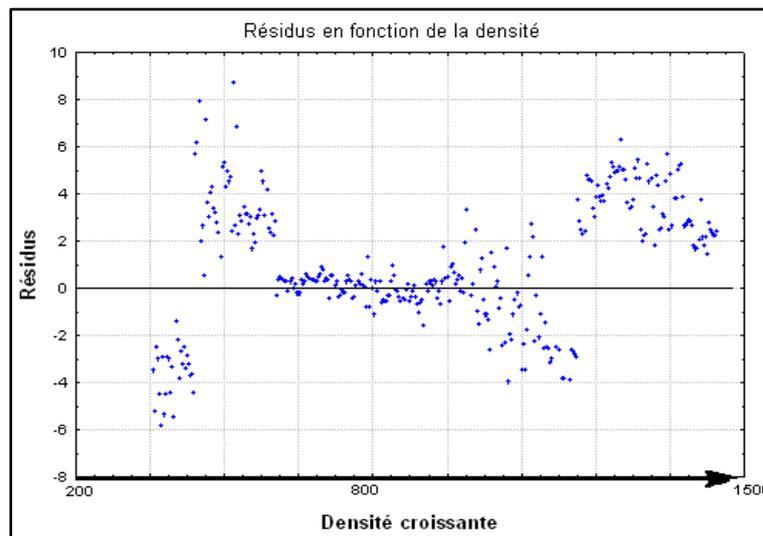


Figure.21 : Représentation des résidus en fonction de la densité.

L'observation de la figure 21 montre que les résidus sont importants pour les densités faibles et très fortes mais nous avons pu constater aussi qu'il y a une légère tendance décroissante des résidus avec la densité. Les modèles tendent à sous-estimer la croissance lorsque la pente est faible et à la surestimer lorsqu'elle est forte. De la forme du nuage de point, on peut déduire que les modèles ne prennent en considération que l'effet des densités moyennes (autour de 800 tiges /ha).

DHOTE et HERVE (2000) estiment que l'absence de structure ou de tendance claire pour les résidus des stations ne signifie pas qu'aucun effet du facteur écologique considéré n'est présent. On peut bien admettre qu'une influence d'intensité faible n'apparaît qu'une fois le facteur soit mesuré pour chaque arbre alors que dans notre cas nous avons mesuré la densité que par placette.

Dans ce cas, la tendance d'un nuage de point plus dense deviendra facile à déceler. Le cas contraire, l'attribution d'une valeur moyenne du facteur en question pour tous les

individus de la placette (comme notre cas où les paramètres sont mesurés par placette) provoquera des compensations et la tendance deviendra alors brouillée.

Cependant, cela ne veut pas dire que la densité n'a pas d'effet sur la relation hauteur-circonférence. Au contraire nous avons constaté de l'analyse des sommes des carrés des résidus (SCR) que la densité a un impact non négligeable (fig.22).

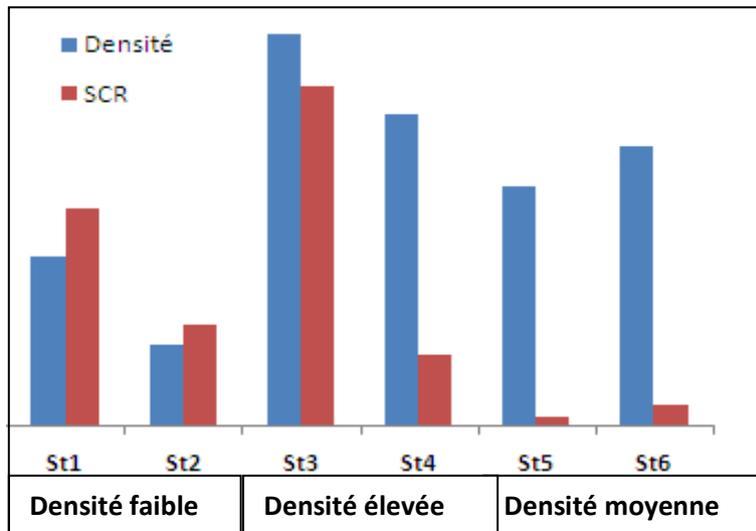


Figure.22 : Comparaison des densités et des sommes des carrés des résidus

Cette analyse discrimine les stations en trois groupes dont chacun renferme des SCR relativement proche :

- **Groupe A** : station 1 et 2 avec des SCR moyens pour des densités faibles.
- **Groupe B** : station 3 avec des SCR importants pour des densités élevées, la station 4 n'obéit pas à cette règle, elle montre pour une densité élevée un SCR relativement faible.
- **Groupe C** : station 5 et 6 avec des SCR très faibles pour des densités moyennes.

