

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

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, des Sciences de la Terre et de l'Univers  
Département des Ressources Forestières



## Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de :

# Doctorat en Foresterie

Présentée par

**RABHI Khellaf**

Thème

**Modélisation et optimisation de la croissance et du fonctionnement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le Djurdjura par l'intégration de descripteurs écologiques et dendrométriques.**

Soutenue le 07/06/ 2015

Devant le jury :

Président	: <b>M. BOUHRAOUA R.T.</b>	Pr. (Université de Tlemcen)
Directeur de thèse	: <b>M. MESSAOUDENE M.</b>	Directeur de Recherches (I.N.R.F. Tizi Ouzou)
Examineurs :	<b>M. BENTOUATI A.</b>	Pr. (Université de Batna)
	<b>M. DERRIDJ A.</b>	Pr. (Université de Tizi Ouzou)
	<b>M. BENMANSOUR Dj.</b>	M.C. (Université de Tlemcen)
	<b>Me. MEDJAHDI-LETREUCH A.</b>	M.C. (Université de Tlemcen)

2014/2015

A la mémoire de ma mère

A la mémoire de mon frère

A mon père

A ma femme et à ma belle famille

A mes sœurs et à leurs maris

A ma grande famille

A tous mes ami(e)s

# Remerciements

Mes remerciements vont d'abord à celui qui m'a formé et m'a guidé depuis mes premiers débuts en foresterie. Je suis infiniment reconnaissant envers mon directeur de thèse ; monsieur Messaoudène Mahand, Directeur de Recherches à L'INRF pour ses soutiens précieux et conseils avisés et déterminants aussi bien sur terrain que pendant la préparation du manuscrit. Je garde en lui des qualités humaines remarquables qui m'ont permis de puiser de son expérience et de ses connaissances très diversifiées. Je ne peux oublier sa gentillesse, sa disponibilité et tout ce temps qu'il a consacré, et ce depuis le mémoire d'ingénieur, pour m'initier à la recherche forestière.

J'adresse mes remerciements à monsieur Bouhraoua Rachid Tarik, professeur à l'université de Tlemcen qui m'a honoré en acceptant de présider le jury. Je le remercie pour sa gentillesse que j'ai beaucoup appréciée pendant les années d'étudiant passées à Tlemcen.

Ma gratitude va également à monsieur Bentouati Abdallah, Professeur à l'université de Batna pour ses soutiens et conseils au cours de mes premiers pas dans l'enseignement universitaire. Je me souviens toujours de cet accueil chaleureux de la part des membres de sa famille à mon arrivée à Batna. Enfin, je suis content de le voir dans ce jury.

Je suis très honoré de la présence de monsieur Derridj Arezki, Professeur à l'université de Tizi ouzou et de madame Medjahdi-Letreuch Assia, maître de conférences à l'université de Tlemcen. Je les remercie d'avoir accepté de faire partie de ce jury. Merci également à monsieur Benmansour Djamel, maître de conférences à l'université de Tlemcen qui a accepté de participer aux débats en apportant sa touche mathématique.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance au personnel de la station de L'INRF d'Azazga d'avoir mis à ma disposition le transport et le matériel nécessaire. C'est grâce à ce petit bureau où j'ai trouvé des conditions de travail optimales que j'ai pu finaliser cette thèse. A tous, je dis MERCI.

Je suis reconnaissant envers monsieur Abderahmani Said, Directeur du Parc National de Belezma qui a mis à mon service l'hébergement à Batna. Les bons moments que j'ai passés avec le personnel du secteur de Fesdis m'ont procuré de la stabilité qui m'a permis d'avancer dans la rédaction, pour ça je suis très reconnaissant.

A toutes les personnes que j'ai rencontrées au Parc National de Djurdjura, particulièrement au secteur de Tikjda, je les remercie vivement de m'avoir facilité le travail sur terrain. Une pensée particulière à ces deux jeunes ouvriers saisonniers de Takerbouzt qui, avec abnégation et malgré les conditions de travail difficiles, ont pu protéger le reboisement de cèdre du col de Tirourda. Pour leur aide, *TANEMIRT*. Mes remerciements vont aussi à monsieur le directeur et au personnel du Parc National de Chréa pour l'hébergement et l'aide apportée au cours du travail sur les reboisements de cèdre.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à madame Catherine Collet, chargée de recherches au laboratoire LERFOB, UMR INRA-ENGREF, Nancy (France), qui a aimablement accepté de me recevoir. Merci pour toute la documentation envoyée et pour le temps consacré pour m'expliquer les méthodes d'établissement du modèle de transfert radiatif.

Un grand merci à monsieur Mellizi Mohamed, Directeur de l'Institut Agrovétérinaire à l'université de Batna d'avoir facilité mon déplacement à l'étranger et à tous mes collègues et amis qui, de près ou de loin m'ont aidé même avec une bonne parole à finaliser ce travail.

Merci à tout le personnel administratif de l'université de Tlemcen sans oublier mon amie Hidayet de m'avoir facilité les démarches administratives et me permettre d'éviter plusieurs déplacements.

Enfin, un grand salut à tous mes enseignants du primaire, du collège, du lycée, de l'Ecole nationale supérieure agronomique d'Alger et de l'université de Tlemcen, avec qui j'ai appris beaucoup de choses.

# Liste des abréviations

$\bar{E}$  : Le biais.

$\bar{X}$  : Moyenne arithmétique.

**A** : Asymétrie du houppier.

**a** : Paramètre de position de la distribution de Weibull.

**AcC** : Accroissement annuel en circonférence.

**AcH** : Accroissement annuel en hauteur.

**ACP** : Analyse en composantes principales.

**AIC** : Akaike information criterion.

**Alt** : Altitude.

**b** : Paramètre d'échelle de la distribution de Weibull.

**B** : Belezma.

**BP** : Bas perchis.

**c** : Paramètre de forme de la distribution de Weibull.

**C** : Circonférence du tronc à 1,3m.

**CCF** : Facteur de compétition des couronnes.

**CE** : Coefficient d'extension maximale du houppier.

**Chell** : Chellata.

**CI** : Coefficient d'interdatation.

**CPR** : Chantier populaire de reboisement.

**Cum** : Courbe de croissance cumulée.

**CV** : Coefficient de variation.

**CW** : Crown width.

**D** : Diamètre du tronc à 1,3m.

**D(KS)** : distance du test de Kolmogorov et Smirnov.

**D<sub>0</sub>** : Densité de plantation.

**D<sub>ac</sub>** : Densité actuelle.

**D<sub>b</sub>** : Diamètre à la base du houppier.

**Den. E** : Modèle pour le peuplement de densité élevée.

**Den. F** : Modèle pour le peuplement de densité faible.

**Den. M** : Modèle pour le peuplement de densité moyenne.

**Dg** : Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne.

**DGF** : Direction Générale des Forêts.

**Djur** : Djurdjura.

**Dp** : Dépérissant.

**e** : Excentricité du houppier.

**Ei** : Indice de Reynolds.

**EM<sub>h</sub>** : Extension horizontale maximale du houppier.

**Exp** : Exposition.

**F** : Fourré.

**FA** : Futaie adulte.

**Fer. B** : Modèle pour le peuplement de bonne fertilité.

**Fer. F** : Modèle pour le peuplement de faible fertilité.

**Fer. M** : Modèle pour le peuplement de fertilité moyenne.

**G** : Gaulis.

**G** : Surface terrière.

**H** : Hauteur totale.

**H<sub>b</sub>** : Hauteur de la base du houppier.

**H<sub>d</sub>** : Hauteur dominante.

**H<sub>m</sub>** : Hauteur de l'extension horizontale maximale du houppier.

**HP** : Haut perchis.

**H<sub>t</sub>** : Hauteur totale.

**I<sub>DM</sub>** : L'indice d'aridité de De Martonne.

**IH** : Facteur d'espacement de Hart-Becking.

**IR** : Indice de densité de Reineke.

**ISE** : L'indice de sécheresse d'Emberger.

**IV** : Facteur d'espacement de Veen.

**JF** : Jeune futaie.

**LAD** : Leaf area density.

**LAI** : Leaf area index.

**L<sub>h1</sub>** : Première longueur du houppier.

**L<sub>h2</sub>** : Deuxième longueur du houppier.

**LMC** : Largeur moyenne du cerne.

**M** : La température moyenne maximale du mois le plus chaud.

**m** : La température moyenne minimale du mois le plus froid.

**M** : Valeur maximale.

**m** : Valeur minimale.

**Mom** : Méthode des moments.

**MSE** : Le carré moyen résiduel (mean square error).

**MV** : Maximum de vraisemblance.

**N** : Effectif de l'échantillon.

**P** : Le module de précipitation annuelle.

**P(%)** : Pente en pourcentage.

**P<sub>aut</sub>** : Les précipitations automnales.

**Per** : Méthode basée sur les percentiles.

**P<sub>est</sub>** : Les précipitations estivales.

**P<sub>hiv</sub>** : Les précipitations hivernales.

**P<sub>pr</sub>** : Les précipitations printanières.

**Q<sub>2</sub>** : Le quotient pluviométrique de Stewart.

**R** : Rayon moyen de projection du houppier.

**R<sup>2</sup>** : Coefficient de détermination.

**R<sup>2</sup><sub>aj</sub>** : Coefficient de détermination ajusté.

**RDI** : Densité relative.

**RS** : Rang social.

**Sh** : Surface de projection du houppier.

**SM** : Sensibilité moyenne.

**St** : Station :

**Stc** : Surface totale des couronnes à l'hectare.

**Sy** : Chronologie de synthèse.

**T** : La température moyenne annuelle.

**TEH** : Theniet El HAd.

**Test K-S** : Test de Kolmogorov et Smirnov.

**Test N-K** : Test de Newman et Keuls.

**TG** : Tala Guilef.

**Tik** : Tikjda

**Tir** : Tirourda.

**TO** : Tizi Oujaâboub.

**VF** : Vieille futaie.

**Vh** : Volume du houppier.

**β** : Coefficient d'aplatissement.

**γ** : Coefficient d'asymétrie.

**σ** : Ecart-type.

# Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Données climatiques disponibles (1973-2000) et paramètres calculés. ....	30 -
Tableau 2.2 : Valeurs mensuelles de l'indice d'aridité de De Martonne .....	32 -
Tableau 2.3 : Matrice des corrélations des variables analysées. ....	34 -
Tableau 3.1 : Description des stations échantillonnées.....	41 -
Tableau 3.2 : Analyse descriptive des paramètres dendrométriques.....	43 -
Tableau 3.3 : Comparaison de la productivité de quelques cédraies méditerranéennes. ....	45 -
Tableau 3.4 : Descriptif des deux reboisements (col de Chelleta et Tizi Oujaâboub). ....	47 -
Tableau 3.5 : Résultats des mesures dendrométriques.....	47 -
Tableau 3.6 : Description des reboisements de Chréa. ....	50 -
Tableau 3.7 : Comparaison de la croissance et de la production des cédraies de l'Atlas blidéen. ....	50 -
Tableau 3.8 : Estimation des Ac.H et Ac.C par tranche d'âge. ....	51 -
Tableau 3.9 : Résultats des paramètres dendrochronologiques. ....	52 -
Tableau 4.1 : Principales caractéristiques dendrométriques des placettes d'échantillonnage. ....	68 -
Tableau 4.2 : Paramétrage des distributions - normale et Weibull, et qualité d'ajustement. ....	69 -
Tableau 4.3 : Représentation de la forme et de la description de chaque distribution.....	71 -
Tableau 4.4 : Résultats de la modélisation pour les trois types de fertilité. ....	73 -
Tableau 4.5 : Effet de la densité sur les paramètres descriptifs de chaque structure. ....	74 -
Tableau 4.6 : Forme et modèle de distribution de chaque plantation de l'Atlas blidéen. ....	77 -
Tableau 4.7 : Forme et modèle de distribution de chaque plantation du Djurdjura. ....	81 -
Tableau 5.1 : Résultats des paramètres morphologiques des couronnes. ....	103 -
Tableau 5.2 : Analyse descriptive des propriétés des placettes échantillonnées. ....	105 -
Tableau 7.1 : Présentation des modèles obtenus au col de Tirourda.....	142 -
Tableau 7.2 : Présentation des modèles obtenus dans l'Atlas blidéen.....	144 -
Tableau 7.3 : Modèles obtenus pour trois cas de densité. ....	146 -
Tableau 7.4 : Résultats du paramétrage des trois modèles pris en compte. ....	150 -
Tableau 7.5 : Tests de qualité et de validation des modèles établis.....	154 -

# Liste des figures

Fig.2.1 : Situation géographique du Parc National du Djurdjura et surface occupée par les forêts .....	- 27 -
Fig.2.2 : Schématisation de la chaîne du Djurdjura et localisation des différents points caractéristiques .....	- 28 -
Fig.2.3 : Projection des postes météorologiques du Djurdjura sur le climagramme d'Emberger. ....	- 32 -
Fig.2.4 : Projection des variables sur le plan factoriel 1*2.....	- 34 -
Fig.2.5 : Projection des postes météo sur le plan factoriel retenu.....	- 36 -
Fig.3.1 : Localisation géographique des stations échantillonnées. ....	- 40 -
Fig.3.2 : Anova et comparaison graphique des stations (hauteur et circonférence). ....	- 43 -
Fig.3.3 : Situation géographique du Parc National de Chréa . ....	- 49 -
Fig.3.4 : Chronologies de synthèse de la croissance radiale des douze parcelles de Tirourda.....	- 53 -
Fig.3.5 : Chronologies de synthèse des plantations du Djurdjura.....	- 54 -
Fig.3.6 : Courbes de croissance cumulée des plantations du Djurdjura. ....	- 55 -
Fig.3.7 : Chronologies de synthèse des plantations de Chréa. ....	- 56 -
Fig.3.8 : Courbes de croissance cumulée des plantations de Chréa. ....	- 56 -
Fig.3.9 : Chronologies de synthèse de Djurdjura et de Chréa. ....	- 57 -
Fig.3.10 : Courbes de croissance cumulée de Chréa et Djurdjura. ....	- 58 -
Fig.4.1 : Comparaison des effectifs théoriques et observés des trois méthodes d'estimation.....	- 70 -
Fig.4.2 : Contribution respective des classes de diamètre à l'indice d'erreur. ....	- 70 -
Fig.4.3 : Représentation graphique des structures avec l'ajustement théorique de la loi de Weibull .....	- 72 -
Fig.4.4 : Evolution des trois modèles de structure avec la fertilité. ....	- 73 -
Fig.4.5 : Graphiques des deux structures avec ajustement de la loi de Weibull.....	- 75 -
Fig.4.6 : Evolution des deux modèles de structure avec la densité. ....	- 76 -
Fig.4.7 : Présentation des structures régulières des plantations de Chréa . ....	- 79 -
Fig.4.8 : Présentation des structures groupées de Chréa en fonction de l'âge de chaque plantation..... .....	- 80 -
Fig.4.9 : Présentation des structures régulières des plantations du Djurdjura.....	- 82 -
Fig.4.10 : Présentation des structures groupées du Djurdjura. ....	- 82 -
Fig.4.11 : Evolution de la structure en fonction du stade de développement. ....	- 84 -
Fig.4.12 : Comparaison des deux distributions utilisées (à gauche) et présentation du modèle exponentiel retenu (à droite). ....	- 84 -
Fig.5.1 : Décomposition du rayonnement incident atteignant un couvert forestier. ....	- 88 -
Fig.5.2 : Représentation schématique des modifications, notamment microclimatiques, engendrées par les éclaircies en forêt et conséquences sur la flore et la faune. ....	- 90 -
Fig.5.3 : Schématisation de la forme théorique d'un cèdre de l'Atlas.....	- 94 -
Fig.5.4 : Mesure des rayons de projection de la couronne.....	- 94 -
Fig.5.5 : Photo d'un luxmètre. ....	- 98 -
Fig.5.5 : Modèle de régression obtenu : $CW=f(G,e,CE,lh)$ . ....	- 102 -

Fig.5.6 : Evolution avec la circonférence de l'excentricité et du coefficient d'extension du houppier.....	- 103 -
.....	
Fig.5.7 : Rapport de la surface totale des couronnes (Stc) sur la surface unitaire (1ha).....	- 106 -
Fig.5.8 : Procédure d'estimation du LAD ( <i>leaf area density</i> ). .....	- 107 -
Fig.5.9 : Evolution du LAI avec le stade de développement. ....	- 108 -
Fig.6.1 : Section transversale d'un tronc d'arbre.....	- 111 -
Fig.6.2 : Modèle de surface d'houppier "Sh (m <sup>2</sup> )" en fonction de l'aire d'aubier "SA (cm <sup>2</sup> )". .....	- 118 -
Fig.6.3 : Modèle de volume d'houppier "Vh (m <sup>3</sup> ) " en fonction de l'aire d'aubier "SA (cm <sup>2</sup> )" .....	- 118 -
Fig.7.1 : Modèles polynomiaux ajustés pour les trois types de fertilité. ....	- 142 -
Fig.7.2 : Modèles polynomiaux ajustés pour les plantations de Chellata et de Tizi Oujaâboub. ....	- 143 -
Fig.7.3 : Présentation des modèles polynomiaux ajustés pour les quatre plantations de Chréa....	- 144 -
Fig.7.4 : Ajustement de modèles polynomiaux pour trois peuplements de densité différente. ....	- 147 -
Fig.7.5 : Explication graphique du modèle hyperbolique. ....	- 149 -
Fig.7.6 : Modèles issus de la forme hyperbolique de Dhôte et De Hercé. ....	- 156 -
Fig.7.7 : Modèles issus de la forme hyperbolique de Schnute.....	- 156 -
Fig.7.8 : Modèles issus de la forme logarithmique de Fortin et al.....	- 157 -
Fig.7.9 : Evolution des différentes expressions de la concurrence avec l'espacement.....	- 164 -
Fig.7.10 : Evolution avec l'espacement du rang social de l'arbre de surface terrière moyenne. ....	- 164 -
Fig.7.11 : Modèles de régression obtenus (Réponse : Ht). ....	- 166 -
Fig.7.12 : Modèles de régression obtenus (Réponse : D). ....	- 166 -

# Table des matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>-1-</b>
<b>Chap.1 : Etat des connaissances sur le cèdre de l'Atlas.....</b>	<b>-6-</b>
1.1. Paléo-histoire, répartition ancienne et actuelle du cèdre de l'Atlas.....	- 6 -
1.2. Diversité génétique, variabilité géographique et amélioration .....	- 10 -
1.3. Régénération naturelle du cèdre de l'Atlas .....	- 12 -
1.4. Production de plants en pépinière et mise en place de plantations.....	- 15 -
1.5. Productivité et sylviculture du cèdre.....	- 17 -
1.6. Qualité du bois et utilisations.....	- 19 -
1.7. Facteurs de dégradation des cédraies .....	- 21 -
<b>Chap.2: Description du milieu d'étude.....</b>	<b>-25-</b>
2.1. Localisation géographique de la chaîne du Djurdjura.....	- 25 -
2.2. Eléments géologiques et pédologiques .....	- 26 -
2.3. Climat et bioclimat .....	- 29 -
2.3.1. Précipitations annuelles et saisonnières .....	- 30 -
2.3.2. Températures moyennes, minimales et maximales .....	- 30 -
2.3.3. Etude du bioclimat .....	- 31 -
2.3.4. Affinités climatiques et bioclimatiques.....	- 33 -
2.4. Peuplements sylvatiques et végétation du Djurdjura .....	- 36 -
<b>Chap.3: Les reboisements de cèdre: bilan, croissance et comportement.....</b>	<b>-38-</b>
Introduction... ..	-38-
3.1. Les plantations du Djurdjura .....	- 39 -
3.1.1. Le reboisement du "col de Tirourda" .....	- 39 -
3.1.1.1. Analyse descriptive des hauteurs et des circonférences .....	- 42 -
3.1.1.1. Croissance et productivité .....	- 44 -
3.1.2. Reboisements du col de Chellata et de Tizi Oujaâboub .....	- 46 -
3.2. Les reboisements de l'Atlas blidéen .....	- 48 -
3.2.1. Description succincte du Parc National de Chréa .....	- 48 -
3.2.2. Description, croissance et productivité .....	- 50 -
3.3. Dendroécologie des reboisements de cèdre de l'Atlas .....	- 52 -
3.3.1. Les plantations du Djurdjura .....	- 52 -
3.3.2. Les plantations de Chréa .....	- 55 -
3.3.3. Analyse comparative (Chréa et Djurdjura) .....	- 56 -
Conclusion.....	-58-