Les résultats classiques sur l'impact de la densité sur la croissance du peuplement (en circonférence et en hauteur) (OTTORINI, 1978) trouvent leur intérêt dans la conduite d'un peuplement (dans la recherche à caractériser l'intensité d'un éclaircis par exemple).

En relation étroite avec les mesures de densité de peuplement, les indices de concurrence doivent être considérés comme des mesures locales de densité. Donc il serait judicieux d'intégrer les indices de concurrence en outre de la notion de densité communément utilisée dans l'élaboration des modèles. En fait, ce sont deux aspects du même sujet qui diffèrent par le niveau de l'étude. C'est-à-dire, selon que l'on considère le peuplement dans son ensemble, ou bien chaque arbre forestier au milieu du peuplement. La concurrence des cimes est autre facteur qui doit aussi être pris en compte.

Pour avoir un modèle reflétant le plus fidèlement possible la réalité du fonctionnement physiologique de l'arbre dans son milieu, Les modèles fonctionnels semblent les meilleurs adaptés.

### IV.5.2. Effet de l'âge

Les âges sont triés du plus petit au plus grand, pour tous les individus il varie de 50 à 192 ans, ensuite à chaque individus sera affecté son résidu issu de la modélisation.

Le nuage de point des résidus en fonction de l'âge est présenté dans la figure (23). L'examen visuel de cette figure montre une nette tendance des résidus ; ils grandissent avec l'âge. Les résidus élevés commencent à apparaître à partir de 140 ans. Même si la station contient les jeunes peuplements, ils contribuent peu à la masse de données. Les valeurs faibles des résidus issus de son modèle influence considérablement la tendance générale. Ce résultat confirme l'inefficacité des modèles  $H = F(\text{âge})$  pour les âges très avancés. Ainsi, le nuage des résidus peut être découpé en deux parties :

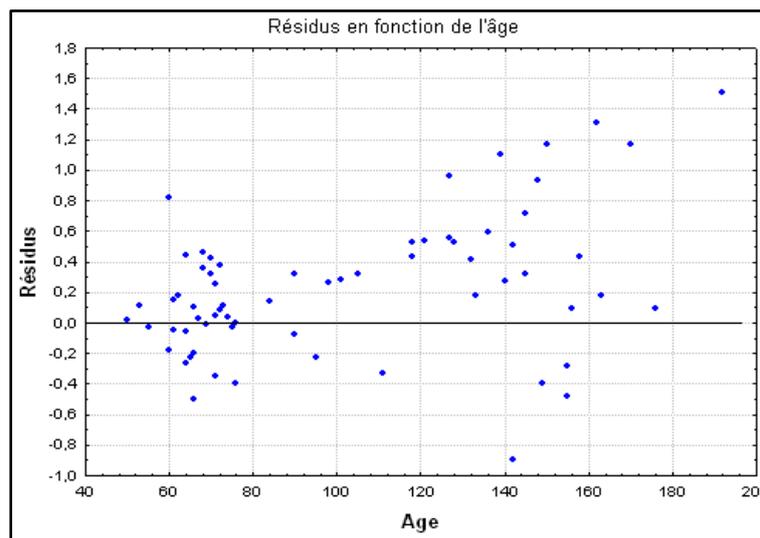


Figure.23 : Représentation des résidus en fonction e l'âge.

- 1) Partie correspondant à l'âge de 50 - 120 ans, caractérisée par des résidus assez faibles ( $[-0.5, +0.4]$ ). Cette partie correspond à la phase post - installation de l'arbre où il sortit de la période de croissance perturbée (DUPLAT et TRAN-HA, 1986 in RATHGUEBER *et al*, 2004). Au cours de cette période d'installation (0 à 30 ans selon l'essence) les individus sont soumis à de nombreux aléas rendant leur croissance difficile à modéliser. Nous n'avons pu vérifier cette constatation ; les peuplements étudiés dépassent l'âge de 50 ans.
- 2) Partie correspondant à l'âge de 120 - 160 ans. Elle forme une masse hétérogène caractérisée par des résidus importants. Au-delà de 160 ans, le nombre de donnée présenté baisse fortement rendant l'interprétation du nuage difficile. Le modèle s'ajuste donc bien aux données pour les âges compris entre 50 et 120 ans, mais s'avère moins pertinent en dehors de cette période.

## Conclusion et perspectives

Au terme de cette étude, il apparaît clair que l'effet station agit d'une manière prépondérante sur le comportement du chêne zéen dans l'Akfadou. Les facteurs de discrimination majeurs sont le substrat, la densité des peuplements, l'âge et la topographie du terrain. Au vue des résultats globaux obtenus, l'approche méthodologique et des analyses appliquées nous oriente sur la stratégie d'échantillonnage et d'inventaire que nous pourrions envisager ultérieurement. Apparemment, une stratégie d'échantillonnage stratifiée progressive et élargie à des situations de milieux aussi variées que possible fournira des résultats plus probants, voire l'obtention de modèles précis et performants.

En effet, l'étude dans sa globalité montre des modèles différents d'une station à l'autre pour le cas de l'ajustement des modèles pour la variante « Hauteur-Circonférence ». Les stations (ST1, ST2, ST3 et ST4) fournissent un modèle de forme polynomial. Toutefois, elles divergent sensiblement du point de vue de leurs constantes et/ou des coefficients de régressions. Les modèles des stations (ST5 et ST6) divergent par rapport aux quatre premières citées. Elles se distinguent respectivement par des modèles linéaires et de puissance. Ce dernier modèle explique que la ST6 affiche une croissance plus rapide que nous attribuant au stade d'évolution de la futaie : zéenaie la plus jeune que nous classons au stade de haut perchis.

Au niveau de l'ajustement de modèles globaux, la prise en compte des six stations n'a pas permis d'obtenir un résultat satisfaisant ; ils sont biaisés par l'irrégularité et le déséquilibre des dimensions de l'arbre et de la structure de la station 2. L'élimination de cette station dans l'ajustement de modèle ultérieur a amélioré la qualité du modèle. En soi, nous pouvons retenir qu'un fort déséquilibre entre les classes d'âge et/ou de diamètre ou de circonférence peut affecter considérablement le modèle d'où l'intérêt de vérifier la normalité de distribution des variables dendrométriques avant l'ajustement.

Le paramétrage des modèles en fonction des données a fourni des résultats de meilleure qualité dans le cas de la forme hyperbolique. La séparation des zones de basse et de haute altitude apparaît assez nettement, et ce par la comparaison des coefficients issus de

chaque zone. L'ajustement du modèle « H-âge », modèle de Chapman-Richards le plus souvent adopté en foresterie, apparaît plus explicite ; il met en évidence l'antagonisme de croissance des variables dendrométriques de l'espèce entre les zones de basse et de haute altitudes et un caractère plus productif aux zones de basse altitude.

Par rapport à la densité des peuplements et de l'âge, il ressort que tous les modèles testés ne prennent en compte que les densités moyennes gravitant autour de 800 tiges/ha. Les densités supérieures ou inférieures fournissent des résidus importants. Quant à l'âge, au-delà de l'intervalle « 50-120 ans », le modèle rejette les arbres sortant de cet intervalle. C'est d'ailleurs vrai quand on se réfère à la littérature qui fixe la révolution ou la période de l'exploitation du chêne zéen à l'âge limite de 120 ans (BOUDY, 1955) ou bien juste 100 ans (MESSAUDENE, 1989).

Pour les perspectives, l'établissement de modèles locaux, régionaux et nationaux doit être basé sur un choix de stations très contrastées du point de vue des conditions écologiques de manière à mettre en évidence les interactions facteurs du milieu-variables dendrométriques. Au niveau local, l'élargissement de l'étude à toute la forêt d'Akfadou et d'Aït-Ghobri, forêts en un seul tenant représentant 18% de la forêt caducifoliée algérienne, peut fournir des indications et des modèles plus pratiques qui peuvent être utilisés dans le contexte de l'aménagement forestier durable de ce massif. C'est à partir des modèles définis sur la base de choix de stations issues de la stratification que se fera la division en unités de gestion (série, parcelle et sous parcelles). Autrement dit, application la méthode de division de type analytique.