**Chap.4: Modélisation de la structure..... -60-**

Introduction.....	- 60-
4.1. La distribution de Weibull .....	- 62 -
4.1.1. Historique et définition .....	- 62 -
4.1.2. Paramètres de la loi de Weibull.....	- 63 -
4.1.3. Méthodes et procédures d'ajustement (fitting methods) .....	- 64 -
4.1.4. Qualité et pertinence des estimations.....	- 67 -
4.2. Etablissement d'un modèle global de structure régulière.....	- 68 -
4.2.1. Description du matériel expérimental .....	- 68 -
4.2.2. Estimation des paramètres.....	- 68 -
4.3. Modèle de structure et fertilité de la station .....	- 70 -
4.4. Modèle de structure et densité des peuplements .....	- 74 -
4.5. Evolution de la structure avec l'âge.....	- 76 -
4.5.1. Plantations de l'Atlas blidéen (Parc National de Chréa) .....	- 76 -
4.5.2. Plantations du Djurdjura.....	- 80 -
4.6. Modèles de structure irrégulière.....	- 82 -
Conclusion.....	-85-

**Chap. 5: Structure du couvert et modèle de transfert radiatif.....-86-**

Introduction.....	-86-
5.1. Le rayonnement solaire et le couvert végétal .....	- 87 -
5.2. La lumière comme facteur de régénération, de croissance et de production .....	- 88 -
5.3. Estimation et mesure de l'éclairement sous le couvert.....	- 90 -
5.3.1. Méthodes directes.....	- 91 -
5.3.2. Méthodes indirectes.....	- 92 -
5.3.3. Le modèle de transfert radiatif et le couvert forestier .....	- 92 -
5.4. Méthodologie appliquée .....	- 93 -
5.4.1. Choix du modèle de transfert radiatif .....	- 93 -
5.4.2. Inventaire et mesures effectuées .....	- 95 -
5.4.3. Attributs morphologiques des couronnes .....	- 96 -
5.4.4. Mesure de l'éclairement sous le couvert.....	- 97 -
5.5. Résultats, interprétations et discussions .....	- 98 -
5.5.1. Modélisation de la largeur du houppier .....	- 98 -
5.5.2. Analyse de la forme du houppier .....	- 103 -
5.5.3. Estimation de l'indice foliaire (LAI : <i>leaf area index</i> ).....	- 107 -
Conclusion.....	-109-

**Chap. 6: Le rapport aubier - duramen et la biomasse foliaire.....-110-**

Introduction.....	-110-
6.1. Macrostructure du matériau "bois" .....	- 111 -
6.2. L'aubier et le duramen .....	- 111 -
6.2.1. Différences cytologiques entre l'aubier et duramen .....	- 112 -
6.2.2. Théorie de la formation du bois parfait et physiologie de la duraminisation .....	- 113 -

6.2.3. Duraminisation et qualité du bois .....	- 114 -
6.2.4. Influence des facteurs environnementaux et sylvicoles sur la duraminisation .....	- 115 -
6.3. Proportion d'aubier et surface foliaire .....	- 116 -
6.3.1. Application de la théorie du "Pipe model" .....	- 117 -
6.3.2. Validation de la théorie du "pipe model" .....	- 117 -

**Article publié dans "Bois & forêts des Tropiques" (Cirad, Montpellier), N° 322, 2015 .....** - 120 -

**Chap. 7: Modélisation de la croissance en hauteur et en diamètre.....** -136-

Introduction.....	-136-
7.1. Données éligibles à la modélisation .....	- 137 -
7.2. Différentes approches de la modélisation.....	- 138 -
7.2.1. Approche empirique.....	- 138 -
7.2.2. Approche théorique .....	- 138 -
7.2.3. Approche "potentiel – réducteur" .....	- 139 -
7.3. Influence de la densité sur la croissance en hauteur et en diamètre .....	- 139 -
7.4. Présentation des résultats des trois approches.....	- 141 -
7.4.1. Approche empirique (adéquation à la tendance du jeu de données) .....	- 141 -
7.4.1.1. Application à l'étude de la croissance des reboisements de cèdre.....	- 141 -
7.4.1.2. Modèle parabolique et effet de la densité .....	- 145 -
7.4.2. Modèles utilisés dans l'approche théorique.....	- 147 -
7.4.2.1. Résultats du paramétrage des modèles .....	- 150 -
7.4.2.2. Qualité des ajustements et validation des modèles .....	- 152 -
7.4.2.3. Présentation graphique des modèles obtenus .....	- 156 -
7.4.3. Approche potentiel-réducteur et intégration de la concurrence .....	- 157 -
7.4.3.1. La densité et la compétition comme descripteurs de la croissance.....	- 158 -
7.4.3.2. Interprétation et discussion des résultats .....	- 162 -
Conclusion.....	-167-

**Conclusion générale et perspectives.....**-168-

**Références bibliographiques.....**-171-

**Annexes**

**Résumés**

---

# Introduction générale

Endémique à l'état spontané des montagnes du Maghreb, le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) représente par excellence l'essence noble des forêts marocaines et algériennes. A ce titre il a payé un lourd tribut à la suite d'exploitations abusives, mais aussi d'un pastoralisme exacerbé en montagne, tant en période coloniale que depuis l'indépendance des pays de l'Afrique du nord (Quézel, 1998).

C'est une essence qui a toujours suscité un intérêt important en raison de ses nombreuses qualités forestières comme le maintien d'un équilibre biologique, sa faible inflammabilité, sa production de bois de qualité, une croissance juvénile appréciable, une tolérance face aux stress climatiques et son intérêt paysager (Toth, 1978 ; M'hirit, 1982; Nédjahi, 1987; Yahy, 2007; Messaoudène et *al.*, 2004). Donc, en outre son originalité bioclimatique décrite par M'hirit (1999), le cèdre de l'Atlas relève des potentialités écologiques et de productions certaines qui méritent d'être bien cernées afin de développer cette espèce et de l'étendre dans son aire potentielle. Toutes ces qualités confèrent à cette espèce une place de choix dans les projets de reconstitution, de création et de revalorisation des peuplements particulièrement en régions méditerranéennes (Khenfouci, 2005).

En Algérie, le cèdre de l'Atlas couvre naturellement 33000 hectares répartis en plusieurs massifs. Les cédraies s'organisent en deux blocs (humide et sec). Le bloc constituant les cédraies de l'Atlas tellien est individualisé en quatre îlots : le massif du Djurdjura (2000 ha), des Babors (1300 ha), de l'Ouarsenis (1000 ha) et du mont blidéen (1000 ha) sur grès calcaire, schiste et marno-calcaire (Derridj, 1990 ; M'hirit, 1999). L'ensemble le plus important est celui des cédraies de l'Atlas saharien qui renferme d'importants peuplements dans les monts des Aurès et du Belezma (17000 ha) ainsi que dans les monts du Hodna (8000 ha) sur dolomies et calcaires dolomitiques du Jurassique supérieur et sur calcaire du Crétacé inférieur (Abdessemed, 1981).

De par les grandes superficies occupées au Maroc, le cèdre apparaît plus étudié comparativement à l'Algérie où les travaux concernant cette essence sont épars. Toutes cédraies confondues, les études en Algérie abordent essentiellement les domaines de la phytosociologie et de la phytogéographie (Abdessemed, 1981 ; Yahi, 2007 ; Meddour, 2010 et Beghami, 2013), de la dendrochronologie et ses variantes (Sarmoum, 2008 ; Touchan *et al.*, 2010 ; Kherchouche, 2013; Tafer *et al.*, non publié; Slimani, 2014), de la biosystématique, de la fructification et de la régénération (Derridj, 1990 ; Khenfouci, 2005 et Krouchi, 2010).

Dans le même contexte, une revue de littérature est présentée dans ce travail (chapitre premier) où nous avons recherché, par le biais de synthèses bibliographiques, à éclairer la paléo-histoire du cèdre de l'Atlas et les facteurs qui ont influencé sa répartition biogéographique de manière à expliquer l'effet des bouleversements climatiques et des pressions anthropiques sur le morcellement actuel des cédraies.

L'apport de la variabilité génétique du cèdre dans un programme d'amélioration qui cherche à produire des plants de qualité en pépinière est bien démontré (Mille, 1986). A ce sujet, plusieurs programmes et projets de recherche ont été réalisés sur la variabilité génétique des provenances de cèdre dans le pourtour méditerranéen et introduites dans les arboretums pour mettre en évidence les aptitudes adaptatives de cette espèce de manière à orienter le choix des provenances dans le cadre des programmes de reboisement. Ainsi, plusieurs peuplements porte-graines ont été choisis et localisés en Algérie (DGF, 2012). Les aspects de la régénération naturelle sont aussi traités pour faire ressortir les facteurs régissant sa réussite. Les plantations artificielles ont comme objectifs la restauration et la réhabilitation de l'aire de répartition du cèdre de l'Atlas en Algérie. Les plantations effectuées avec succès dans l'Atlas tellien et dans les Aurès témoignent de l'aptitude de cette espèce à coloniser des espaces et milieux nouveaux et, à ce titre, le cèdre se présente comme une essence de reboisement majeure dans les étages de végétation du supra et du montagnard méditerranéens. Il constitue donc une espèce d'avenir pour les reboisements, et ce en raison de son adaptation aux conditions de milieu difficiles (sécheresse), et peut montrer une productivité intéressante et un bois de qualité. Cependant, la réponse du cèdre aux conditions liées au milieu, au matériel végétal et aux techniques d'installation et de conduite du peuplement conditionne la réussite d'un reboisement (Courbet *et al.*, 2012). Dans cette même optique de recherche portant sur les interactions entre les potentialités de croissance des reboisements et les descripteurs du milieu, l'état des lieux et le bilan de quelques plantations réalisées dans le Djurdjura et dans l'Atlas blidéen sont présentés dans le chapitre troisième.

A long terme, l'obtention de superficies plus larges couvrant des zones moins fragiles mène inéluctablement à assigner aux forêts de cèdre un objectif plutôt de production. Les travaux concernant les débouchés économiques, la qualité du bois et les différentes utilisations sont aussi synthétisés. Dans une stratégie forestière durable, un objectif de production ne doit pas dominer celui de protection et de conservation. Les dangers qui guettent la cédraie sont multiples, le plus spectaculaire est le dépérissement qui, dans les Aurès, a induit des mortalités très notables en termes de superficie. Les causes ne sont pas encore bien établies, les résultats des recherches sont parfois concordants et parfois

contradictaires. Toutefois, les principales hypothèses vérifiées laissent penser que les sécheresses prolongées constituent le facteur déclenchant.

Les recherches autoécologiques et les résultats obtenus par de nombreux auteurs, notamment en Europe et au Maroc, permettent d'appréhender le comportement et les mécanismes écophysologiques du cèdre. En Algérie, les aspects liés à l'autoécologie, à la croissance et à la productivité du cèdre sont rarement abordés si l'on excepte ceux de Nedjahi (1987) dans l'Atlas blidéen, de Zedek (1993) à Theniet El Had et de Bentouati et Oujehih (1999) au Belezma. Par ailleurs, il ressort de cette synthèse bibliographique la rareté des thématiques liées à la modélisation et à l'optimisation de la structure, de la croissance et de la production, voire d'une manière plus globale le fonctionnement de l'écosystème "cédraie".

La connaissance des potentialités de production de l'essence pour chaque zone géographique et la maîtrise de sa sylviculture impliquent l'optimisation de son fonctionnement si bien que sa production quantitative et qualitative. La recherche d'une optimisation impose la connaissance du tempérament de l'espèce en question, de ce fait, l'approche consiste à établir des relations de cause à effet entre les différents attributs de la croissance, à savoir, la hauteur, le diamètre, l'accroissement annuel, le développement du houppier, la proportion d'aubier et les conditions du milieu (édaphique, topographique, climatique et la lumière), en incluant l'interaction de ces deux groupes de paramètres avec la densité, l'espacement ou le degré de compétition intégrés comme étant les facteurs sylviculturaux prépondérants.

A travers ces descripteurs, quelques volets inhérents à la croissance du cèdre et à son comportement sont étudiés. Les relations entre ces trois types de descripteurs et d'attributs peuvent être simplifiées à l'aide de procédures mathématiques de cheminements et d'objectifs différents où la robustesse de ces outils sera mise à profit pour une meilleure explication des phénomènes écophysologiques.

Après une description succincte du milieu d'étude (Djurdjura) et des autres sites d'échantillonnage, notamment les reboisements de Chréa, et ce à titre comparatif pour la mise en évidence d'un éventuel effet régional, les aspects pris en considération et la façon dont les unités d'échantillonnage sont utilisées pour chaque méthodologie d'approche ainsi que les objectifs recherchés sont expliqués et schématisés par l'organigramme ci-dessous présenté.

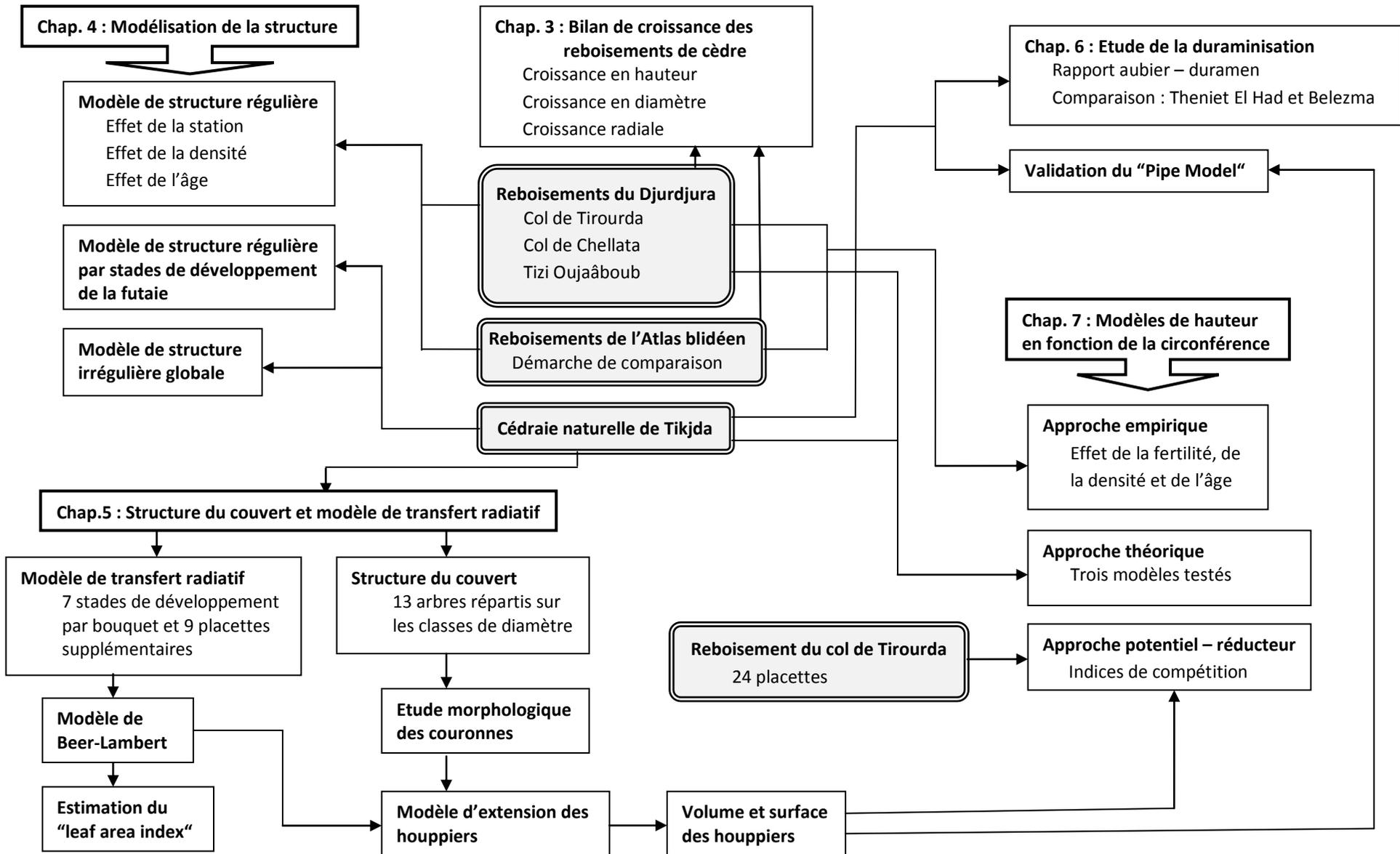
Le plan de rédaction du manuscrit est scindé en sept chapitres :

- Chapitre 1 : Etat des connaissances sur le cèdre de l'Atlas ;
- Chapitre 2 : Description du milieu d'étude ;
- Chapitre 3 : Les reboisements de cèdre de l'Atlas : bilan, croissance et comportement ;
- Chapitre 4 : Modélisation de la structure ;
- Chapitre 5 : Structure du couvert et modèle de transfert radiatif ;
- Chapitre 6 : Le rapport aubier – duramen et la biomasse foliaire ;
- Chapitre 7 : Modélisation de la croissance en hauteur et en diamètre.

La rédaction de chaque chapitre est structurée de la façon suivante :

- Introduction, problématique et objectifs ;
- Quelques concepts théoriques ;
- Méthodologie d'approche appliquée ;
- Résultats et discussions ;
- Conclusion et perspectives.

L'ordre de présentation des chapitres prend en compte le type de données nécessaires pour chaque approche puisque les résultats de chacun seront intégrés et réutilisés dans des traitements ultérieurs.



# Chapitre I

---

## Etat des connaissances sur le cèdre de l'Atlas

### 1.1. Paléo-histoire, répartition ancienne et actuelle du cèdre de l'Atlas

L'aire de distribution historique de cèdre peut être reconstituée à partir des diagrammes palynologiques publiés dans les pays du bassin méditerranéen. Néanmoins, ces diagrammes recouvrent des périodes qui ne remontent pas au-delà du Pliocène de telle sorte que l'évolution spatio-temporelle du genre *Cedrus* pour les périodes antérieures reste difficile à appréhender. Toutefois, des fossiles dont le nom évoque celui du genre actuel, *Cedrostrobus caneti*, *Protocedroxylon araucazioides*, *Cedrus lennieri*, *Cedroxylon reticulatum*, *Cedroxylon barremianum*, *Cedrus manehuldense* et *Cedrus oblonga*, ont été trouvés dans les formations d'âge Crétacé et Jurassique de Belgique, du nord de la France, du Havre et de Haute Marne. Ces données paléobotaniques laissent supposer que les espèces de cèdre sont les descendants d'un ancêtre unique qui date du Tertiaire (HCEFLD, 2006).

En effet, le genre *Cedrus* a fait son apparition en Europe au Crétacé inférieur (120 millions d'années). Son aire se caractérise par son aspect disjoint, il connaît une plus vaste extension vers le nord par rapport à sa limite actuelle même si l'aire de répartition n'a pas

beaucoup évolué après les glaciations du Quaternaire. Pons (1998) a noté que des restes macroscopiques portant les noms déjà évoqués ont été découverts en Ardenne.