Aux niveaux régional et national, l'intégration des chênaies de l'est et de l'ouest d'Algérie sera en mesure de nous fournir, en plus de la variabilité structurale des peuplements, des modèles expliquant l'impact de la diversité géographique, climatique et historique. Ainsi, l'établissement d'une base de données regroupant à la fois les inventaires dendrométriques, les facteurs stationnels, régionaux et nationaux permettront d'établir des modèles plus complexes.

Egalement, pour une meilleure prise en considération du facteur historique, facteur préalable et indispensable pour la gestion et l'orientation du régime futur, ainsi la datation absolue et la connaissance de la croissance radiale, l'approche dendroécologique permettra la mise en évidence des facteurs régissant la croissance en diamètre du chêne zéen. L'introduction de la composante cerne et des relative aux différentes éclaircies appliquées dans le passé dans diverses chênaies et selon des taux variés, apportera plus d'indication sur le fonctionnement de l'écosystème « chênaie caducifoliée algérienne ».

# Bibliographie

**ACHHAL A., AKABLI O., BARBERO M., BENABID A., M'HIRIT A., PEYRE C., QUEZEL P., RIVAS-MARTINEZ S., 1980** – A propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au Maroc. *Ecol. Médit.* Fasc. N°5, pp. 211-249.

**ALCARAZ C., 1989** – Contribution à l'étude des groupements à *Quercus ilex* et *Quercus faginea* subsp. *tlemcenensis*, des monts de Tlemcen(Algérie). *Ecol. Médit.* Tome XV, Fasc. 3/4, pp. 15-32.

**AUSSENAC G., 1973** – Climat, microclimat et production ligneuse. *Ann. Sci. Forest.*, 30 (3), pp. 239-258.

**BEAL D.J., 2005** – SAS Code to Select the Best Multiple Linear Regression Model for Multivariate Data Using Information Criteria. Science Applications International Corporation (SAIC), Tennessee, USA, 6p

**BEDARD S., 2002** – L'estimation du potentiel de croissance des stations forestières : exemple du sous-domaine de la sapinière à bouleau jaune de l'est du Québec. Mémoire de Recherche Forestière n° 140, Direction de la Recherche Forestière, Québec, 44p.

**BERGEZ J.L., BISCH J.L., CABANETTTE A., PAGES L., 1988** – un programme simple de régression non linéaire pondérée adoptée aux estimations de biomasses forestière. *Ann. Sci. Forest.* 45 (4), pp. 399-412.

**BERRICHI M., 1993** – contribution à l'étude de la production et de la qualité du bois de trois especes du genre *Quercus* : *Q. retundifolia* Lank, *Q. suber* L et *Q. faginea* Lamk. Cas des monts de Tlemcen. Mém. Mag. Sci. Agr., INA, El Harrach, Alger, 177p.

**BESSE P., 2003** – Pratique de la modélisation statistique. Publications du laboratoire de statistique et probabilités. Univ. Paul Sabatier (Toulouse III), 81p.