Il faut souligner que, pratiquement, tous les documents macro-paléontologiques rapportés au genre *Cedrus* se limitent à cet ensemble restreint et ancien, alors que les données polliniques sont beaucoup plus nombreuses. Ces dernières reposent sur la particularité morphologique originale du pollen du genre *Cedrus*. Bien après, la synthèse de plusieurs travaux montre que dans les sites les plus proches des reliefs, les courbes polliniques de cèdre montrent des variations significatives et cohérentes. Le cèdre fait alors partie du groupe des végétaux (*Abies*, *Picea*, *Pinus*, *Artemisia*, Composées, Graminées) dont les fréquences élevées signalent les épisodes d'abord seulement froids puis froids et secs qui marquent périodiquement le cours des variations cycliques du climat qui ont prévalu à partir de 2,3 millions d'années avant aujourd'hui (Pons, 1998). Au cours des derniers cycles climatiques, le cèdre de l'Atlas s'est développé durant deux épisodes climatiquement frais et humide de la dernière période de glaciation, environ autour de 23000 ans. Mais il est probable que l'assèchement du climat au cours du Subatlantique (10000 ans), aggravé par l'intensification de la pression humaine au cours des époques romaine, phénicienne, vandale et arabe, soit à l'origine de la contraction de l'aire du cèdre au Maghreb.

En Algérie, Salamani (1991) a souligné que le cèdre de l'Atlas était présent dans la région d'Akfadou (Kabylie) durant deux brefs épisodes situés vers la fin du Boréal qui laisse penser que celui-ci jouait un rôle ancien dans la région. Un apport lointain à partir de l'aire de répartition des cédraies actuelles les plus proches (Djurdjura), distantes de 39km du site, n'est pas envisageable vu le faible pouvoir de dispersion actuellement démontré du cèdre. La présence du cèdre sur les sommets de l'Akfadou suppose un léger abaissement d'étage de végétation, les températures seraient légèrement plus basses qu'à l'heure actuelle. En effet, A la fin du Boréal s'observe un deuxième épisode à cèdre antérieur à 8000 BP (*before present*) qui marquerait une brève détérioration du climat local (certainement un réchauffement) qui a poussé le cèdre de l'Atlas à fuir les régions de moyenne altitude et céder la place à l'installation de la chênaie caducifoliée.

En concordance avec ces affirmations, Sémah et Renault-Miscovsky (2004) notent que le cèdre s'est retiré de la région d'Akfadou entre 9000 à 8000 ans BP pour ne plus avoir qu'une aire très morcelée. Les raisons évoquées sont un changement climatique défavorable ou une pression anthropique très forte. En fait, la pression humaine dans le Maghreb était bien moins importante autour de 9000 ans BP que durant les deux derniers millénaires où de fortes indications sur les cultures oléicoles et céréalières sont observées. De plus, si l'action anthropique en est la cause, alors, elle semble avoir plutôt favorisé l'expansion des chênes décidus et du chêne liège. Il serait intéressant de procéder à des reconstitutions climatiques dans cette région qui nous permettraient probablement de mieux comprendre la raison de la quasi-disparition du cèdre.

Dans l'étude palynologique réalisée à El Kala (extrême est algérien), Benslama et al. (2010) signalent un optimum de présence de *Cedrus* pendant le Pléniglaciaire (18000 ans BP), ce qui pourrait correspondre au développement de cédraies à basse altitude, par exemple dans la proche chaîne des Babors. Mais la question de la répartition des cédraies en Algérie à la fin

du Pléniglaciaire reste cependant non élucidée. Toutefois, un enregistrement obtenu à 1000 m d'altitude atteste que vers la fin du Dryas récent (11650 ans BP), une cédraie dense était remplacée par une forêt de chêne zéen.

Au Maroc, L'ensemble des études palynologiques montre que parmi les espèces arborées, deux ont joué un rôle important durant l'Holocène : *Cedrus atlantica* et *Quercus ilex*-type (Reille, 1976) (*Q. retundifolia* pour Lamb et al., 1989). Selon Sémah et Renault-Miscovsky (2004), les enregistrements polliniques de Tigalmamine et de Sidi Ali montrent de façon cohérente que le cèdre n'apparaît et ne devient une essence importante dans le Moyen Atlas qu'à partir de 6500 ans BP. Le cèdre prend encore plus d'importance après 4500 ans BP jusqu'à aujourd'hui dans cette région.

Dans le Haut Atlas, des enregistrements couvrant entre 3000 à 5000 ans BP montrent que le cèdre y est quasiment absent (Reille, 1976). L'enregistrement pollinique de Tizi n'Inouzane localisé au nord-est du Haut Atlas presque à cheval entre le Haut et le Moyen Atlas montre une transition entre la végétation de ces deux chaînes montagneuses. En effet, les essences arborées ont une importance intermédiaire et surtout le cèdre de l'Atlas est présent mais en très faible quantité. L'auteur suppose qu'il s'agit de transport lointain ou bien de la matérialisation de la limite méridionale du cèdre de l'Atlas.

En Tunisie, à Dar-Fatma en Kroumirie, si le cèdre n'est pas présent durant le Subatlantique et le Subboréal, les notations d'*Abies* et de *Cedrus* enregistrées antérieurement à 19640±530 BP suggèrent une pérennité d'îlots de peuplements de ces arbres en Afrique du nord pendant le dernier glaciaire (Bentiba et Reille, 1982). A propos d'*Abies*, les macrorestes végétaux rencontrés dans les sédiments ont permis d'identifier le genre *Abies* dans l'Akfadou à basse altitude (730m). Sur la base de la datation au C<sup>14</sup>, ce genre couvrait l'actuelle zéenaie et remontait à 25000 ans (Messaoudène et Derridj, 1996).

Sémah et Renault-Miscovsky (2004) estiment que la localisation d'un refuge de cèdre en Kroumirie est moins évidente. En fait, le cèdre semble bien plus important, au moins durant la période Postglaciaire, dans le massif de l'Akfadou (Kabylie) qu'en Kroumirie. Ce qui peut supposer la présence probable d'un refuge glaciaire pour le cèdre en Algérie avec une migration à la fois vers le Rif marocain et le Moyen Atlas où il apparaît vers 6500ans environ et vers la Kroumirie où il réapparaît dans le premier diagramme de Dar Fatma qui semble couvrir les derniers 4000 à 5000 ans BP. Quand on compare les données polliniques de l'Akfadou à celles du Moyen Atlas où le cèdre n'apparaît qu'après 6500 ans BP, on peut imaginer que le cèdre était présent durant la dernière période glaciaire dans ces montagnes algériennes et qu'il s'est propagé vers le Maroc entre 9000 et 7000 ans BP. Il serait intéressant d'obtenir des enregistrements polliniques dans les régions montagneuses au nord-ouest de l'Algérie pour vérifier une telle hypothèse. Salamani (1991) conclue que la présence d'une cédraie près du site est attestée durant deux épisodes antérieurs à 7960±150 BP. L'étage de végétation du cèdre existait donc dans l'Akfadou et son retrait du massif s'est effectué dès le début de l'Atlantique. La comparaison de ces données à celles existant dans les autres régions du Maghreb, montre que ceci constitue le plus vieux témoignage de la présence du cèdre au Maghreb. Dans le Rif (Reille, 1976), la cédraie est signalée depuis ce qui est supposé fin

Boréal jusqu'au Subboréal (Diagramme de la Daya Abartète). Dans le Moyen Atlas (Lamb et *al.*, 1989), la cédraie ne s'installe qu'à partir de 4000 BP (diagramme de Tigalmamine).

Cheddadi (2006) apporte quelques éléments d'information qui ne semblent pas corroborer avec les hypothèses émises précédemment. Les données palynologiques obtenues au Moyen Atlas (Lac Iffir) indiquent que *Cedrus atlantica* était présent dans le N-E du Moyen Atlas avant la période Holocène. Ses forts pourcentages en continue entre les dates 19430 +/- 100 et 16330 +/- 80 B.P. suggèrent la présence de populations importantes de cèdre dans cette région. Ainsi, la présence de refuges glaciaires dans le Moyen Atlas est fortement soutenue par ces nouvelles données. Cependant, La relative rareté des enregistrements polliniques couvrant la période Postglaciaire dans le Maghreb en général, ne permet d'appréhender l'histoire de la végétation et la dynamique des écosystèmes que partiellement et certainement avec plus d'hypothèses que de certitudes.

Les causes exactes de ces "disparitions-apparitions" du cèdre dans la Maghreb ne sont pas clairement établies. En plus du réchauffement climatique déjà évoqué (Sémah et Renault-Miscovsky, 2004), Cheddadi (2006) note plutôt un impact positif des changements paléo-environnementaux qui ont touché la région durant ces derniers vingt millénaires. Le recoupement de plusieurs travaux (Cheddadi et *al.*, 1998 ; Cheddadi et *al.*, 2009) montre que l'expansion du cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas après 7000 ans BP a été possible grâce à la baisse des températures hivernales en dessous d'un seuil d'environ 5°C ainsi qu'à une augmentation des précipitations. Le début de l'Holocène (entre 10000 et 7000 ans BP) a enregistré des températures d'environ 2°C au dessus de ce seuil ce qui semble avoir empêché l'expansion du cèdre.

Ces données suggèrent que la cédraie a réagi de façon extrêmement rapide à un refroidissement abrupt d'environ 15°C mais plutôt de façon tardive à un réchauffement de la même amplitude. Bien avant, aux environ de 19000 BP, Rhoujjati et *al.* (2010) notent que le climat régnant au Moyen Atlas (lac Ifrah) est très froid avec une succession de périodes sèches et humides ce qui n'a pas permis le développement d'une végétation arborescente abondante. Après 12 000 BP, une augmentation de la productivité primaire et une présence de pollen arboricole indiquent le développement de la végétation forestière.

Actuellement, le bloc maghrébin de cèdre de l'Atlas comprend l'Atlas marocain (122.100ha), le Rif (11500ha) et l'Atlas algérien (30.000ha). En Algérie, le cèdre de l'Atlas comprend deux ensembles :

Les cédraies de l'Atlas tellien où sont individualisés quatre îlots : le massif du Djurdjura (2000 ha), des Babors (500 ha), de l'Ouarsenis (1000 ha) et du mont blidien (1000 ha) sur grès calcaire, schiste et marno-calcaire.

Les cédraies de l'Atlas saharien, ensemble le plus important de la cédraie algérienne, constituent d'importants peuplements dans les Monts des Aurès et du Belezma (10000 ha.)

ainsi que dans les Monts du Hodna (5000 ha) sur dolomies et calcaires dolomitiques du Jurassique supérieur et sur calcaire du Crétacé inférieur (Quézel, 1998).

Pour prédire la situation probable du cèdre de l'Atlas pour le siècle actuel, De Marteau et al. (2007) proposent un modèle de simulation de l'aire de cette essence en se basant sur des reconstitutions climatiques et des scénarios projetés pour trois époques, 6000 ans BP, 2000, et 2100. Les conclusions tirées affirment qu'il fait globalement plus chaud à 6000 B.P. et en 2100 qu'actuellement et que les problèmes d'aridité seront plus sévères dans le futur. La simulation montre que *Cedrus atlantica* est sensible aux changements climatiques et affiche pour ces trois périodes des aires de distribution potentielle très différentes. A 6000 B.P. il devrait être réfugié sur les hauts sommets d'Afrique du nord. Son aire réelle actuelle est bien simulée par le modèle. Sa productivité potentielle élevée en Europe pourrait en faire une espèce à considérer pour les reboisements. En 2100, les modifications dans ses aires de distribution potentielle et réelle seront considérables. Il ne trouvera que peu de refuges en Afrique du nord. Par contre, le climat des territoires compris entre le nord des Alpes et le sud de la Suède, associé à la forte concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, pourrait bien lui convenir.

## 1.2. Diversité génétique, variabilité géographique et amélioration

Les études comparatives de provenance ainsi que de séquençage ont pour objectif d'asseoir sur des bases plus objectives et plus rigoureuses les schémas de sélection et les programmes de conservation des ressources génétiques forestières. Dans ce sens, très peu de travaux ont été menés et publiés sur le genre *Cedrus*. Seuls les isozymes ont été utilisés sur les quatre espèces de cèdre. Les travaux réalisés sur les isozymes montrent que les fréquences alléliques sont variables d'une espèce à l'autre et même d'une provenance à l'autre (HCEFLD, 2006).

Les critères morphologiques ont permis de décrire de nombreux écotypes pour le genre *Cedrus*. Dans le cas de *Cedrus atlantica*, on distingue deux écotypes (du point de vue bioclimatique) :

- Le type *méridionalis* du Haut Atlas marocain et de l'Atlas saharien Algérien (Hodna, Aurès) adapté à une forte sécheresse estivale ;
- Le type *tellica*, d'origine plus récente, dans le moyen Atlas et le Rif au Maroc et dans l'Ouarsenis, l'Atlas blidéen, le Djurdjura et les Babors en Algérie et supportant moins bien la sécheresse.

L'existence d'écotypes différents par rapport aux facteurs climatiques (stations allant du semi-aride supérieur à l'humide) et édaphiques (variété de substrats aussi bien siliceux que calcaires) ainsi que de morphotypes divers (formes *glauca* et *viridis*, forme à port pleureur, etc.) sont des témoins facilement observables d'une différenciation géographique et individuelle d'origine probablement génétique (Harfouche et Nadjahi, 2003).

La variabilité géographique se traduit par l'existence de races ou d'écotypes distincts par des caractères morphologiques ou plus souvent physiologiques (adaptation et croissance). La connaissance de la variabilité géographique aboutit en pratique pour un milieu d'introduction au choix d'une provenance sur la base des caractères recherchés pour assurer une bonne adaptation de chacune d'elles à la station qui lui est favorable. La variabilité géographique est appréhendée par la réalisation de plantations comparatives.

Des recherches ont révélé une grande variabilité géographique pour des caractères du pollen (Derridj, 1990), des graines (Harfouche, 1992) ou des stomates (Arbez et *al.*, 1978 ; Berka, 1997) ainsi que pour divers caractères d'adaptation, de croissance et de forme (Arbez et *al.*, 1978 ; Ferrandès, 1986 ; Berka, 1997). Une diversité génétique intra et inter spécifique est mise en exergue par la méthode AFLP (Bou Dagher-Kharrat, 2007)

Mille (1986) définit en Algérie cinq provenances : Babors, Tikjda, Belezma, Chélia et Refâa. Cependant, au Maroc, le champ est beaucoup plus prospecté où il a été question de 26 provenances. Aidrous-Larbi (2007), pour sa part, prenait en compte seulement 20 provenances réparties sur le Rif, le Moyen et le Haut Atlas où il est établi que pour les provenances marocaines, le regroupement par affinité ne suit pas leur distribution sur les chaînes montagneuses et une absence de structuration géographique liée à la variabilité génétique qui les caractérise. Arbez et *al.* (1978) trouvent, par analyse discriminante, que la provenance Bédoin (Mont Ventoux) se range dans le groupe formé par les deux provenances algériennes (Chélia et Refâa). Cette ressemblance morphologique confirme l'origine du plus grand des peuplements artificiels français. On sait en effet qu'il fut créé à partir de 1862 par l'Inspecteur des Forêts Tichadou à partir de graines importées d'Algérie (Riffaud, 1998).

Les résultats de Mille (1986) sur plantations comparatives montrent qu'après dix ans de plantation, la dispersion des performances des provenances est particulièrement importante. La meilleure adaptation des cèdres marocains apparaît clairement. Il est mis en évidence aussi l'existence d'un facteur limitant édaphique (texture argileuse à calcaire actif), les argiles de décalcarification leur sont défavorables. Par rapport à la croissance en hauteur, la provenance du Belezma s'avère peu performante comparée aux marocaines mais celles-ci sont moins vigoureuses que les provenances des Babors et du Chélia. Cependant, les cédraies artificielles de France issues de graines récoltées au Belezma sont plus performantes. En fin, les résultats issus du dispositif de Mille (1986) permettent de conclure qu'on ne peut pas parler de supériorité générale des cèdres nord-africains puisque la provenance turque de *Cedrus libani* profite d'avantage des stations à argile de décalcarification que les provenances marocaines.

En plus de la variabilité intra-spécifique, des possibilités d'hybridation existent, elles ont comme objectifs la recherche de l'effet d'hétérosis (une croissance supérieure à celle des parents) et la possibilité de combiner des caractères favorables appartenant à deux espèces différentes. Par exemple : débourrement tardif de *Cedrus atlantica* avec résistance à la sécheresse de *Cedrus libani*. En Algérie, l'aire actuelle du cèdre de l'Atlas est très morcelée, ce morcellement s'explique par les grands changements climatiques survenus durant le

Quaternaire récent qui ont vu le recul de la cédraie et l'apparition d'espèces concurrentes plus adaptées aux climats régnants (Harfouche et Nedjahi, 2003). Ces populations très réduites sont sujettes aux pertes de la vigueur causées par la consanguinité. A ce sujet, Mille (1986) note que la consanguinité provoque généralement chez les conifères une perte de vigueur (croissance en hauteur) considérable.

L'hybridation semble être une option d'avenir intéressante. De plus, Aidrous-Larbi (2007) remarque que l'isolement géographique n'est pas accompagné d'isolement reproductif, ces taxons s'hybrident aisément et donnant même naissance à des hybrides fertiles. Cette vicariance est-ouest avec isolement reproductif incomplet est commune en méditerranée et pourrait résulter d'un isolement géographique au cours du Quaternaire (Fady, 2005 in Aidrous-Larbi, 2007).

Toutefois, Mhirit (1999) note que le domaine relatif à variabilité et à l'amélioration est encore peu développé. L'individualisation des peuplements porte-graines est presque achevée au Maroc, en Algérie, en Turquie, en France et au Liban. Par contre, seules la France (1972-78), l'Italie (à partir de 1980) et le Portugal (1993) ont engagé un vaste programme de plantations comparatives de provenances et de descendances. En plus des résultats déjà cités, l'auteur note les conclusions suivantes :

- Le débourrement végétatif précoce et la croissance lente des provenances libanaises et syriennes de *Cedrus libani* ;
- La grande variabilité de la croissance entre les provenances de l'aire naturelle (Maroc et Algérie), la meilleure vigueur étant observée sur substrat siliceux ;
- La stabilité des peuplements artificiels de cèdre en France, qui sont parmi les plus vigoureux, dans tous les substrats aussi bien calcaires que siliceux. Cependant, les résultats obtenus en France et en Italie sont difficilement généralisables aux autres pays.

Les recherches devront être axées sur d'éventuelles interactions entre les génotypes et les conditions de reboisement (mode de plantation, cortège mycorhizien, sylviculture...). Ces recherches permettraient dans l'avenir de valoriser pleinement les potentialités des meilleurs génotypes.

### **1.3. Régénération naturelle du cèdre de l'Atlas**

Comme préalable à l'étude de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas, les travaux relatifs à la fructification, à la production de graines et à la germination ont été entrepris par Toth (1978) en France, Derridj (1990) dans le Djurdjura, Nedjahi (1993) dans l'Atlas blidéen, Khenfouci (2005) au Belezma et plus récemment par Krouchi (2010) à Tala Guilef (Djurdjura).

Courbet et *al.* (2012) notent que sur des stations fertiles, les cônes peuvent apparaître sur les arbres dès 15 à 20 ans mais la fructification ne devient suffisante pour une régénération qu'à partir de 40 ans. Cette production n'est généralement abondante que tous les 3 à 5 ans et ne concerne qu'une part variable des arbres. Le développement des cônes s'étale sur 2 ans ce qui permet d'anticiper un an à l'avance la production des graines. L'alternance gel-dégel est bénéfique, voire nécessaire, pour l'éclatement des cônes. Les graines peuvent se disperser abondamment sur un rayon de 30 à 60 m autour des semenciers, mais parfois sur de bien plus grandes distances sous l'effet d'un vent fort et/ou de la pente.

La graine de cèdre ne peut pas germer, en condition naturelle, que si la température maximale journalière avoisine les 10°C pendant 7 à 10 jours avec une tranche pluviométrique d'au moins 700 à 800 mm, se manifestant par des pluies d'été (pendant la période de croissance). Mais, si des sécheresses précoces et prolongées surviennent durant cette période, la croissance des jeunes semis peut être atténuée, avec une mortalité probable dans la plupart des cas (Lepoutre, 1963). L'influence des conditions d'alimentation hydrique sur le débourrement et la croissance des jeunes plants de cèdre a été étudiée par Finkelstein (1981) où il a montré que le déficit hydrique a tout d'abord un effet l'année même de son établissement : il induit une baisse de la vitesse de croissance et un arrêt précoce de l'élongation. Il en résulte une diminution notable de la longueur finale de la pousse annuelle. Mais l'influence du stress hydrique se manifeste également l'année suivante : les plants ayant subi une séquence d'année sèche - année humide montrent, la deuxième année, une élongation supérieure à celle des plants maintenus durant les 2 ans en conditions hydriques optimales. Ce phénomène est dû à un débourrement plus précoce des plants stressés et à une stimulation de leur vitesse de croissance.