**BLEL A., 2006** – L'outil statistique en expérimentation. Office des publications universitaires (OPU), Alger, 163p.

- BOUCHON J., 1979** – Structure des peuplements forestiers. *Ann. Sci. Forest.* 36 (3), pp. 175-209.
- BOUDY P., 1955** – Economie forestière nord-africaine “ description forestière de l’Algérie et de la Tunisie “. Ed. Larose, Paris, 483p.
- COLIN F., HOULLIER F., LEBAN J.M., NEPREU G., 1992** – Modélisation de la croissance des arbres, des peuplements et de la qualité du bois. *Revue forestière française* XLIV (3), pp. 248-254.
- COURBAUD B., GOEAUD F., DREYFUS PH., BONNET F.R., 2000** – sylviculture et modèle de croissance dépendant des distances : mise en œuvre du logiciel CAPSIS3 sur des pessières irrégulières de montagne. *Revue forestière française*, LII (5), pp. 425-439.
- COURBAUD B., HOULLIER F., RUPE C., 1993** – Un modèle de croissance en hauteur des arbres en pessière pure irrégulière de montagne. *Ann. Sci. Forest.* 50 (4), pp. 337-351.
- DAGNELIE P., 1973** – Théories et méthodes statistiques. Applications agronomiques. Presses agronomiques de Gembloux, Belgique, vol.1, 2<sup>ème</sup> édition, 377p.
- DAGNELIE P., RONDEUX J., 1971** – La répartition des arbres en catégories de grosseur: déciles de Jedlinski et distributions Log-normales. *Ann. Sci. Forest.* 28 (3), pp. 289-296.
- DECOURT N., 1964** – Les tables de production: leur limites et leur utilités. *Revue forestière française*, N° 16, pp. 640-657.
- DECOURT N., GODRON M., ROMANE F., TOMASSONE R., 1969** – Comparaison de diverses méthodes d’interprétation statistique de liaison entre le milieu et la production du pin sylvestre en Sologne. *Ann. Sci. Forest.* 26 (4), pp. 413-443.
- DELEUZE C., 1995** – Intégration de concepts éco-physiologiques dans les modèles de croissance et de qualité des bois. *Revue forestière française*, XLVII N° sp. pp. 149-155.
- DELEUZE C., BLAUDEZ D., HERVE J.C., 1996** – ajustement d’un modèle hauteur – circonférence pour l’*épicéa commun*. Effet de la densité. *Ann. Sci. Forest.* 53 (1), pp. 93-111.
- DELEUZE C., HOULLIER F., 1995** – Predicting of stem profile of *Picea abies* using a process-based tree growth model. *Tree Physiology*, N°15, pp. 113-120.
- DHOTE J F., HERVE JC., 2000** – Changement de productivité dans quatre forêts de chêne sessiles depuis 1930 : une approche au niveau du peuplement. *Ann. Sci. Forest.* 57 (7), pp. 651-680.
- DHOTE J.F., 1995** – Définition de scénarios d’éclaircis pour le hêtre et le chêne. *Revue forestière française*, XLVII N° sp. pp. 106-110.

**DHOTE J.F., 1997** – Effets des éclaircis sur le diamètre dominant dans les futaies régulières de hêtre et de chêne sessile. *Revue forestière française*, XLIX (6), 557-577.

**DHOTE J.F., DE HERCE E., 1994** – Un modèle hyperbolique pour l'ajustement de faisceaux de courbes hauteur-diamètre, *Can. J.For. Res.* 24, (9), pp. 1782–1790.

**DRESS F., 2002** – probabilités et statistiques pour les sciences de la vie. Ed. Dunod, Paris, 184p.

**DUPLAT P., PERROTTE G., 1981** – inventaire et estimation de l'accroissement des peuplements forestiers. ONF (section technique), Paris, 432p.

**DURAND J.H., 1950** – sur quelques sols de la forêt de l'Akfadou et des environs de Yakouren. Direction du service de la colonisation et de l'hydraulique (gouvernement générale d'Algérie).

**FONWEBAN J.N., HOULLIER F., 1995** – Modèle de croissance en hauteur à partir de placettes temporaires pour l'eucalyptus saligna au Cameroun. *Ann. sci. forest.*, 52 (3), pp. 263-281.

**FORTIN M., BERNIER S., SAUCIER J-P., LABBE F., 2009** – Une relation hauteur-diamètre tenant compte de l'influence de la station et du climat pour 20 espèces commerciales du Québec. Mémoire de Recherche Forestière n° 153, Direction de la Recherche Forestière, Québec, 40p.

**GELARD J.P., 1978** – Carte géologique du nord-est de la Grande Kabylie, schéma structural, échelle 1/2.10<sup>5</sup>. Travaux du laboratoire associé au C.N.R.S. N°157.

**GOREAUD ,2000** – Apports de l'analyse de la structure spatiale en forêt tempérée à l'étude et la modélisation des peuplements complexes. These doct, sciences forestière. INGREF, Nancy, 525p. annexes.

**GOREAUD F., DE COLIGNY F., COURBAUD B., DHOTE JF., DREYFUS PH., PEROT T., 2005** – La modélisation : un outil pour la gestion et l'aménagement en forêt. *Vertigo. La revue en sciences de l'environnement*, Vol6 N°2, pp. 1-12.

**HADJAJ K., 2010** – Etude de la croissance du pin d'Alep dans les reboisements de la région de Naama – Mecheria (wilaya de Naâma). Mém. Mag. For. Univ. Aboubekr Belkaid, Tlemcen, 85 p.

**HAMMICHE A., 1978** – Etude des relations entre le milieu stationnel et les caractéristiques dendrométriques de *Quercus merbeckii* Dur. Sur versant nord de la forêt de l'Akfadou ouest. Mém. Ing. agr., INA, El Harrach, 55p.

**HAMMOUCHE Y., 1998** – Etude de la croissance radiale du chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd) dans la forêt domaniale de beni-ghobri (Tizi-ouzou). Mém. Ing. agr. univ. Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 64p. Annexes.

- HOULLIER F., BOUCHON J., BIROT Y., 1991** – Modélisation de la dynamique des peuplements forestiers: Etat et perspectives. *Revue forestière française*, XLIII (2), pp. 87-107.
- HUANG S., TITUS S. J., WIENS D. P., 1992** – Comparison of nonlinear height–diameter functions for major Alberta tree species. *Can. J. For. Res.* (22) pp. 1297-1304.
- HUART O., LEJEUNE P., LEMOINE N., RONDEUX J., 2004** – Proposition d’une méthode d’inventaire « sylvicole » pour le diagnostic post-perturbation des hêtraies wallonnes touchées par la « maladie du hêtre ». *Note technique forestière de Gembloux* n° 12, 26p.
- KAOUANE, 1987** – Analyse dendrométrique d’un peuplement de chêne zéen dans la forêt de Guerrouch (Jijel). Mém. Ing. agr., INA, E Harrach, Alger, 78p.
- KHATOURI M., BRAIN D., 1990** – Growth and yield model for uneven-aged *Cedrus atlantica* stands in Morocco. *Forest Ecology and Management*, N°36, pp. 253-266.
- LANIER L., 1986** – Précis de sylviculture. Ed. ENGREF, Nancy, 468p.
- LANNER, R.M. 1985** – On the insensitivity of height growth to spacing. *Forest Ecology and Management*, N° 13, pp. 143-148.
- LARIBI M., 2000** – Contribution à l’étude phytosociologique des formations caducifoliées à *Quercus canariensis* Willd et *Quercus afares* Pomel du massif forestier d’Ath Ghobri et d’Akkfadou (Kabylie). Mém. Mag. Univ. Mouloud Mammeri, Tizi ouzou, 140p.
- LAROCQUE G.R., 2008** – synthèse des différents types de modèles de prévision de la dynamique des écosystèmes forestiers et leur utilité dans un contexte de nouvelles exigences en aménagement forestier. Colloque sur la modélisation forestière (MRNF - Québec), 16p.
- LE TACON F., 1973** – Sol, nutrition et production ligneuse. *Ann. Sci. Forest.* 30 (3), pp. 259-285.
- LEJEUNE P., 1994** – Construction d’un modèle de répartition des arbres par classes de grosseur pour les plantations d’épicéa commun (*Picea abies* L Karst) en Ardenne belge. *Ann. Sci. Forest.* 51(1), pp. 53-65.
- LEMOINE B., 1981** – Application de l’analyse factorielle à l’étude de la croissance en hauteur des arbres : exemple du pin maritime. *Ann. Sci. Forest.* 38 (1), pp. 31-54.
- LETREUCH-BELAROUCI N., 1992** – Notes de cours de sylviculture générale. Ed. OPU, Alger, 137p.
- LETREUCH-BELAROUCI N., 1994** – Réflexion autour du développement forestier. Institut de foresterie (univ. Tlemcen), 67p.
- LETREUCH-BELAROUCI N., 1998** – dendrométrie : méthodes d’estimation de la productivité stationnelle. Ed. OPU, Alger, 75p.