Quant à l'effet du froid, en condition artificielle, la graine germe à une température qui varie de 4° à 6,6°C, cependant, la levée de dormance peut avoir lieu à une température de 2°C pendant 6 à 7 semaines où le taux de réussite avoisine 90% (Toth, 1978). Ducrey (1981) signale une diminution nette de la photosynthèse des plants de cèdre élevés sous serre au dessous de -2°C. Mais elle n'est pas encore nulle à -8°C. La respiration à l'obscurité est affectée dans les mêmes conditions. En réaction aux fortes chaleurs, Abdessamed (2009) note que la régulation stomatique se manifeste par une fermeture à des températures voisines de 34°C pendant 12 heures.

Il est important de souligner la résistance du cèdre au stress hydrique puisqu'il maintient son activité transpiratoire et photosynthétique jusqu'à des niveaux de grande sécheresse (Ducrey, 1994). Les potentiels de base critique (potentiel hydrique ou de sève) s'établissent entre - 30 et - 35 bars (Aussenac et Valette, 1982). En plus de l'effet des températures et de l'humidité, il est noté que les racines blanches mycorhizées contribuent à la levée de dormance par la sécrétion de gibbérelline (Riedacker, 1978).

La régénération du cèdre est soumise à des contraintes climatiques étroites, déterminées par les exigences de la plante vis-à-vis de l'eau du sol et du froid (Lepoutre, 1963). Bien avant, Boudy (1950) estimait que la régénération naturelle est exposée à une série de facteurs tels que le pâturage, le manque d'humidité, le vieillissement des peuplements où il

est indispensable d'appliquer une sylviculture rationnelle en vue d'assurer le renouvellement de ces peuplements dépérissants. Le développement de la couche herbacée accentue, certes, la concurrence mais le caractère d'essence de demi-ombre du cèdre laisse penser qu'un abri latéral permet de protéger les jeunes plantations des vents chauds, par exemple des abris en genêt (Courbet et *al.*, 2012). Dans ce sens, les espèces de sous-bois accompagnatrices des cédraies peuvent favoriser la régénération de l'essence principale. Au Parc National d'Ifrane au Maroc, Dubé (2007) démontre que l'ouverture du peuplement et le recouvrement par le chêne vert peuvent contribuer positivement à la régénération du cèdre de l'Atlas. En France, le cèdre bénéficie d'une grande facilité de régénération naturelle en association avec le chêne pubescent (Mille, 1986). La strate arbustive et même herbacée améliore la réceptivité des sols et protège les jeunes plantules de l'agressivité du climat. Pour faire face aux conditions difficiles de montagne (vents forts, neige, gel-dégel, fort ensoleillement estival en exposition sud) qui provoquent le déchaussement des semis, Vlashev (1987) remarque que dans les Babors, le cèdre surtout à découvert développe une stratégie de régénération en groupes d'individus serrés, ce qui provoque ensuite l'adhérence des semis et l'obtention à l'âge adulte de troncs multicoles.

Les facteurs défavorables déjà cités par Boudy (1950) semblent être encore d'actualité et la fréquence des périodes de sécheresse de plus en plus aigües diminuent les chances de survie des plantules. En effet, au Belezma, Khenfouci (2005) note que si la régénération du cèdre de l'Atlas est présente dans certains endroits, les conditions climatiques défavorables et l'absence de travaux sylvicoles associées aux influences néfastes de l'homme limitent les possibilités de régénération.

En plus de ces facteurs compromettant la réussite de la régénération, Ezzahiri et Belghazi (2000) évoquent la brièveté de la période de régénération. En effet, ce processus qui devrait être assuré doit correspondre à de bonnes conditions climatiques pour la germination et le développement des semis. Cette coïncidence est aléatoire car une bonne grainée pourrait être suivie de circonstances climatiques défavorables.

Les travaux de Lepoutre (1963) au Maroc, considérés pionniers dans ce volet, montrent que la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas est étroitement liée aux facteurs climatiques, qui conditionnent la date de germination, le développement des semis et leur capacité à développer un système racinaire capable d'assurer l'alimentation hydrique durant la période estivale. Outre la position géographique, les facteurs climatiques habituellement pris en considération sont, évidemment, influencés par l'altitude et l'exposition. S'il est largement reconnu que l'obtention de graines viables et la réussite de la germination sont déterminés par des facteurs essentiellement climatiques, l'installation des semis est, par contre, très liée aux conditions édaphiques. Plusieurs recherches (Lepoutre, 1963 ; Ezzahiri et Belghazi, 2000 ; Khenfouci, 2005) ont mis en évidence l'effet positif du travail du sol et du crochetage sur l'implantation du système racinaire. Par ailleurs, Lepoutre (1963) souligne qu'une litière épaisse et un substrat dur non réceptif sont défavorables à la germination et à la survie des semis ; ils empêchent la pénétration et l'ancrage des racines.

Du point de vue de la texture et de la structure, les sols légers et filtrants facilitent l'installation des semis mais leur dessiccation rapide rend difficile le maintien des semis pour une longue durée. Cependant, les sols lourds (argileux ou marneux) sont défavorables. Quant à la nature chimique des sols, les meilleures régénérations du cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas marocain sont obtenues sur des sols caractérisés par des taux de carbone de 1%, en magnésium de 16meq/100g, en sodium de 0,7meq/100g et une teneur de l'ordre de 22% d'argile (Ezzahiri et Belghazi, 2000).

Ezzahiri et *al.* (1994), dans un bilan de régénération du cèdre dans des placettes clôturées ont mis en exergue, à l'aide d'analyses multidimensionnelles, l'influence du climat, de la nature du substrat, de la profondeur du sol et de la structure de la végétation. Ils ont conclu que les milieux les plus favorables sont les sols basaltiques profonds. Par contre, sur substrats carbonatés superficiels, les jeunes plants n'arrivent pas à dépasser le cap de l'été et se dessèchent rapidement. Quant aux effets climatiques, l'océanité et l'apport important en précipitations qui atténuent la continentalité favorisent le renouvellement des cédraies du Moyen Atlas. Donc, la tranche pluviométrique et la possibilité du sol à emmagasiner l'eau augmentent les capacités de survie des semis dans la mesure où le degré d'humidité du sol leur permet d'échapper à la sécheresse estivale. Du point de vue sylvicultural, les auteurs notent que la densité dans certaines placettes ne permet pas une régénération abondante. La présence, que de vieux individus dépérissants et très dispersés, limite les possibilités de dissémination.

Les champignons mycorhiziens jouent un rôle très important dans la résistance des semis à la sécheresse et dans la stimulation de leur croissance racinaire. La vitesse de croissance initiale de la racine est considérée comme le facteur fondamental de survie des semis. Le cèdre de l'Atlas à l'état adulte développe plusieurs associations symbiotiques mycorhiziennes, une vingtaine de types d'ectomycorhize ont été répertoriées (Hocine et *al.*, 1994). Cependant, à l'état jeune, il est difficile à se mycorhizer même après des inoculations artificielles. Cette difficulté est attribuée à la croissance rapide du système racinaire et à sa richesse en produits phénoliques (Abourouh, 1994). Nezzar-Hocine et *al.* (1998) parlaient d'une cause liée à la mortalité du mycélium ou à l'incapacité du champignon à infecter des racines fines. Les auteurs ont tout de même identifié deux associations ectomycorhiziennes. Néanmoins, une fertilisation phosphatée modérée améliore sensiblement le degré de mycorhization des plants de cèdre en pépinière (Boukcim et Moussin, 2001).

#### **1.4. Production de plants en pépinière et mise en place de plantations**

En plus de la qualité des plants produits en pépinière, la préparation du sol conditionne la réussite d'un reboisement. Cette opération consiste à faciliter l'accès rapide du pivot des jeunes plants aux horizons d'ancrage et d'alimentation en eau par une préparation du sol adaptée. Le sous-solage a fait la preuve de son efficacité en région méditerranéenne sur sol calcaire superficiel ou lorsque la roche mère n'est pas suffisamment fissurée naturellement (Courbet et *al.*, 2012). Il est aussi conseillé lorsque le sol présente un obstacle à l'installation rapide et correcte du système racinaire (charge en bloc ou horizon compact). Par exemple, sur

les sols à piérosité élevée, un sous-solage à une profondeur de 60 à 80 cm améliore très nettement le taux de reprise et le démarrage de la plantation en accélérant le développement en profondeur des racines. Un labour profond, en plein ou en bande, permet d'associer travail du sol et réduction de la concurrence herbacée.

Pour certaines espèces, la plantation à racines nues s'accompagne d'une crise de transplantation et d'une mortalité quelquefois importante. Ces phénomènes sont liés aux traumatismes subits par les racines au moment et à la suite de l'extraction des plants en pépinière. Ces phénomènes sont en relation directe avec les possibilités de régénération et de croissance des nouvelles racines (Aussenac et El Nour, 1986). Les différences entre les potentiels hydriques des plants installés avec leurs extrémités racinaires intactes et ceux des plants privés de leurs racines blanches révèlent bien, dès la plantation, le rôle de ces extrémités racinaires en croissance. Dans la même optique, Aussenac et El Nour (1985) avaient déjà souligné le rôle positif du stress hydrique préalable à la transplantation sur la capacité de régénération des nouvelles racines.

Au plan fondamental, un stress hydrique non léthal semble avoir pour conséquence "d'organiser" le végétal pour une reprise d'activité dès que les conditions hydriques sont devenues favorables. En effet, l'installation d'un stress hydrique se traduit par un ralentissement de la transpiration par l'intervention d'une régulation stomatique qui persiste plusieurs jours après que les conditions d'alimentation en eau soient devenues normales (6 à 7 jours chez le cèdre). Ce phénomène constitue un atout important au moment de la transplantation pour des plants conditionnés par un déficit hydrique par rapport à des plants bien arrosés qui vont accuser un dessèchement important lié à une augmentation des résistances de transfert au niveau racinaire en raison de l'absence d'extrémités blanches. Cette méthode apparaît comme un moyen prometteur plus particulièrement pour les reboisements d'automne.

Dans les expérimentations réalisées par Finkelstein (1981), il apparaît clairement que le stress hydrique a joué un rôle l'année même de son application en réduisant les pousses annuelles. Aussenac et Finkelstein (1983) notent la faculté du cèdre de l'Atlas à pousser tard dans l'année (octobre) lorsque les conditions environnementales, hydriques en particulier, sont favorables.

Le cèdre se caractérise par une croissance juvénile importante. La stratégie de croissance en hauteur des jeunes cèdres est considérée "libre", ce mode de croissance traduit une forte interaction du cèdre avec le milieu. Par opposition à un mode de croissance "fixe" où la stabilité de la croissance signifie un affranchissement relatif aux conditions du milieu (Fady et Vauthier, 1988). Néanmoins, il est admis que chez les essences à pousses monocycliques courtes, un décalage d'un an s'observe entre l'application de la sécheresse et les effets de celle-ci sur la croissance en hauteur. En revanche, les espèces à pousses monocycliques longues ou polycycliques montrent une réduction de leur croissance l'année même du stress hydrique. Le cèdre appartient donc à cette deuxième catégorie d'arbres. Une sécheresse prononcée induit, l'année suivante, une vitesse de croissance plus élevée et un débournement précoce.

Riedacker (1978), en étudiant le débourrement, la croissance souterraine et aérienne des plants de cèdre, a tiré quelques conclusions pratiques. En effet, il est déconseillé de reboiser de mai à septembre car les conditions de sol en région méditerranéenne sont généralement peu favorables. Il conviendrait aussi de tenir compte du fort potentiel de régénération des racines en décembre-janvier dans le choix de la période de plantation où il faut éviter de repiquer des cèdres en début d'automne (septembre-octobre) et faire mieux de les transplanter à partir de décembre. La conservation, tout au moins des racines, dans un milieu chaud et humide durant une huitaine de jours après l'arrachage et avant plantation pouvait se révéler être une pratique intéressante.

Quant à l'utilisation des plants en conteneur, Guehl et *al.* (1989) considèrent que le support de culture est un facteur de modulation important de l'environnement physico-chimique racinaire, pouvant créer des conditions plus ou moins favorables au développement et à la nutrition des plants. Pour le substrat, les auteurs préconisent l'élevage des plants dans un mélange de tourbe et d'écorce de pin compostée. Leur capacité de reprise est appréciable. L'utilisation des plants mycorhizés est, à priori, intéressante mais leur avantage en reboisement reste aléatoire car dépend de la bonne adaptation et installation du champignon dans le sol. Le cèdre développe un pivot racinaire important, afin d'éviter la crise de transplantation, l'emploi de plants en godets anti-chignon de 400cm<sup>3</sup> minimum est fortement recommandé. Il faut privilégier des plants vigoureux (11cm de hauteur et 3 mm de diamètre au collet minimum) de quelques mois à un an pour éviter les déformations racinaires (Courbet et *al.*, 2012). En concordance avec ces résultats, Argillier et *al.* (1994) ont signalé la nécessité d'utiliser des conteneurs sans fond d'un volume au moins égale à 400m<sup>3</sup>. Ils ont montré que les plants de qualité sont produits sur un mélange de tourbe à longue fibre (50%) – écorce de pin compostée (50%). Ce substrat étant inerte, l'apport d'éléments minéraux s'avère indispensable pour permettre le bon développement du plant. Ces apports peuvent être envisagés sous forme d'arrosages hebdomadaires avec une solution nutritive complète en complément d'un engrais retard incorporé au substrat lors de sa préparation.

Pour la plantation, les pratiques conseillées par les services forestiers au Maroc sont : la mise en terre en potées, de 50cm<sup>3</sup>, sur des gradins ou des bourrelets de banquettes, après défrichage et nettoyage des essences naturelles et de la strate herbacée, suivant le type de sol, la pente et le versant. Sur les terrains de faible pente, on procède à un sous-solage. Généralement, les plantations commencent en automne dès que les précipitations dépassent 50mm, quantité nécessaire à la reconstitution de la réserve en eau du sol. La densité de plantation est de l'ordre de 1000 à 1200 plants par hectare. Les soins culturaux après plantation consistent en une mise en défens stricte, en une protection des plants contre la dessiccation par le binage et le désherbage (HCEFLD).

### **1.5. Productivité et sylviculture du cèdre de l'Atlas**

Les résultats issus de la comparaison des cédraies marocaines et françaises avec celle de l'Atlas blidéen (Algérie) montrent que le cèdre de l'Atlas a une productivité proche des grandes espèces forestières médio-européennes. L'accroissement moyen annuel dépasse 8

m<sup>3</sup>/ha/an dans les stations naturelles et 12 m<sup>3</sup>/ha/an dans les stations artificielles très fertiles. Les classes de croissance extrêmes sont comparables pour l'ensemble des cédraies, néanmoins, en dehors de son aire, la productivité du cèdre semble plus élevée (Mhirit, 1999).

L'association végétale dans les conditions écologiques d'équilibre est un indicateur de la fertilité de la station et peut servir de critère d'évaluation de la croissance et de la productivité des peuplements. Ainsi, dans la cédraie de Chréa, Nedjahi (1987) note que c'est dans l'association à *Viola munbyana* et *Robus ulmifolius* où est enregistré le meilleur indice de productivité avec un accroissement moyen annuel de 5,57m<sup>3</sup>/an/ha. Le stade de dégradation de la cédraie est représenté par l'association à *Genista tricuspidata* et *Festuca atlantica* avec un accroissement moyen annuel de 3,15 m<sup>3</sup>/an/ha.

Dans cette cédraie, il est établi quatre classes de fertilité déterminées par la hauteur dominante à 100 ans. Elles sont, par ordre décroissant : 26, 21, 16, et 12 m. Les observations relatives à l'influence des conditions stationnelles sur la productivité du cèdre à Chréa montrent que les hauteurs dominantes sont plus élevées en exposition nord et faibles en exposition sud-est. A partir de 1100m d'altitude, ce paramètre augmente sensiblement. Du point de vue édaphique, les sols de la cédraie de Chréa sont relativement homogènes, ils sont de type brun forestier reposant sur un substrat schisteux, mais, la différence réside dans la profondeur du sol. Ce critère apparaît déterminant puisque entre un sol superficiel (0-10cm) et un autre profond dépassant 40cm, la hauteur dominante varie respectivement de 16,52 à 34,10m. L'auteur souligne que la comparaison des classes de productivité obtenues à Chréa et celles du sud de la France (Toth, 1973) et du Rif marocain (Mhirit, 1982) sont relativement similaires avec des petites différences notamment pour les classes I et IV.

Dans le Belezma, Bentouati et Oujehih (1999) ont signalé la faible productivité du cèdre de l'Atlas dans cette région. En effet, la cédraie du Belezma se caractérise par la présence d'une forte proportion de peuplements âgés peu productifs où 70% des placettes échantillonnées appartiennent aux classes de fertilité II et III, avec des hauteurs dominantes dépassant rarement les 17m. A 100 ans, l'accroissement moyen en volume varie de 0,66m<sup>3</sup>/an/ha dans les peuplements des classes de croissance faibles à 4,08m<sup>3</sup>/an/ha dans les bonnes stations. Dans l'établissement des quatre classes de fertilité, le type de substrat s'avère déterminant dans la mesure où la première classe (site index supérieur à 19m) est décrite sur des grès alors que celle de site index plus faible sur des marnes ou sur des calcaires. Les peuplements de fertilité intermédiaire évoluent sur des calcaires dolomitiques. L'altitude, avec un effet moins prépondérant, affecte positivement la productivité du cèdre dans le Belezma puisque les peuplements appartenant à la classe la plus productive sont situés en haute altitude (1700-1800m).

L'étude multidimensionnelle de la productivité du cèdre réalisée dans le Rif marocain contribue à l'établissement de liaisons "station – production". Le principe est de construire les classes de croissance faisant intervenir plusieurs facteurs à la fois écologiques et dendrométriques (Mhirit, 1994).

Dans une tranche altitudinale assez large (1700-2100m), les critères de productivité sont indépendants de l'altitude. Cependant, la variabilité de croissance en hauteur dépendrait, dans une large mesure, de l'humidité de la station et de la consistance du peuplement. Une forte croissance se rencontre dans les stations les plus fraîches, mésophiles ou méso-hygrophiles du *Luzulo forsteri-cedretum atlanticae* et de *l'Argyrocytiso battandieri-Cedretum atlanticae*, alors qu'une production élevée est conditionnée par une consistance du peuplement. En effet, dans les bioclimats méditerranéens, la consistance donc, la densité et le degré du recouvrement du sol par les arbres, jouent un rôle fondamental dans le maintien de la fertilité en assurant un cycle biogéochimique continu et favorable (Mhirit, 1994).

Dans le sud de la France où une cédraie artificielle était créée en 1862 à partir des semences provenant de la région des Aurès en Algérie, un dispositif permettant d'étudier les potentialités de production du cèdre de l'Atlas a été mis en place. Il en ressort quatre classes de fertilité. Les courbes des placettes localisées sur sols cristallins semblent plafonner à 110 ans où elles atteignent déjà 31-34 mètres, alors que sur sols calcaires fissurés la courbe atteint son maximum vers 105 ans, avec une hauteur culminante de 21 mètres seulement (Toth, 1973). L'étude de la production ligneuse par le biais d'un tarif de cubage a montré qu'à 100 ans les plantations du sud de la France permettront de récolter entre 5 et 10 m<sup>3</sup>/an/ha (les peuplements sur substrat cristallin étant plus productifs que ceux évoluant sur roche mère calcaire). C'est largement deux fois plus qu'un peuplement de pin d'Alep comparable et autant qu'un peuplement de pin noir, la qualité du bois récolté donnant alors sans contredit l'avantage au cèdre (Toth, 1973).