- MAZEGHRANE O., MESSAOUD N., 1990** – contribution à l'analyse dendrométrique d'un peuplement naturel de chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd) dans la forêt expérimentale de Tizi Oufellah (Beni-Ghobri). *Mém. Ing. arg. univ. Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou*, 54p.
- MEDDOUR R., 1993** – Analyse phytosociologique de la chênaie caducifoliée mixte de Tala Kitane (Akfadou, Algérie). *Ecol. Médit.* Tome XIX Fasc. 3/4, pp. 43-51.
- MESSAOUDENE M., 1989** – dendroécologie et productivité de *Quercus afares* POMEL et *Quercus canariensis* WILLD. dans les massifs forestiers de l'Akfadou et de Beni Ghobri en Algérie. Th. Doct. ès sciences, univ. Aix – Marseille III. Fac. St Jérôme, Marseille, 123p.
- MESSAOUDENE M., 1996** – Chêne zéen et chêne afares. *La forêt algérienne* (N°1 fév.-mars), INRF, Bainem, Alger, pp. 18-25.
- MESSAOUDENE M., DERRIDJ A., 1996** – Paléoécologie : découverte d'un arbre de 25000 ans dans la forêt de Yakouren. *La forêt algérienne* (N°2 déc.), INRF, Bainem, Alger, p.36.
- MESSAOUDENE M., LARIBI M., DERRIDJ A., 2007** - Étude de la diversité floristique de la forêt de l'Akfadou (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques*, 2007, N° 291 (1). pp 75-81.
- MESSAOUDENE M., TAFER M., LOUKKAS A., MARCHAL R., 2009** – Etude de quelques propriétés physiques du bois de chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd) de la forêt des Aït Ghobri (Algérie). *Bois et Forêts des Tropiques*, CIRAD de Montpellier, pp39-50.
- MOKHTARI A., 2006** – Modélisation des peuplements de chêne zéen (*quercus canariensis* Willd) dans la forêt de Beni-Ghobri (Yakouren) et de Souk Ahras. *Mém. Mag. Sci. Agr., INA, El Harrach, Alger*, 100p. annexes.
- NIGH G., 2004** – A comparison of fitting techniques for ponderosa pine height-age models in British Columbia. *Ann. Sci. Forest.* 61, pp. 609-615.
- OTTORINI J. M., 1978** – Aspects de la notion de densité et croissance des arbres en peuplement. *Ann. Sci. Forest.*, 35 (4), pp. 299-320.
- PARDE J., BOUCHON J., 1988** – dendrométrie. Ed. Ecole Nationale des Eaux et des Forêts (ENGREF), Nancy, 328p
- PAUWELS D., 2001** – Le VERTEX : une nouvelle génération de dendromètres multi-usage. *Note technique forestière de Gembloux* n° 1, 14p.
- PAUWELS D., THIBAUT A., LEJEUNE P., RONDEUX J., 1999** – Elaboration de courbes de croissance en hauteur dominante pour les mélèzes (*Larix decidua* Mill. et *Larix kaempferi* (Lamb.) Carr.) en Belgique méridionale. *Ann. Sci. Forest.*, 56 (1), pp. 27-34.

- POUDEROUX S., DELEUZE C., DHOTE J. F., 2001** – Analyse du rendement des houppiers dans un essai d'éclaircis de hêtre grâce à un modèle à base éco physiologique. *Ann. Sci. Forest.* 58 (3), pp. 261-275.
- QUEZEL P., BONIN G., 1980** – les forêts feuillus du pourtour méditerranéen : constitution, écologie, situation actuelle et perspective. *Revue forestière française*, tome 3 (1980), pp.253-268.
- QUEZEL P., MEDAIL F., 2003** – Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Ed. *Elsevier SAS*. 571p.
- RATHGEBER C., BLANC L., RIPERT C., VENNETIER M., 2004** – Modélisation de la croissance en hauteur du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en région méditerranéenne française. *Ecol. Médit.* Tome 30, fasc. (2), pp. 205-218.
- RONDEUX J., 1993** – la mesure des arbres et des peuplements forestiers. Ed. Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique, 521p.
- SALAMANI M., 1990** – Contribution à l'étude de la végétation actuelle et passée (Holocène) du massif de l'Akfadou (Kabylie). Th. Mag. Sci. Nat. Univ. Sci. Tech. Houari Boumedienne (USTHB), Alger, 157p.
- SALAMANI M., 1991** – Premières données palynologiques sur l'histoire Holocène du massif de l'Akfadou (Grande-Kabylie, Algérie). *Ecol. Médit.* Tome XVII, pp. 145-159.
- SCHMIDT-LAINE CL., PAVE A. 2008** – La modélisations au cœur de la démarche scientifique et à la confluence des disciplines. *Les cahiers du Musée des Confluences*. N°2, 21-34.
- SGHAIER T., GARCHI S., 2009** – Modélisation de la croissance en hauteur dominante et fertilité des peuplements de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Ecol. Médit.* Vol. 35, pp. 49-63.
- STEWART PH., ROUSTIDE R., 1974** – cours de sylviculture. Institut National Agronomique, El Harrach, Alger, 101p.
- ZINE AL ABDINE A., 1987** – Application de l'analyse multidimensionnelle à l'étude taxonomique et phytoécologique du chêne zéen (*Quercus faginea* Lamk. s. I) et ses peuplements au Maroc. Thèse de Doct. Ing., univ. D'Aix-Marseille III, fac. De St Jérôme, 127p.