La réaction du cèdre aux actions de dépressage a été étudiée par Bernard et Philippe (1994). Les tiges dépressées réagissent immédiatement au dépressage en présentant des gains de croissance en circonférence importants dès la première année, ce gain augmente au fil des quatre années après l'opération. Les auteurs ont mis en évidence qu'un dépressage même violent ne provoque pas de dégât important au peuplement restant à condition de le réaliser en fin d'été début d'automne pour éviter les attaques de scolytes et choisir des tiges bien équilibrées et bien enracinées.

Le cèdre peut être éclairci fortement puisque le couvert se referme plus rapidement. Les travaux de Cutini et Mercurio (1994) montrent que l'effet d'une éclaircie sur la croissance des tiges de cèdre est très variable selon leur statut social. L'effet semble être plus marqué pour les arbres co-dominants par rapport à ceux dominants où l'augmentation de l'accroissement en volume est très faible. Cependant, pour Guillemot (2011), l'accroissement moyen sur les sept années suivant l'éclaircie est d'autant plus fort que l'intensité d'éclaircie est forte et ce, quelque soit le statut social des arbres. Une réactivité plus importante de la classe dominante est aussi remarquée.

## 1.6. Qualité du bois et utilisations

Le cèdre a accompagné les civilisations anciennes les plus prestigieuses pour son bois, sa résine, mais aussi pour les croyances des peuples antiques. Les Mésopotamiens utilisaient le cèdre dans la construction des temples. Les édifices religieux, vestiges exceptionnels d'un

passé parfois lointain, témoignent ainsi de son caractère sacré. Noble par excellence, facile à travailler, résistant aux adversités, au parfum doux, chaud et gardant son empreinte durant des millénaires, autant de qualités qui expliquent l'emploi du cèdre de l'antiquité à nos jours dans les édifices les plus majestueux (HCEFLD, 2006). C'est un bois d'œuvre de première qualité, très propre à la construction et capable de rivaliser avec d'autres bois nobles comme le sapin avec lequel il est très comparable pour plusieurs propriétés physiques.

Les relations entre la qualité du bois et les conditions du milieu y compris les traitements sylvicoles permettent d'orienter les aménagements forestiers vers une optimisation de la production et de guider les interventions du sylviculteur en fonction des qualités de bois les plus demandées.

L'effet des conditions stationnelles sur la qualité du bois de cèdre est relativement peu étudié. El Abid (1994) a noté qu'au Maroc, le substrat que ce soit calcaire, basaltique ou dolomitique n'influence pas l'infradensité, par contre, cette propriété augmente avec l'altitude. Au Djurdjura (Tikjda), Messaoudène et *al.* (2004) ont mis en évidence l'effet "station" et l'effet "arbre" sur certaines propriétés physiques. Les stations de Tigounatine et Kef fournissent un bois aux qualités physiques meilleures que celui provenant de Taouialt. Cette dernière, bien qu'elle se caractérise par un sol évolué et plus profond, son fort couvert, son peuplement à forte densité, sa pente élevée et sa croissance radiale moyenne plus importante lui seraient défavorable ; elle fournit un retrait tangentiel, une anisotropie et un retrait volumétrique élevés. En revanche, son infradensité et son retrait axial y sont les plus faibles.

L'étude des relations entre la sylviculture et la qualité du bois tend à optimiser qualitativement et quantitativement la production des peuplements. L'augmentation de l'intensité d'éclaircie n'entraîne aucune variation de la densité basale mais le retrait volumétrique augmente pour un taux d'éclaircie moyen. Le même résultat est observé pour l'élasticité longitudinale mais elle observe une diminution pour une éclaircie forte (El Abid, 1994). Une éclaircie sévère provoque une élévation du retrait et de l'anisotropie (El Azzouzi et Keller, 1998). Si, globalement, la qualité du bois de cèdre issu des peuplements faiblement denses est appréciable, l'absence d'élagage naturel - déjà difficile pour le cèdre en raison de l'absence de pourriture - entraîne une fréquence élevée des nœuds qui dévalorise la résistance mécanique du bois. A ce sujet, dans un dispositif visant la modélisation et la prédiction de la qualité du bois de cèdre, Courbet (1994) a souligné la propension du cèdre à faire de gros nœuds en situation de faible compétition et la nécessité de prendre en compte l'élagage artificiel.

L'homogénéité des épaisseurs des cernes est particulièrement intéressante pour le sciage et le placage. De ce fait, l'élargissement des cernes et le développement des branches résultant des éclaircies fortes peuvent avoir des effets négatifs sur la qualité du bois. Le forestier peut réguler les accroissements annuels avec des éclaircies d'intensité et de périodicité régulières (Hapla et *al.*, 2000).

En Algérie et à partir des résultats acquis par Messaoudène et *al.* (2004), le cèdre est qualifié de bois à retrait moyen, peu nerveux et lourd. Ce bois se caractérise par des propriétés physiques globalement élevées, notamment les retraits tangentiel et axial qui sont corrélés à la présence de zones de bois de compression important. Le retrait tangentiel, le plus souvent pris en considération de par son importance, montre des valeurs faibles et voisines de celles de nombreux résineux. Il faut noter les faibles valeurs du rapport du retrait tangentiel sur le retrait radial, représentant l'anisotropie. Cette dernière demeure un indicateur d'une stabilité dimensionnelle des pièces de bois, témoigne de l'excellente qualité du bois de cèdre même au stade juvénile et montre son pouvoir de concurrencer d'autres espèces résineuses. Cette qualité est recherchée chez les bois destinés à la menuiserie fine.

En dehors de son aire naturelle, les essais mécaniques effectués sur des éprouvettes normalisées provenant de trois régions géographiques de la France méridionale ont montré que demeurant relativement cassant, anisotrope, peu tenace et de flexion faible à moyenne, le bois de cèdre de l'Atlas est tendre, élastique et relativement lourd (Ellatifi, 1994).

Pour la cédraie artificielle du sud de l'Italie, Brunetti et *al.* (2001) affirment que l'aubier des arbres du cèdre montre une faible durabilité, alors que pour le bois de cœur, les essais de durabilité effectués contre un champignon lignivore (*Poria placenta*) donnent des pertes de masse considérables. Cette sensibilité serait probablement due au fait que les arbres analysés sont jeunes. Cependant, les caractéristiques physiques et mécaniques ont montré que le bois de cèdre est très stable par rapport à celui des essences résineuses utilisées comme bois d'œuvre. Ces caractéristiques sont appropriées pour l'emballage et les structures, sa durabilité et sa stabilité peuvent autoriser une utilisation externe (bois résistant aux intempéries).

Hapla et *al.* (2000) considèrent que les possibilités d'utilisation industrielle du bois de cèdre est particulièrement importantes en régions méditerranéennes en raison, d'une part, de la faible production de bois de qualité et, d'autre part, le haut niveau de consommation. L'homogénéité de la texture du grain est favorable à un collage efficace. De par la faiblesse du module d'élasticité ainsi que de la force d'impact, le bois est peu adapté aux emplois mécaniques, comme les articles de sport et les manches d'outils ...etc. La forte odeur exclue toutes utilisations dans le stockage des vins et la forte teneur en résine et huiles essentielles interdisent, notamment, des utilisations en caisserie pour des usages alimentaires. La qualité du bois de cèdre est supérieure à celle de tous les pins. Mélangé en faible quantité avec les pins, le bois de cèdre peut être utilisé également en papeterie. Les petits bois sont susceptibles d'être valorisés par la confection de produits d'artisanat et autres articles de décoration ou d'utilisation domestique (marqueterie).

### **1.7. Facteurs de dégradation des cédraies**

Dans cette partie, nous allons traiter divers facteurs de dégradation des forêts de cèdre, à savoir, les attaques d'insectes, les prédateurs fongiques, les incendies et enfin le dépérissement qui représente une résultante des phénomènes déjà cités.

Parmi les ennemis entomologiques, la tordeuse du cèdre (*Acleris undulana*) qui est un ravageur introduit accidentellement en Afrique du nord à partir de l'Asie mineur où il a été signalé sur *Cedrus libani*. Il attaque l'ensemble du houppier qui provoque un dessèchement du feuillage. La lutte chimique par les pesticides n'est pas envisagée puisque les gradations sont limitées. La lutte biologique ouvre une perspective sur seulement deux espèces de parasitoïde des chrysalides (*Brachymeria intermedia* et *Itopectis maculator*). Par contre, dans son aire d'origine (Turquie), ce ravageur présente un complexe parasitaire plus important (Mouna, 1994).

Quant aux xylophages, *Cryphalus piceae* est un ravageur primaire extrêmement redoutable du fait de son fort potentiel de reproduction et de sa capacité d'attaquer des sujets jeunes ou âgés en pleine sève. En infligeant aux arbres un déséquilibre physiologique, *C. piceae* les prédisposent aux attaques massives d'autres xylophages.

*Phloeosinus cedri* ne s'attaque qu'au cèdre. Il est fréquent sur le cèdre de l'Atlas au Maroc et en Algérie. C'est un ravageur primaire qui a besoin d'un milieu nutritif riche en glucides et préfère les branches en sève ne présentant qu'une légère déficience physiologique.

*Scolytus numidicus* n'est pas un ravageur primaire mais peut le devenir en cas d'invasion épidémique. C'est un scolyte commun au Maroc et en Algérie et vit exclusivement aux dépens de *Cedrus atlantica*. Enfin, la famille des *Buprestidea* renferme plusieurs espèces de ravageurs secondaires, ne s'attaquant qu'aux arbres affaiblis et dépérissants (Benhalima, 2006). La liste des espèces de prédateur et de parasitoïde des xylophages montre un cortège relativement riche. Un inventaire non exhaustif est présenté par Fabre et al. (1999).

Les défoliateurs des cèdres sont essentiellement des *Thaumetopoeideas*, qui ne constituent pas une nuisibilité aigue pour les cédraies. Au Belezma, Gachi (1994) a noté l'apparition sous forme d'infestation gravissime de *Thaumetopoa bonjeani* au cours des années 1982-1983. Pour l'autre phytophage, *T. pitypcampa*, Sbabdji et Kadik (2011) ont affirmé que dans la cédraie de Chréa, les défoliations causées par ce ravageur provoquent rarement la mortalité des arbres touchés. Les auteurs ont mis en évidence une faible possibilité qu'une sévère défoliation dure plus d'une année, ceci est motivé par le fait que les arbres déjà défoliés ne sont pas prisés par les insectes. Toutefois, un impact non négligeable sur la productivité des cédraies marocaines est noté par Graft et Mzibri (1994).

Pour protéger ce résineux des insectes ravageurs, différentes stratégies de lutte ont été adoptées, principalement chimiques et avec des produits biodégradables, notamment la bactospeine (à base de *Bacillus thuringiensis*) et le dimilin (à base de deflubenzuron). Ces deux produits peuvent être utilisés avec succès contre certains ravageurs phytophages en générale et plus particulièrement contre les *Thaumetopoeideas* (Mouna, 1994). Pour le *T. bonjeani*, Gachi (1994) remarque qu'il y a possibilité que les pontes soient parasitées par *Tetrastichus servadei* et *Ooencyrtus pityocampea*.

Pour la sensibilité aux attaques de puceron, parmi les quatre espèces de cèdre, *C. atlantica* est la plus infestée par les deux affidés : *Cedrobium laportei* et *Cinara cedri* (Fabre, 1988).

En ce qui concerne les ravageurs fongiques, *Phellinus chrysoloma* (*Basidiomycètes*) est le champignon lignivore le plus redoutable sur *Cedrus atlantica*. Il produit une pourriture blanche annulaire sur les cèdres âgés où il se développe à la faveur de blessures mettant à nu le bois de cœur.

L'absence de système et de dispositif de surveillance, de suivi phytosanitaire et d'inventaire périodique constitue un sérieux handicap et ne permet pas d'adapter la sylviculture en fonction de l'apparition de phénomènes imprévisibles. La prise en compte de l'aspect santé-vitalité doit être envisagée comme objectif prioritaire. Cet aspect doit reposer sur des recherches orientées vers le développement d'approches préventives susceptible de créer des ambiances forestières incompatibles au développement anarchique d'agents pathogènes.

Du fait de la faible vulnérabilité des cédraies vis-à-vis des incendies, la littérature ne s'intéresse pas beaucoup à ce volet. A ce propos, Toth (1970) considère qu'à l'opposé des pins, la cédraie semble peu inflammable. Les peuplements adultes diminuent le risque d'incendie en éliminant le sous-bois et le tapis herbacé.

Le dépérissement de la cédraie est l'expression de phénomènes complexes, aux causalités multiples et interdépendantes qui s'auto-entretiennent et amplifient la destruction de l'écosystème cédraie ; il ne s'accommode pas des solutions linéaires découplées des données écologiques, forcément inefficaces et sans portée réelle sur la restauration structurelle des équilibres. Cette complexité appelle une approche qui passe par la lecture rigoureuse des constats et leur analyse causale avec l'indispensable interdisciplinarité que requiert ce phénomène.

En Algérie, le dépérissement du cèdre n'est pas récent. Des écrits rapportés par Lefebvre (1900) et Boudy (1950) indiquent que les sécheresses exceptionnelles de 1875 à 1888 auraient, déjà, occasionné d'importants dégâts sur les peuplements de cèdre. Dans les Aurès, ce phénomène est apparu vers 1982. Actuellement, le dépérissement touche l'ensemble des cédraies de cette région, mais à des degrés différents. Les plus affectées sont celles du Belezma, soumises aux influences sahariennes, ainsi que les plus méridionales (Taghda et Djebel Lezreg) situées en limite sud du massif des Aurès. L'influence de ces facteurs topogéographiques est accentuée par la sécheresse qui dure, depuis maintenant plus de vingt ans. Comme effets aggravants, s'ajoutent les attaques de parasites (défoliateurs et scolytes) et la présence de l'armillaire au niveau des racines (Bentouati et Bariteau, 2006).

Les récents travaux de dendroclimatologie affirment que le cas de décélération de la croissance des cerne annuels, observée de 1875 à 1883 et de 1997 à 2004 correspond à des épisodes de sécheresse très intenses. La part de croissance expliquée par le climat est très importante (64,77%) témoignant d'un fort impact climatique. Les fonctions de réponse (relation cerne-climat) établies ont montré que ce sont les précipitations automnales et hivernales qui jouent un rôle prépondérant dans la survie du cèdre (Tafer et *al.*, non publié). Kherchouche et *al.* (2013) pour leur part soulignent que la sécheresse des années quatre-

vingts et l'élévation des températures maximales et minimales pourraient être les facteurs déclenchant le dépérissement au Belezma.

Rhanem (2011) affirme qu'au Maroc, depuis le début des années quatre-vingts, le cèdre connaît un dépérissement préoccupant, diffus ou concentré, responsable d'un recul de ses peuplements. Plusieurs zones du Moyen et Haut Atlas sont touchées, mais dans la plus part des cas, les mortalités se concentrent à la limite inférieure de l'aire de répartition de l'espèce. L'examen des précipitations et des températures mesurées de 1957 à 2005 sur le versant moulouyen du Moyen-Atlas permet de formuler l'hypothèse que les dépérissements sont imputables à un déficit des précipitations avec une diminution de 25% de la période 1957-1976 à 1976-2005. Les précipitations printanières ont subi une diminution brutale de l'ordre de 49%, tout particulièrement en avril, au moment où les besoins en eau du cèdre deviennent importants. A cela s'ajoute une augmentation des températures en liaison avec plusieurs épisodes de sécheresse au cours de la période 1982-2005.

Les propriétés édapho-topographiques peuvent moduler ces facteurs, il est noté aussi que la forte inclinaison des versants, qui facilite l'évacuation de l'eau par ruissellement, comme l'aridité édaphique due à la très faible profondeur des sols sur substrat calcaire doivent également être prises en compte.

Quant à l'influence des caractéristiques physico-chimiques et biologiques des sols sur le dépérissement dans la cédraie de Theniet El Had (Algérie occidentale), Abdelhamid et *al.* (2014) rapportent qu'une forte corrélation est observée entre le taux de dépérissement et le degré d'acidité des sols. La faible présence des organismes telluriques due essentiellement à l'acidité élevée perturbe les conditions d'alimentation racinaire des arbres, ce qui peut aggraver le phénomène de dépérissement.

Le rôle de la densité dans l'explication du dépérissement du cèdre au Moyen-Atlas s'est révélé plus évident à l'échelle de l'arbre qu'à celle du peuplement. Cela justifie la nécessité de recourir à une gestion sylvicole fine qui éduque les arbres et donne à chacun son espace vital optimal. L'indice de compétition de Veen s'est montré positivement corrélé au pourcentage de dépérissement en surface terrière. L'application d'une sylviculture préventive, notamment, si des éclaircies mieux réfléchies avaient été appliquées à cette cédraie, des anomalies phytosanitaires pourraient être évitées et une partie du bois perdu par mortalité aurait pu être récupérée (Derak et *al.*, 2008). La pratique des opérations sylvicoles dans les cédraies, visant la réduction des compétitions, est une nécessité qui réduira les contraintes de disponibilité de l'eau. Sur ce sujet, Tafer et *al.* (non publié) pensent qu'au Belezma, l'augmentation du rythme de croissance radiale des arbres vivants à partir de 1996 pourrait être liée à la réduction des compétitions issue de l'élimination des arbres dépéris, ce qui a engendré plus d'espace vital. Ces opérations sont, certes, salvatrices mais le statut d'espèce protégée du cèdre rend illégale toute action sylvicole d'où la nécessité de réviser la loi sur les aires protégées (Messaoudène et *al.*, 2013).

# Chapitre II

---

## Description du milieu d'étude

### 2.1. Localisation géographique de la chaîne du Djurdjura

Relief majeur de tout le Tell algéro-tunisien, le massif du Djurdjura, l'ancien "Mons Ferratus" des Romains, représente une incontestable entité géologique. La grande chaîne du Djurdjura forme le noyau autour duquel se rattache tout le système montagneux de la contrée. Le Djurdjura au sens large et ses prolongements parcourent, sur une étendue de 150 km environ, la partie méridionale et orientale de la « Grande Kabylie », puis, il s'infléchit dans sa partie moyenne vers le nord-est (fig.2.1). La chaîne se divise en trois parties (Fig.2.2) :

- Le massif oriental de Lala Khedidja (1308 m) ;
- Le massif central de l'Akouker entre Tizi n Kouilal et l'Alma (Ras Timedouine : 2305m) ;
- Le massif occidental de Haïzer.

La chaîne du Djurdjura s'étend d'ouest en est avec une largeur qui n'excède pas 10 km. Elle est formée par le massif du Djurdjura à l'ouest et par le petit massif de Chellata à l'est et domine de ses 2000 m et plus, en versant nord, le massif ancien kabyle (montagne de Larbâa Nath Irathen et de Ain el Hammam jusqu'à Sidi Ali Bounab). La chaîne est formée de hautes crêtes parallèles entre elles s'allongeant d'ouest en est, en un arc de cercle ouvert vers le nord.

## 2.2. Eléments géologiques et pédologiques

Le massif du Djurdjura forme l'élément principal d'une grande unité structurale, appelée la chaîne calcaire ou "Dorsale kabyle" (Durand, 1951), qui débute près d'Annaba et se termine au cap Ténès. La Dorsale kabyle appartient à la chaîne alpine des maghrébides, soit à l'ère mésozoïque-Paléogène qui couvre les massifs de Kabylie. L'élément le plus marquant de la série sédimentaire de la Dorsale kabyle est une puissante formation calcaire, désignée sous le nom de « Calcaires massifs ». Ces derniers sont très épais au Djurdjura et appartiennent au Lias inférieur et à l'Eocène, respectivement 400-500 m et 50-100 m (Abdesslam et *al.*, 2000).

Très complexe sur le plan géologique, le massif métamorphique du Djurdjura est constitué de terrains sédimentaires fortement plissés et fracturés, dont une partie s'est formée au Paléozoïque, mais la majorité appartient aux Mésozoïque et Cénozoïque. La structure géologique correspond à un empilement d'écaillés fortement redressées à vergence sud et aux contenus sédimentaires très différents. (Flandrin, 1952).

De par leur extrême diversité, il est assez difficile de présenter de façon claire les divers domaines pédologiques du Djurdjura.

Sur la chaîne du Djurdjura occidentale (Djebel Haizer) et centrale (l'Akouker), la majorité des terrains de montagne (sur le socle ancien et sur les roches éruptives) sont des sols acides, insaturés, gris ou bruns, peu épais, de type rendzine, bien différenciés par rapport à la roche mère sous-jacente (Peillon, 1978). Ils sont localement humifères. La roche mère calcaire affleure sur une grande partie des sommets escarpés du Djurdjura, spécialement dans sa portion occidentale.

Dans l'extrême ouest de la chaîne (Tikjda, Tala Guilef et leurs environs) trois types de sol sont décrits (Mestar, 1995). Les sols bruns forestiers humifères constituent le premier type, en versant nord, les sols meubles dérivent des formations marneuses sur grès et argiles. Le deuxième type de sol est représenté par les sols caillouteux, sablo-argileux de la pelouse écorchée. Les sols rocailloux issus des poudingues et calcaires constituent le troisième type de sol présent dans cette zone. Bien que la plus grande partie de la zone du cèdre soit constituée par les calcaires du Lias, c'est sur Grès et Poudingues que les cédraies les mieux conservées sont signalées, en l'occurrence la cédraie des Ait Ouabane et celle de Draâ Inguel à Tala Guilef (Krouchi, 2010).

De façon générale, les travaux de Benmouffok (1994) convergent vers la distinction de deux types de sol principaux, selon le substratum :

- 1- Des sols peu évolués, généralement calcimagnésiques sur roche mère calcaire (rendzines autochtones) de faible à moyenne profondeur, de type AC, présentant un taux considérable de matière organique sur tout le profil. Ces sols sont rencontrés sur le versant nord, c'est la catégorie des sols la plus fréquente.
- 2- Des sols bruns forestiers, acide, de type A(B) C sur un substratum géologique gréseux. Ils caractérisent surtout le versant sud particulièrement la zone de Tikjda.

Néanmoins, des études pédologiques très localisées ont permis de bien décrire les zones en question. Bellahcene et Bensaâd (1989) ont décrit un sol brun acide avec un humus abondant et sec sous la futaie de cèdre à Tala Guilef. Au nord-est, dans la forêt des Ait Ouabane, Mouas (1989) a décrit un sol brun fersiallitique sous cédraie dense ; un sol brun calcique sous cédraie composite et un sol peu évolué d'apport sous cédraie dégradée. Il y a lieu de noter qu'en général, sous cédraies humides, le sol est épais et humifère. Krouchi (2010) remarque qu'en certains points de la cédraie de Tala Guilef, le facteur pente aidant, une partie du sol humifère est déplacée voire emportée dans le sens de la pente par suite du piétinement par le bétail, de l'ouverture de pistes forestières ou de leur élargissement.

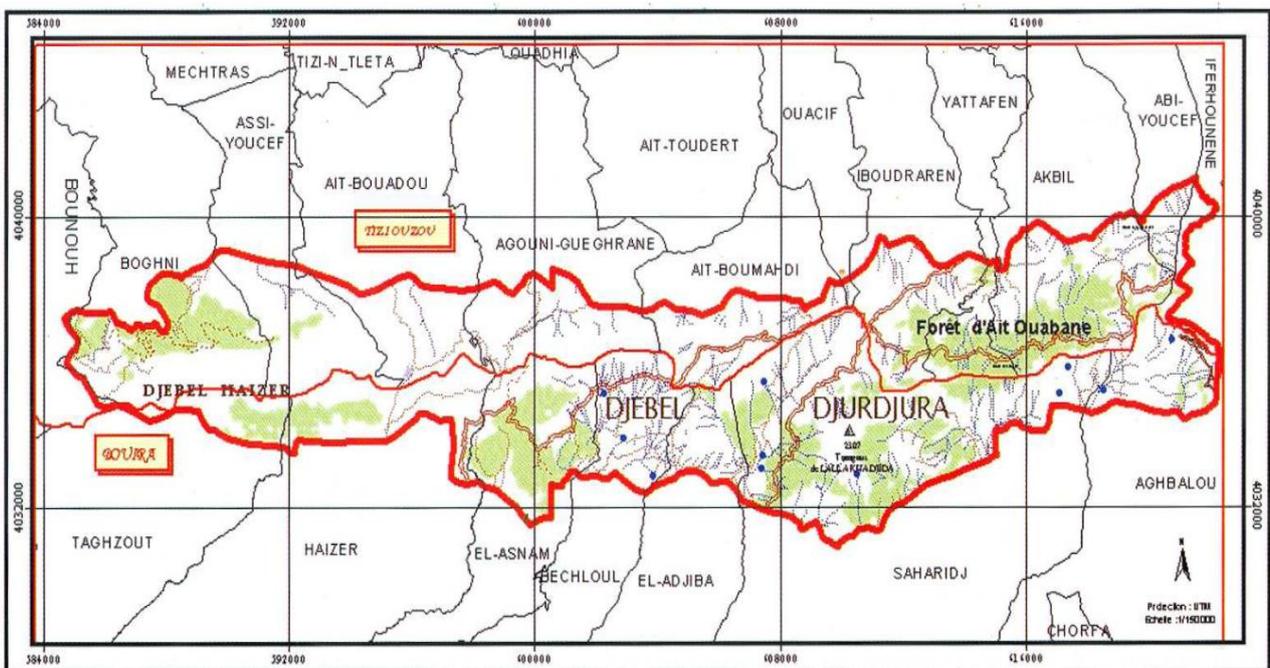
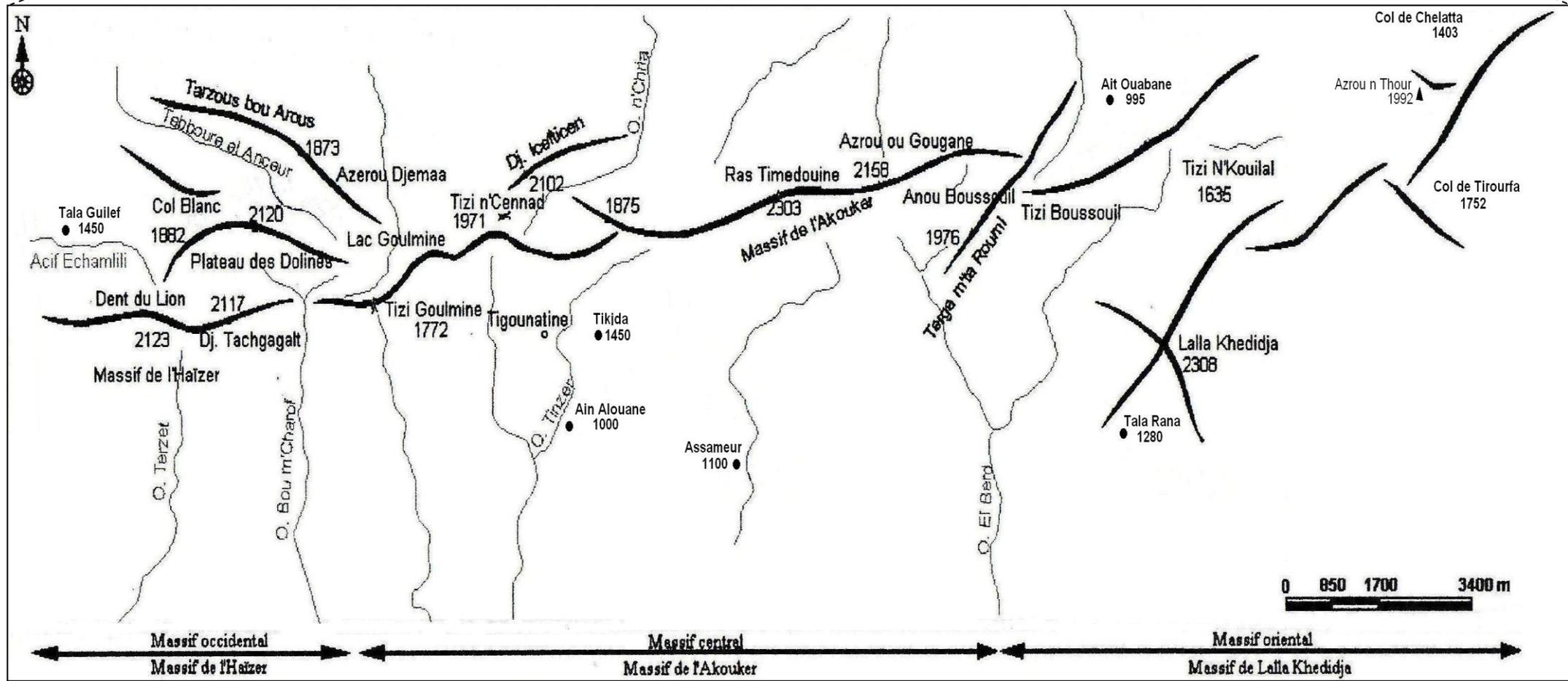
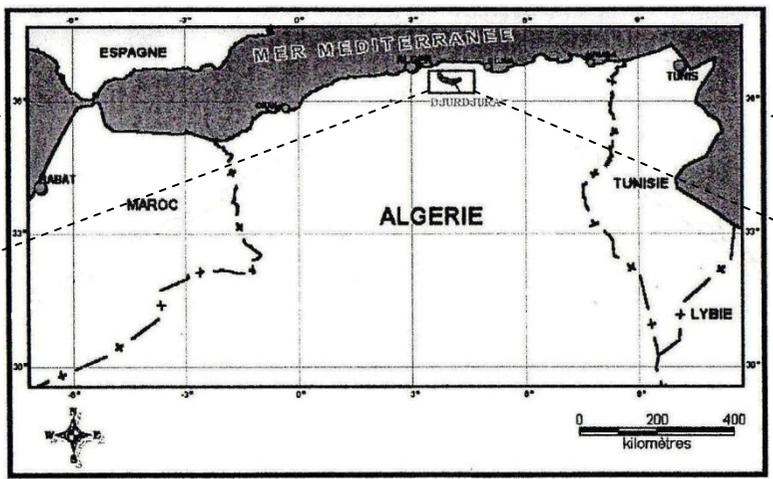


Fig.2.1 : Situation géographique du Parc National du Djurdjura et surface occupée par les forêts (DGF, 2006).

Fig.2.2 : Schématisation de la chaîne du Djurdjura et localisation des différents points caractéristiques (Addar, 2003. *modifiée*).



### 2.3. Climat et bioclimat

De par sa particularité et son irrégularité, le climat méditerranéen a fait l'objet de nombreux travaux. Les premières études reviennent à Emberger (1955), puis reprises et approfondies par Stewart (1969). Pour l'Algérie du nord, les études du climat sont peu fréquentes, elles se résument à celles de Seltzer (1946), Bagnouls et Gaussen (1953), Chaumont et Paquin (1971) et Halimi (1980).

Le manque ou parfois l'inexistence de station météorologique en montagne pose la difficulté du choix des données climatiques pouvant mieux représenter la zone d'étude. Ainsi en haute montagne, notamment dans le Djurdjura, le manque de données climatiques mène, en premier lieu, à faire des extrapolations parfois même discutables, leurs interprétations sont à prendre avec beaucoup de précautions. La deuxième étape consiste à caractériser un ensemble de climats locaux ou stationnels qui permettra de définir un climat régional (Messaoudène, 1989).

Les données disponibles relatives au Djurdjura sont sporadiques et non continues. En se basant sur quelques travaux antérieurs (Abdesslam, 1995 ; Addar, 2003 ; Meddour, 2010), nous avons pu réunir des mesures de précipitations et de températures sur une tranche allant de 1973 à 2000. Pour les extrapolations, deux gradients altitudinaux, pluviométrique et thermique, ont été calculés à l'aide de régression ( $R^2=0,64-0,91$ ) intégrant plusieurs postes météorologiques (Meddour, 2010). En ubac, le gradient pluviométrique est de 39mm/100m ; pour l'adret il est de 64mm/100m.

Pour le gradient thermique, on distingue trois modalités : 0,43°/100m pour la température moyenne annuelle (T), 0,41°/100m pour la température moyenne minimale du mois le plus froid et 0,78°/100m pour la température moyenne maximale du mois le plus chaud.

Un diagnostic détaillé du climat nécessite l'utilisation de plusieurs paramètres, Le Houerou (1995) et Panini & Amandier (2005) estiment qu'il est suffisant de retenir les suivants :

- Le module de précipitation annuelle (P).
- Les précipitations hivernales ( $P_{hiv}$ ), printanières ( $P_{pr}$ ), estivales ( $P_{est}$ ) et automnales ( $P_{aut}$ ).
- L'indice de sécheresse d'Emberger ( $ISE = PE/M$ ).
- La température moyenne maximale du mois le plus chaud (M).
- La température moyenne annuelle (T)
- La température moyenne minimale du mois le plus froid (m).
- L'indice d'aridité de De Martonne (annuel et mensuel) «  $I_{DM} = P/(T+10)$  »
- Le quotient pluviométrique de Stewart (1969) ( $Q_2 = 3,43.P/M-m$ ).

Les postes météo retenus (Fig.2.2) ainsi que les paramètres calculés sont récapitulés dans le tableau (2.1).

### 2.3.1. Précipitations annuelles et saisonnières

Le Djurdjura est l'une des régions les plus arrosées d'Algérie, avec une pluviométrie annuelle allant jusqu'à 1500 mm, elles sont sous forme de pluies et de neige (Derridj, 1990). La région centrale de la chaîne est caractérisée par une période à forte pluviosité s'étalant sur six mois, de novembre à avril, l'hiver étant la saison la plus pluvieuse, l'été est la saison la plus sèche.

Tableau 2.1 : Données climatiques disponibles (1973-2000) et paramètres calculés.

Stations mét.	Alt	P	P <sub>hiv</sub>	P <sub>pr</sub>	P <sub>est</sub>	P <sub>au</sub>	T	M	m	Q <sub>2</sub>	I <sub>DM</sub>	ISE
Ain Alouane	1000	778,9	339,1	280,7	14,7	144,5	14,6	31	4,4	100,44	31,66	0,47
Ait Ouabane	995	1057,9	406,1	317	42,3	292,5	15,2	29,1	4	144,57	41,98	1,45
Assameur	1100	857,7	366,9	278,5	33,1	179,3	14,1	31,6	3,3	103,95	35,59	1,05
Tala Guilef	1450	987	397,1	297,2	43,8	248,9	11,8	25,7	1,7	141,06	45,28	1,7
Tala Rana	1280	961,2	411,1	312,1	37	200,9	13,4	28,8	3,3	129,29	41,08	1,28
Tikjda	1450	1102	471,3	357,8	42,4	230,3	11,7	24,6	1,8	165,78	50,78	1,72

Les chutes de neige ont lieu à partir du mois de novembre et persistent, selon les années, jusqu'au mois de mai et quelque fois jusqu'à juin. Elles peuvent rester jusqu'à l'hiver prochain au niveau des crevasses et des dolines. L'enneigement s'accroît avec l'altitude et est plus important sur le versant nord que sud.

Nous observons du tableau 2.1 que l'élévation en altitude est accompagnée par l'augmentation des pluies le long des deux versants. Cette variabilité est un phénomène dû à l'origine orographique des pluies en Algérie (Chaumont et Paquin, 1971). Elle est notée sur les versants nord exposés aux vents humides, cela est vérifié notamment pour le cas d'Ait Ouabane. L'altitude et l'orientation s'avèrent influencer les quantités de pluie, la chaîne du Djurdjura étant en grande partie perpendiculaire aux vents chargés d'humidité et qui joue un rôle de condensateur.

Les postes représentatifs du Djurdjura sont soumis au même régime saisonnier à dominance hiverno-printanier, il est de type HPAE. L'hiver fournit 40 à 43% des précipitations annuelles totales, le printemps est la deuxième saison la plus pluvieuse (32 à 36%) suivit de l'automne (20 à 27%) et enfin la saison la plus sèche, l'été (2 à 4%).

### 2.3.2. Températures moyennes, minimales et maximales

Les stations prises en compte sont comprises entre les isothermes moyens 11,7 et 15,2°C. La moyenne annuelle la plus fraîche est enregistrée à Tikjda et le maximum est noté à Ait Ouabane. La moyenne des minimas du mois le plus froid (m) est souvent enregistrée pendant le mois de janvier, elle est de 1,8°C à Tala Guilef et atteint 4,4°C à Ain Alouane. L'influence de l'altitude et de l'orientation des versants sur le paramètre "m" est remarquable. Mise à part Tikjda (1450m d'altitude), la moyenne maximale du mois le plus chaud (M) est particulièrement élevée sur les postes méridionaux (28,8 à 31,6°C), ceux exposés en ubac affichent des valeurs plus faibles (25°C à Tala Guilef).

A propos des températures mensuelles, Loukas (2001) note que les mois les plus froids sont, successivement : janvier, février et décembre. De novembre à avril, les minimas absolus sont inférieurs à zéro. Les températures moyennes maximales ne dépassent pas 24°C. Les maximas absolus atteignent les 28°C. La température moyenne des mois de juin à octobre est supérieure à la moyenne annuelle. La saison froide comprend les mois allant de novembre à avril où la température moyenne est inférieure à la moyenne annuelle.

### 2.3.3. Etude du bioclimat

Par rapport à l'indice de sécheresse d'Emberger (ISE), les valeurs affichées permettent de définir trois ensembles de postes : Ain Alouane présente une période de sécheresse très marquée (ISE : 0,47), en opposition à Tikjda et à Tala Guilef où l'indice est relativement élevé (1,70 à 1,72) ce qui dénote une période de sécheresse beaucoup moins marquée que le poste d'Ain Alouane. Le groupe composé d'Ait Ouabane, Assameur et Tala Rana affiche des valeurs intermédiaires (1,45 ; 1,05 et 1,28).

Le positionnement des postes météo sur le climagramme d'Emberger permet de définir leurs bioclimats respectifs. Une simplification de la formule du quotient pluviométrique d'Emberger est proposée par Stewart (1969). Il est calculé par la formule suivante :

$$Q_2 = 3,43.P / (M-m)$$

Où "P" égale au cumul annuel des précipitations, "M" à la température moyenne du mois le plus chaud et "m" à la température moyenne du mois le plus froid.

Afin qu'on puisse différencier plus finement les postes, chaque niveau bioclimatique a été divisé en trois sous-ensembles : supérieur, moyen et inférieur (Quézel et Medail, 2003). La projection des résultats obtenus sur le climagramme d'Emberger selon le modèle de Le Houérou (1995) (Fig.2.3) situe les deux postes de haute altitude (Tikjda et Tala Guilef) respectivement dans l'étage per-humide et humide supérieur à hivers frais. Assameur et Ain Alouane, situés sur la façade méridionale, se positionnent dans le subhumide supérieur à hivers tempérés.