## Résumé

L'objectif du présent travail est la caractérisation de la croissance des variables dendrométriques par la construction et l'ajustement de modèles pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd.) dans le massif forestier de l'Akfadou (Tizi ouzou).

L'analyse descriptive des variables retenues montre une influence non négligeable de l'hétérogénéité stationnelle qui caractérise cette forêt sur la croissance en hauteur et en circonférence.

Il a été obtenu plusieurs formes géométriques des modèles mais celle polynomiale apparaît prépondérante dans toutes les stations, la différence observée dans les paramètres des modèles reflète la différence de croissance et de dynamique des hauteurs en fonction de la circonférence et ce pour chaque station.

La comparaison des prévisions des modèles stationnelles montre que les hauteurs les plus élevées sont constatées dans les stations les plus denses.

L'établissement de modèles globaux montre que la forme parabolique n'est pas bien adaptée à nos données par contre l'ajustement avec le modèle hyperbolique permet d'obtenir des résultats satisfaisants. L'analyse des résidus montre clairement l'effet de l'âge sur la croissance et l'évolution des variables mais l'effet de la densité est moins apparent.

**Mots clés :** ajustement – modélisation – chêne zéen – Akfadou – station – densité.

## Abstract

The objective of this work is to characterize the growth of dendrometric variables by construction and adjustment of models for the oak zéen (*Quercus canariensis* Willd.) in Akfadou forest (Tizi ouzou).

Descriptive analyze of retained variables shows the important influence of heterogeneity of stand area witch characterize this forest on height and circumference growth.

Is obtained many geometric forms of models but polynomial form appears dominating in all the stands, the difference observed in the parameters of models reflects the difference of growth and dynamic of height growth according to the circumference on each stand.

The forecasts comparison of stands models shows that the highest height values are noted in the densest stands.

The establishment of global models shows that parabolic form is not adapted with our data; however the adjustment with hyperbolic form allows obtaining satisfactory results. Residuals treatment displays clearly that the age effect on growth and evolution of variables but density effect is less apparent

**Key words:** adjustment – modeling – oak zeen – Akfadou – stand area – density.

## المخلص

الهدف من هذه الدراسة يكمن في تمييز نمو المتغيرات الدندرومترية (القياسات الشجرية) بإنشاء و تطابق نماذج لشجرة غابة اكفادو (تيزي وزو) في (*Quercus canariensis* Willd.) بلوط الزان.

التحليل الأضحاحي للمتغيرات اظهر تأثيرا معتبرا للاتجانسية المحطات، التي تتميز بها هذه المنطقة، في النمو الطولي و العرضي.

تم التوصل إلى مجموعة من الأشكال الهندسية لكن القطع المكافئ يظهر الأكثر بروزا في كل المحطات. الاختلاف في معاملات النماذج يعكس اختلاف تطور النمو الطولي و العرضي.

مقارنة النتائج المتوقعة لنماذج المحطات يظهر أن الأطوال الكبيرة لوحضت في المحطات ذات الكثافة المرتفعة. إنشاء النماذج الإجمالية يظهر أن الشكل "قطع مكافئ" لا يتوافق مع معطيات المنطقة لكن التطابق مع النموذج "قطع زائد" اظهر نتائج مرضية. تحليل بقايا النماذج يظهر جليا تأثير عمر الشجرة في العلاقة بين المتغيرات لكن تأثير الكثافة الشجرية يظهر بشكل غير واضح.

**الكلمات المفتاحية:** تطابق – نماذج – بلوط الزان – اكفادو – محطة – كثافة.