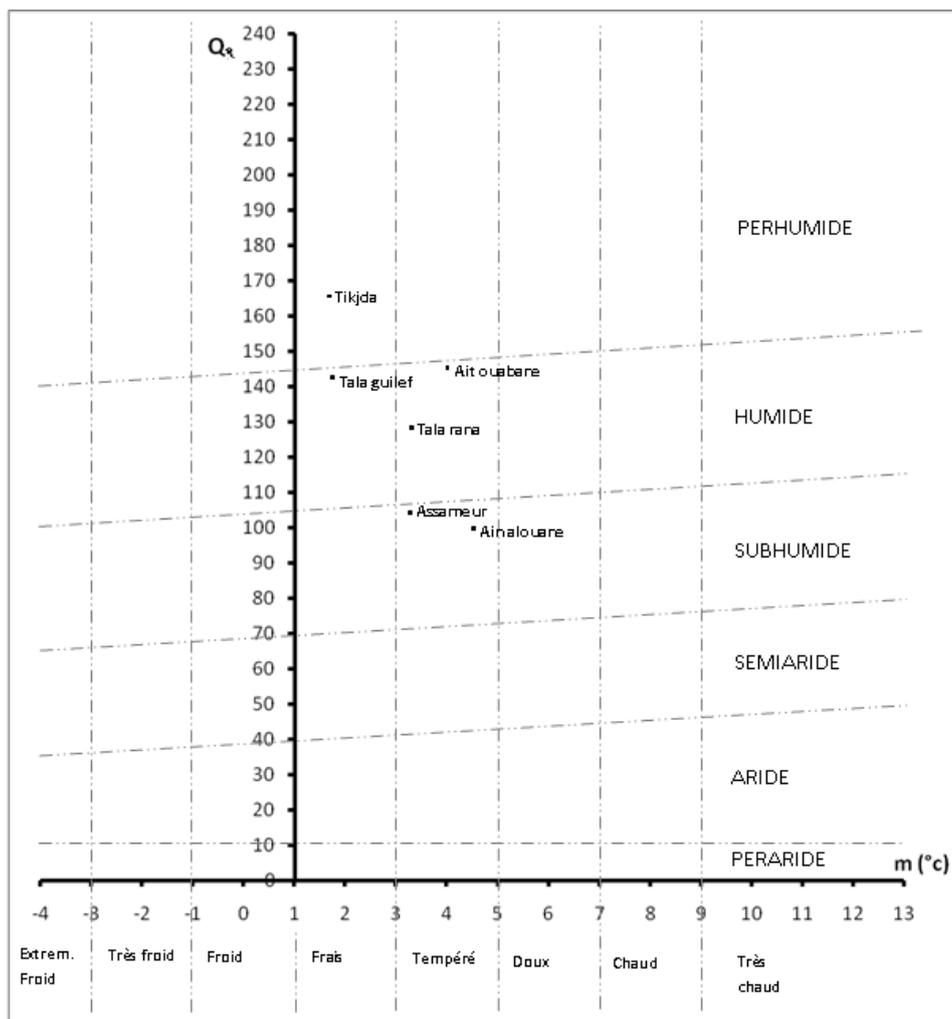


Fig.2.3 : Projection des postes météorologiques du Djurdjura sur le climagramme d'Emberger.

Quant à l'indice d'aridité de De Martonne, dans l'ensemble, comme le montre le tableau 2.2, la saison sèche s'étale sur trois mois, c'est une des principales caractéristiques du climat méditerranéen. Une parfaite concordance est notée avec les résultats obtenus par le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen.

Tableau 2.2 : Valeurs mensuelles de l'indice d'aridité de De Martonne.

	Jan.	fév.	mars	Avr.	Mai	juin	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
<b>Ain Alouane</b>	83,15	65,93	92,92	51,4	18,77	3,295	0,66	1,616	8,886	24,09	38,96	83,97
<b>Ait Ouabane</b>	113,5	72	59,58	66,31	45,51	6,241	1,58	6,857	24,11	42,41	75,04	112,4
<b>Assameur</b>	80,17	84,21	85,86	52,26	25,51	6,976	1,70	3,969	16,25	27,61	45,17	93,59
<b>Tala Guilef</b>	127,8	83,58	73,12	77,61	47,41	9,429	2,17	5,835	23,8	40,53	72,32	128,1
<b>Tala Rana</b>	94,21	98,74	100,2	60,89	29,51	8,03	1,95	4,549	18,67	31,9	52,57	109,8
<b>Tikjda</b>	132,3	123,6	127,8	79,73	35,65	9,578	2,33	5,391	22,67	38,9	66,63	135,3

Légende	
0 < IDM < 5: hyperaride	20 < IDM < 30: subhumide
5 < IDM < 10: aride	30 < IDM < 55: humide
10 < IDM < 20: semi-aride	IDM > 55: per humide

Le mois de juillet est le mois le plus sec sur les deux postes de haute altitude (Tala Guilef et Tikjda). Même constat pour le poste d'Ait Ouabane situé sur le versant septentrional du Djurdjura. En altitude, l'augmentation des précipitations ainsi que la diminution des températures donnent des valeurs élevées de l' $I_{DM}$ .

Cependant, pour ceux du versant méridional (Ain Alouane, Assameur, Tala Rana), la période sèche s'étale d'avantage à deux mois et même à trois mois. De ce fait, le pouvoir de différenciation du topo-climat (adret et ubac) et de l'orographie est bien apparent en montrant des degrés d'aridité relativement différents (1 à 3 mois). Malgré que le poste de Tala Rana soit situé à 1280 m d'altitude, il subit deux mois d'aridité extrême (juillet et août), l'influence des hautes plaines semi-arides de Bouira serait à l'origine.

L'altitude et la physionomie de la végétation sont les premiers critères retenus pour caractériser l'étage de végétation. Selon Ozenda (1975) in Yahi (2007), l'étage de végétation peut être considéré comme un ensemble d'associations phytosociologiques, en se limitant aux associations climaciques ou formé de séries dynamiques, et dans la pratique, il s'agira surtout de retenir le groupement terminal, climacique de chaque série. Dans le Djurdjura et les Babors, les premiers cèdres apparaissent à partir de 1000m d'altitude pour le versant nord et 1200m pour le versant sud. Quant aux limites supérieures, elles sont de l'ordre de 2000m dans les deux massifs. La série du cèdre du Djurdjura est décrite à partir de 1400m, dans l'étage supraméditerranéen. Seulement, cette altitude ne correspond pas à une limite inférieure mais à une aire d'échantillonnage (Yahi, 1988 ; Yahi, 2007).

En fonction des classes de valeurs de l'indice de thermicité, Rivas-Martinez (1985-2005) propose une correspondance avec sept thermotypes alias "étages de végétation". Sur la base de cette classification, Meddour (2010) présente la correspondance de plusieurs postes météorologiques de la Kabylie djurdjuréenne, nous reprenons celles retenues dans cette étude :

- Mésoméditerranéen inférieur : Ait Ouabane ;
- Mésoméditerranéen supérieur : Ain Alouane, Assameur et Tala Rana ;
- Supraméditerranéen inférieur : Tikjda et Tala Guilef.

L'auteur remarque que le Mésoméditerranéen inférieur apparaît ponctuellement à 1000m d'altitude dans la vallée encaissée montagneuse des Ait Ouabane. Le Mésoméditerranéen supérieur fait son apparition vers 900 à 1000m d'altitude et s'étend jusqu'à environ 1400m et au Djurdjura sur le versant méridional (Assameur, Ain Alouane et Tala Rana). Le Supraméditerranéen dans son horizon inférieur commence vers 1400m sur le massif du Djurdjura, en particulier à Tala Guilef et à Tikjda.

#### **2.3.4. Affinités climatiques et bioclimatiques**

Dans l'objectif à la fois d'obtenir une hiérarchisation des variables climatiques et une classification des postes météo retenus et dégager des affinités entre eux, une analyse

multivariée est réalisée. La matrice des données regroupant les paramètres pluviométriques, thermiques et bioclimatiques calculés sur les six postes météorologiques est soumise à une analyse en composantes principales.

Les valeurs propres issues de l'ACP permettent de retenir le plan factoriel 1\*2 qui explique 91,8% de la variance totale, soit 77,43% pour l'axe 1 et 14,37% pour l'axe 2. La projection des variables sur le plan factoriel (Fig.2.4) et l'examen de la matrice des corrélations (Tab.2.3) montrent une relation négative entre l'altitude et les trois paramètres thermiques (T, m et M), ce qui explique la diminution des températures suivant un gradient altitudinal croissant. Bien évidemment, l'indice d'aridité de De Martonne, le quotient pluviothermique ainsi que l'indice de sécheresse d'Emberger sont corrélés positivement avec les pluviométries annuelles et saisonnières et négativement avec les températures minimales, moyennes et maximales. En fin, l'influence positive de l'altitude sur les paramètres bioclimatiques (ISE, IDM et Q<sub>2</sub>) est clairement mise en évidence.

Tableau 2.3 : Matrice des corrélations des variables analysées.

	Alt	P	P hiv	P pr	P es	P au	T	M	m	Q <sub>2</sub>	Idm	ISE
Alt	1,00											
P	0,53	1,00										
P hiv	0,68	0,92	1,00									
P pr	0,53	0,87	0,96	1,00								
P es	0,59	0,88	0,76	0,59	1,00							
P au	0,23	0,84	0,57	0,52	0,84	1,00						
T	-0,98	-0,44	-0,61	-0,48	-0,49	-0,13	1,00					
M	-0,87	-0,78	-0,82	-0,77	-0,68	-0,54	0,85	1,00				
m	-0,95	-0,57	-0,66	-0,50	-0,67	-0,33	0,95	0,85	1,00			
Q <sub>2</sub>	0,64	0,97	0,93	0,91	0,80	0,76	-0,58	-0,89	-0,65	1,00		
Idm	0,79	0,93	0,94	0,86	0,84	0,68	-0,74	-0,93	-0,81	0,96	1,00	
ISE	0,73	0,91	0,83	0,69	0,96	0,80	-0,65	-0,83	-0,80	0,89	0,94	1,00

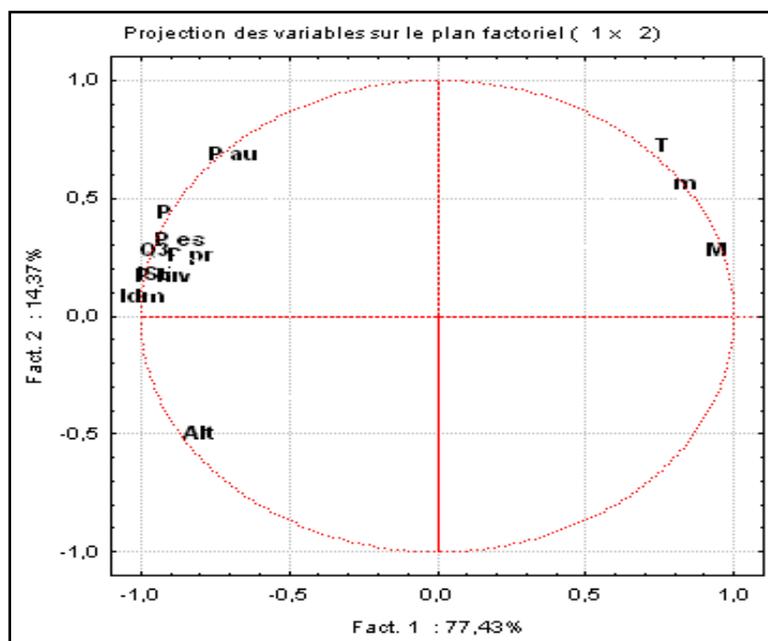


Fig.2.4 : Projection des variables sur le plan factoriel 1\*2.

La projection des postes sur le plan factoriel et l'analyse des contributions des individus permettent de dégager des divergences et des analogies (Fig.2.5). Par rapport à l'axe 1, le groupe formant "Tikjda – Tala Guilef" s'oppose à celui de "Ain Alouane – Assameur". Les facteurs les plus contributifs à cet axe sont respectivement le  $Q_2$  (9,86%), M (9,45%), P (9,21%) et m (7,48%). On peut affirmer que le quotient pluviothermique d'Emberger est le plus discriminant dans la mesure où le groupe "Tikjda – Tala Guilef" ont une valeur comprise entre 141,06 et 165,78 alors que le groupe "Ain Alouane – Assameur" varie de 100,4 et 103,95. En outre, la température minimale du mois le plus froid influence aussi la séparation de ces deux groupes ayant comme conséquence la classification du premier groupe dans la variante fraîche et le deuxième dans le tempéré.

La comparaison des précipitations annuelles et de la température maximale du mois le plus chaud affiche des différences significatives entre les deux groupes ainsi que la corrélation positive entre ces paramètres et le quotient d'Emberger ( $r : 0,85$  à  $0,97$ ) mène à conclure que l'axe 1 interprète l'étagement bioclimatique.

En ce qui concerne l'axe 2, le poste d'Ait Ouabane est exceptionnellement contributif (78,34%), cet axe oppose ce poste au groupe "Tikjda – Tala Guilef". Les facteurs dont leur contribution est notable sont la température moyenne annuelle ( $T : 25,05\%$ ) et l'altitude (18,5%). Comparé aux deux postes de haute altitude, Ait Ouabane est plutôt situé à moyenne altitude (995m), ce facteur combiné à son positionnement géo-topographique noté dans les paragraphes précédents a permis une influence maritime ce qui a augmenté les températures moyennes. Celles-ci varient de  $11,7$  à  $11,8^\circ\text{C}$  à Tikjda et Tala Guilef et de  $15,2^\circ\text{C}$  à Ait Oubane. L'axe 2 interprète donc l'orographie qui sépare les postes de haute et de moyenne altitude.

Meddour (2010) note que le cas d'Ait Ouabane mérite une attention particulière. Cette station est située dans le bioclimat humide supérieur à hivers tempérés où se cohabitent le cèdre de l'Atlas et une chênaie caducifoliée à *Quercus canariensis* Willd. Evidemment, c'est sur les montagnes sublittorales de Kabylie à moyenne altitude que doit régner la variante d'hiver tempéré, Ait Ouabane situé en haut Djurdjura a fait l'exception, cela ne peut avoir qu'une origine géo-topographique. En effet, la chaîne du Djurdjura forme un arc de cercle ouvert vers le nord où l'influence maritime est plus prononcée dans la partie centrale. Cette ouverture vers le nord s'affirme dans le col d'Ait Ouabane, son influence se traduit par la diminution de la continentalité, l'augmentation de l'hygrométrie et l'adoucissement des températures minimales, ces conditions ont pour corollaire l'extension des feuillus dans cette partie.

Cependant, cette analyse n'a pas permis de montrer l'effet topo-climatique (expositions nord et sud du Djurdjura). Bien qu'il soit mis en évidence par Messaoudène (1989) et Meddour (2010) mais en utilisant un nombre important de postes météo repartis dans un large territoire de l'Algérois et de la Kabylie. A noter aussi une influence quasi-insignifiante du poste de Tala Rana sur la distribution spatiale des postes autour du Djurdjura.

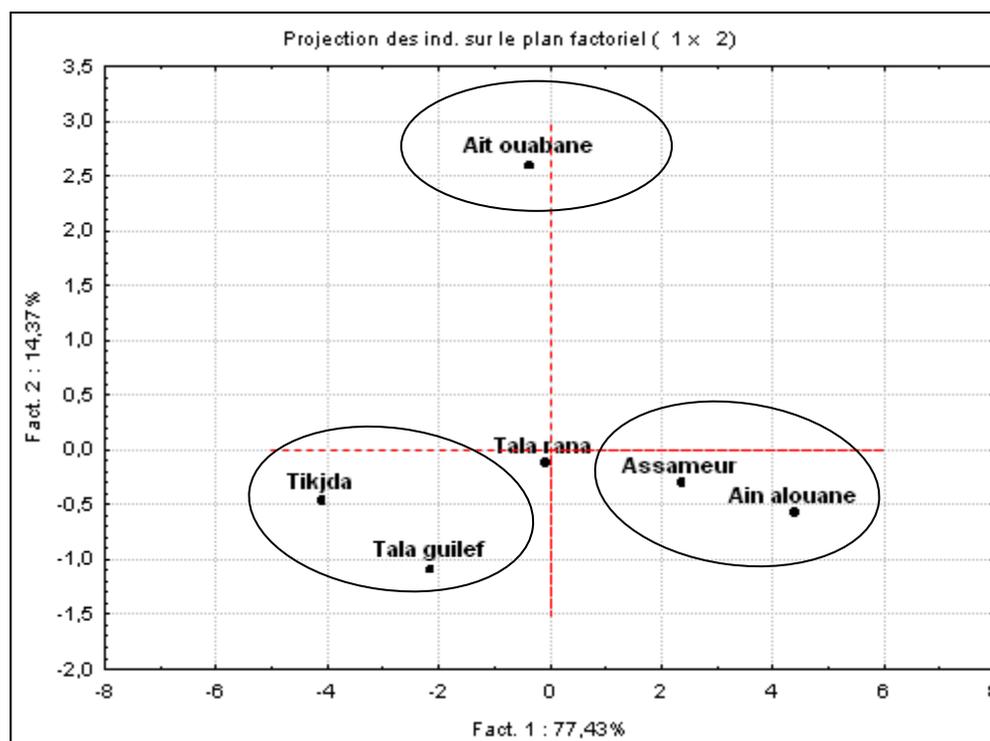


Fig.2.5: Projection des postes météos sur le plan factoriel retenu.

#### 2.4. Peuplements sylvatiques et végétation du Djurdjura

Le cèdre de l'Atlas est l'espèce caractéristique de la chaîne du Djurdjura, il s'étale sous forme d'un tapis végétal discontinu de Tala Guilef pour atteindre les Ait Ouabane, beaucoup plus à l'est. Les principales formations sylvatiques du massif sont des cédraies pures (40%), des forêts mixtes cèdre – chêne vert (30%) et des chênaies vertes (13%), le reste de la surface est constitué par des formations asylvatiques. Notons aussi la présence d'une espèce endémique, le pin noir (*Pinus nigra ssp. mauritanica*), formant de petits îlots à Tigounatine et des sujets épars à Taouialt (Tikjda).

Pour seulement sa répartition djurdjuréenne, les connaissances relatives aux structures phytosociologiques dans lesquelles rentre le cèdre de l'Atlas sont relativement complètes. A ce titre, nous citons les travaux de Mestar (1995), Mediouni et Yahi (1989), Yahi (2007) et Meddour (2010).

Sur les lignes de crêtes et à très haute altitude, le paysage laisse apparaître de vieux cèdre rabougris et de forme tabulaire. En revanche, à des altitudes plus basses, le cèdre se retrouve en formation forestière, aussi bien pure que mixte. Il est souvent associé au chêne vert qui constitue la deuxième essence forestière dominante. D'autres essences accompagnatrices sont notamment recensées : *Quercus canariensis*, *Prunus avium*, *Taxus baccata*, *Sorbus aria*, *Acer obtusatum*, *Acer compesttris* et *Acer monspessulanum*. La strate arbustive est constituée de *Ilex aquifolium*, *Daphne laureola*, *Ruscus aculeatus* et *Rubus ulmifolius* (Bouheraoua, 1993). Notons que ces dernières sont plutôt rares et éparées.

Une autre formation dite pelouse écorchée ou pelouse pseudo-alpine, située au delà de 1350m d'altitude sur des zones déboisées des crêtes calcaires où plusieurs espèces sont rencontrées : *Berberis hispanica*, *Juniperus communis* ssp *hemispherica*, *Crataegus laciniata*, *Rosa sicula*, *Prunus prostrata*, *Robus ulmifolius* et quelques xérophytes épineuses : *Bupleurum spinosum* et *Astragalus numidicus*. La pelouse écorchée est issue le plus souvent de la dégradation de la cédraie en altitude et caractérise la végétation de haute montagne d'Afrique du nord (Meddour, 2010).

Du point de vue diversité floristique, le Djurdjura recèle aussi une flore remarquable, la présence du pin noir est l'une des particularités du Parc National du Djurdjura. Mais une liste très large d'espèces endémiques sont recensées : *Agropyrum marginatum* ssp *kabylicum*, *Aristolochia longa* ssp *fontanesii* var *djurdjurae*, *Campanula djurdjuraei*, *Dryopteris aculeata* var *djurdjuraie*, *Poa alpina* var *djurdjuraie* (DGF, 2006).

## Chapitre III

# Les reboisements de cèdre de l'Atlas : Bilan, croissance et comportement

### Introduction

Le reboisement est l'opération qui consiste à créer ou à reconstituer des peuplements à l'aide d'espèces forestières adaptées au climat et au sol. Les reboisements ont pour objectif l'enrichissement des massifs forestiers par la création de nouveaux boisements en terrains nus et en cas de déficit de la régénération naturelle.

En Algérie, l'aménagement des bassins versants, la lutte antiérosive, la protection et la reconstitution des sols et, par extension, l'augmentation des surfaces forestières sont parmi les objectifs à assigner à tout programmes de reboisement. Dans ce sens, la priorité est donnée à l'installation, sur les terrains dénudés, d'une végétation adaptée. A travers les chantiers populaires de reboisement (CPR, 1962-1967), les différents plans triennaux, quadriennaux et quinquennaux (1967-1990) et le plan national de reboisement (1996), des surfaces considérables ont été reboisées essentiellement avec le pin d'Alep même dans des zones où d'autres essences plus valorisables peuvent s'adapter facilement (Letreuch-Belarouci, 1991). Bien que la production du cèdre, sur substrat cristallin, soit le double de celle du pin d'Alep, les surfaces reboisées avec ce résineux noble, dont la qualité du bois est excellente, sont

insignifiantes et se concentrent autour de l'aire naturelle de l'espèce (Belezma, Chélia, Chréa et Djurdjura).

Boudy (1950) affirmait que la réussite d'un reboisement exige beaucoup de foi et de ténacité, car l'opération doit, sous peine d'échec certain, reposer sur des bases scientifiques définies et sur une étude détaillée des facteurs physiques : exposition, végétation spontanée, sol, du périmètre à restaurer par le reboisement et la maîtrise des techniques de sylviculture et de reboisement susceptibles de constituer un peuplement plus satisfaisant dans un temps plus court. Actuellement, les constats et les bilans établis démontrent que ces affirmations sont encore d'actualité.

En raison des conditions édapho-climatiques hostiles (sécheresse et sols squelettiques et superficiels), plusieurs plantations de cèdre dans les Aurès ont enregistré des taux d'échec très élevés, celle de Chréa et du Djurdjura sont plus satisfaisantes. Des prospections approfondies pourraient révéler aussi d'autres causes liées à la qualité des plants produits en pépinière et aux techniques de plantation.

Ce chapitre s'intéresse à l'étude de la croissance et du comportement de quelques reboisements de cèdre réalisés au cours des années soixante-dix et quatre-vingts dans le Djurdjura (col de Tirourda "1978", col de Chellata "1990" et Tizi Oujaâboub "1987"). Quatre reboisements réalisés en 1935, 1958, 1970 et 1998 dans le l'Atlas blidéen ont été aussi étudiés.

Du point de vue méthodologique, il sera question d'une analyse descriptive détaillée des paramètres dendrométriques (hauteur et circonférence) et la mise en évidence de l'effet de l'âge, de la fertilité de la station, des conditions de plantation et des techniques antiérosives sur la reprise des plants (à travers le taux de réussite) et sur la croissance par le biais de l'estimation de la productivité des peuplements. Ensuite, une comparaison des conditions de plantation et de la croissance est réalisée en intégrant quatre reboisements de différents âges, répartis dans l'Atlas blidéen (Parc National de Chréa) et réalisés en 1935, 1958, 1970 et 1998. Enfin, une confrontation des résultats obtenus avec ceux des cédraies naturelles, algériennes et marocaines, et avec deux peuplements artificiels réalisés en France. Cette approche sera appuyée par l'étude de la croissance radiale et de l'analyse des cernes de toutes les plantations.

### **3.1. Les plantations du Djurdjura**

#### **3.1.1. Le reboisement du "col de Tirourda"**

La plantation de cèdre est réalisée en 1978 sur une surface d'environ 450 ha. Le reboisement est localisé dans la zone communément appelée "col de Tirourda", située dans la partie orientale de la chaîne du Djurdjura et culmine à 1700m d'altitude. Les zones reboisées sont situées de part et d'autre de la route nationale N° 15 reliant Tizi-Ouzou à Bouira via Taquerbouzt (Fig.2.2). (Annexe 2, A).

Du point de vue pédologique, le sol présent est de type brun forestier avec une charge caillouteuse relativement importante. Quant à la topographie, le versant sud du col de Tirourda renferme plusieurs zones à très fortes pentes (jusqu'à 58%) où des terrasses anti-érosion ont été construites, sur lesquelles les plantations avaient lieu.

Prenant en compte le contraste stationnelle qui caractérise le reboisement, une stratification est réalisée, celle-ci a pour objectif d'individualiser des sous-unités plus homogènes et les sonder indépendamment les unes des autres. Au total douze strates (stations) ont été décrites, leur position géographique est présentée dans la figure 3.1 et leur description stationnelle est récapitulée dans le tableau 3.1.

L'étude quantitative est basée sur l'analyse descriptive détaillée de la croissance faisant intervenir plusieurs paramètres dendrométriques (âge, hauteur dominante, hauteur totale, circonférence à 1.30) et d'autres sylvicoles (densité et espacement).

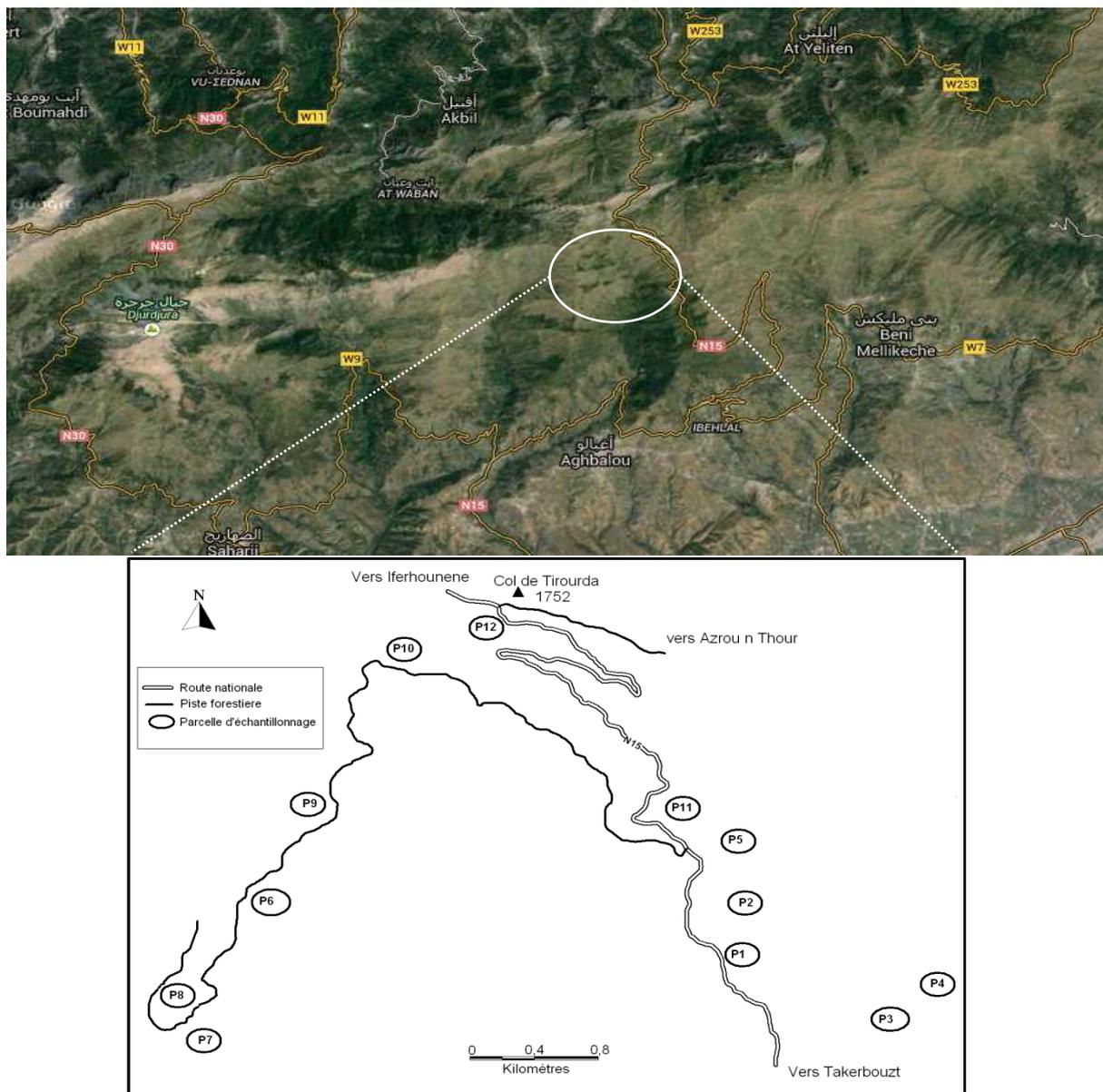


Fig.3.1 : Localisation géographique des stations échantillonnées.

Tableau 3.1 : Description des stations échantillonnées.

N° station	Coord. Géo.	Alt. (m)	Expo.	Pente (%)	D <sub>0</sub> (tige/ha)	D <sub>ac</sub> (tige/ha)	Taux de Réussite	Sol	Observations
1 "Laâzayeb "	N36°27'13.4" E4°21'38.7"	1530	S-O	58	2480	1860	75%	Profond et très caillouteux. Absence de terrasse	Présence de plusieurs cépées de chêne vert
2 "Laâzayeb "	N36°27'17.0" E4°21'42.7"	1550	N-O	45%	1605	1605	100%	Sol rocailleux, Sur terrasse (L : 8.1m ; dénivelé : 2m)	Plantation en trois lignes par terrasse.
3 "Tiliwa"	N36°27'3.3" E4°21'49.2"	1582	Globale Nord	<5%	2429	1773	73%	Profond, riche en matière organique (sur plateau)	Plantation en alignement. Elagage naturel enclenché
4 "Tiliwa"	N36°27'2.6" E4°21'51.9"	1583	O	45%	2548	2247	88.2%	Profond avec une charge caillouteuse de petite dimension.	Plantation en alignement sur pelouse.
5 "Laâzayeb "	N36°27'21" E4°21'41.1"	1542	S-O	15%	2082	1645	79%	Argileux à hydromorphie temporaire.	Présence de <i>juncus sp</i>
6 "Tamizeft"	N36°27'10.1" E4°20'6.4"	1527	Globale E	<5%	1976	1818	92%	Plateau avec fossés de drainage. Sol filtrant.	-
7 "Almiwene"	N36°26'57.2" E4°19'38.5"	1558	O	36%	1792	1523	85%	Profond et caillouteux. Sur terrasse.	Deux lignes de plantation par terrasse.
8 "Almiwene"	N36°27'0.9" E4°19'30.7"	1552	N-E	51%	1653	1554	94%	Profond et caillouteux. Sur terrasse.	-
9 "Tala n Tkhabit"	N36°27'30.6" E4°20'18.3"	1574	E	40%	1798	1798	100%	Profond avec une charge caillouteuse de petite dimension.	Peuplement fermé sur terrasse.
10 "Agni n Laâker"	N36°28'9.3" E4°20'31.9"	1562	S-O	46%	2475	1708	69%	Profond avec une charge caillouteuse très fine.	Reboisement dans un bas-fond.
11 "Laâzayeb "	N36°27'22.3" E4°21'38.2"	1548	S-O	24%	2096	964	46%	Profond avec une charge caillouteuse réduite.	Reboisement en ligne en bas de pente.
12 "Tizi n Tirourda"	N36°28'19.6" E4°20'53.1"	1745	O	38%	3845	1538	40%	Profond avec une charge caillouteuse moyenne.	-

### 3.1.1.1. Analyse descriptive des hauteurs et des circonférences

Après inventaire (mesures dendrométriques) et analyse des données, les résultats sont présentés dans le tableau 3.2. Celui-ci montre que dans l'ensemble les mesures ne sont pas très dispersées à l'intérieur de chaque station puisque le coefficient de variation ne dépasse pas 0.21. Il est noté aussi que les hauteurs les plus élevées s'accompagnent des circonférences les plus importantes sauf pour la station 12 où l'accroissement en circonférence apparaît plus important que celui en hauteur, la position de cette station dans une ligne de crête et en haute altitude très exposée aux vents forts aurait ralenti l'élancement des arbres.

Les stations 2, 6 et 9 montrent les valeurs de hauteur et de circonférence les plus importantes, elles varient respectivement de 13.56 à 14.10m et de 80.96 à 82.34cm. Les critères communs qui regroupent ces stations sont le taux de réussite exceptionnel des reboisements qui dépasse 92% et atteint parfois 100% et leur position soit sur des plateaux ou sur des terrasses antiérosives. Cependant, la station 5 s'individualise en montrant les valeurs les plus faibles, le sol argileux et l'hydromorphie temporaire qui caractérise cette station causent un grand retard de croissance aux arbres puisque en 34 ans, ils n'ont pas dépassé 54cm de circonférence et 9m de hauteur. Toutefois, les stations en position intermédiaire sont bien portantes, les circonférences et les hauteurs tournent respectivement autour de 70cm et 11m.

Un même comportement des stations quant à la hauteur et à la circonférence est clairement mis en évidence. En effet, la comparaison graphique des hauteurs et des circonférences moyennes des stations montre une concordance et un synchronisme presque parfaits, ce qui mène à confirmer qu'à l'exception des stations 8 et 12, les hauteurs élevées coïncident avec les circonférences importantes (Fig.3.2). On note aussi que l'effet station, quantifiée par une analyse de la variance à un facteur, est beaucoup plus accentué sur les hauteurs que sur les circonférences. Cependant, ces différences ne sont pas liées à un comportement individuel de chaque station puisque le test de Newman et Keuls a révélé des similitudes entre elles, ce qui permet de constituer des groupes homogènes selon chaque paramètre dendrométrique. Les groupes issus du test N-K sont les suivants :

Mesures de hauteur :

Groupe 1 : stations 3, 6, 2 et 9 : les hauteurs élevées, [13.02, 14.10] ;

Groupe 2 : stations 7, 1, 11, 4, 10 et 8 : les hauteurs intermédiaires, [10.16, 11.61] ;

Groupe 3 : station 5 et 12 : les hauteurs faibles [8.59, 9.25].

Mesures de circonférence :

Groupe 1 : stations 3, 6, 2, 9 et 8 : les circonférences importantes, [74.14, 82.34] ;

Groupe 2 : stations 7, 1, 11, 4, 10 et 12 : les circonférences intermédiaires, [63.46, 69.88] ;

Groupe 3 : station 5 : les circonférences faibles [53.61].

On remarque qu'à part les stations 8 et 12, les mesures de hauteur et de circonférence permettent l'obtention des mêmes groupes homogènes.

L'effet de la densité n'est pas bien apparent dans la mesure où les faibles densités ne coïncident pas avec les circonférences élevées et les hauteurs les plus importantes ne sont pas constatées dans les peuplements denses. Ceci est expliqué par l'état jeune de ce reboisement. A ce stade de développement de la futaie, les phénomènes de concurrence qui régissent essentiellement l'accès à la lumière ne sont pas encore enclenchés. Ce constat est assez clairement vérifié par la comparaison des stations 4 et 11 où deux valeurs extrêmes de densité (964 à 2247 tiges/ha) donnent des valeurs de circonférence très proches (63.46 à 64.81cm) et de hauteurs pratiquement égales (10.80 à 10.93m).

Tableau 3.2 : Analyse descriptive des paramètres dendrométriques.

Stations	Circonférence (cm)				Hauteur (m)			
	X	M	m	CV	X	M	m	CV
1	65,20	89,54	38,96	0,19	10,74	13,60	7,60	0,12
2	80,96	110,27	48,69	0,19	13,72	18,00	9,50	0,11
3	75,15	94,56	56,86	0,11	13,02	14,70	10,30	0,07
4	64,81	89,22	41,47	0,16	10,93	14,20	8,40	0,12
5	53,61	71,94	20,42	0,20	8,59	12,60	4,50	0,17
6	82,34	105,24	38,33	0,16	13,56	16,00	11,20	0,09
7	67,01	106,19	37,70	0,21	10,16	12,00	7,00	0,12
8	78,42	116,55	40,84	0,21	11,62	14,30	6,40	0,14
9	82,18	122,84	59,06	0,16	14,10	16,00	11,00	0,07
10	69,45	94,25	36,76	0,20	11,58	14,80	6,30	0,14
11	63,46	98,33	36,13	0,20	10,80	13,40	6,50	0,14
12	69,88	90,79	49,95	0,15	9,25	11,80	5,80	0,14

X : moyenne ; M : maximum ; m : minimum ; cv : coef. de variation :  $cv = \frac{\sigma}{\bar{x}} = \frac{\frac{1}{n}\sum(x_i - \bar{x})}{\frac{1}{n}\sum x_i}$

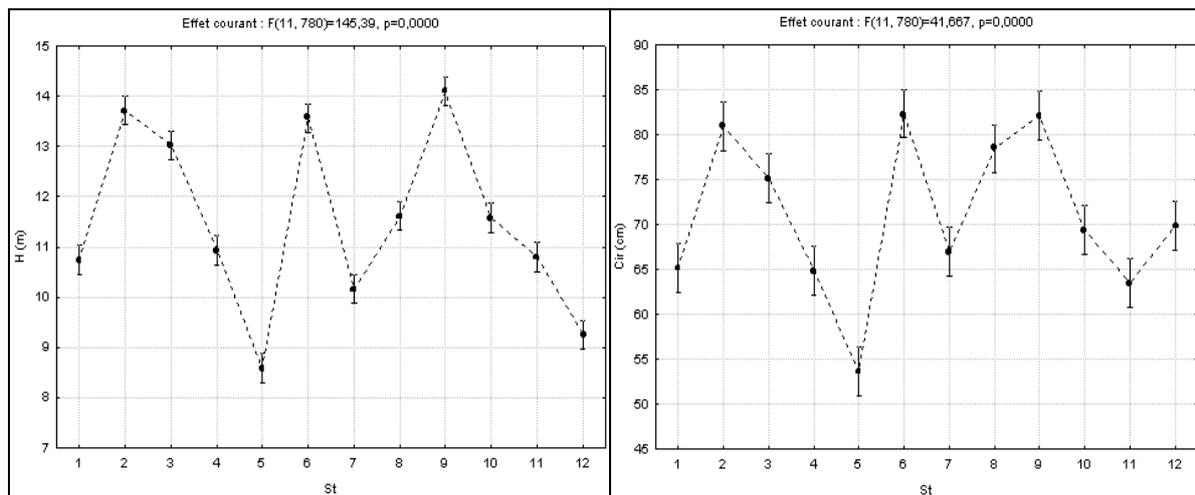


Fig.3.2 : Anova et comparaison graphique des stations (hauteur et circonférence).

A propos du tableau descriptif des stations (Tab.3.1), quelques remarques sont nécessaires: les données affichées montrent que la densité de plantation ( $D_0$ ) n'est pas identique selon les stations, elle varie de 1605 à 3845 tiges/ha, elle est considérée importante puisque la densité communément appliquée avoisine 2000 tiges/ha.

A ce sujet, Letreuch-Belarouci (1991) note que pour la quasi-totalité des reboisements réalisés en Algérie, il a été décidé de façon théorique que la densité de plantation soit de 2000 plants par hectare (2\*2,5m d'écartement). Cette norme ne découle pas d'une expérimentation dans le but de déterminer si elle est la mieux appropriée aux conditions de milieu et aux objectifs recherchés. Etant donnée le bilan positif de cette plantation, on considère que cette densité, même si elle est très élevée, ne constitue pas un facteur défavorable à ce stade d'évolution des peuplements mais celle-ci deviendra un véritable frein à la croissance et peut diminuer la vitalité des peuplements à l'état adulte si des actions sylvicoles, notamment des éclaircies, ne seront pas réalisées. Bien que la littérature s'accorde à dire que le cèdre de l'Atlas apprécie un léger ombrage dans le jeune âge, il en va tout autrement à l'âge adulte, une sylviculture extensive adaptée aux objectifs de protection assignés à ces reboisements est vivement recommandée.

Dans d'autres contextes bioclimatiques moins humides que le Djurdjura et vu la maigre disponibilité en eau, on ne peut établir des plantations à forte densité comme ça se fait dans les régions où la finalité était de produire du bois. L'objectif de protection pour lequel les plantations ont été réalisées n'exige pas que la forêt soit dense et fermée. L'état globalement squelettique des sols ainsi que le manque d'eau devraient inciter à choisir des densités de plantation relativement faibles.

Pour les techniques de plantation, les travaux préparatoires sont axés sur l'amélioration du comportement hydrique du sol ainsi que d'éviter le ruissellement accentué par les fortes pentes. Des terrasses de 8m de longueur et 2m de dénivelé ont été installées, les résultats confirment que ces travaux sont très favorables à la reprise des plants et à la croissance future des arbres, que ce soit en deux ou trois lignes de plantation par terrasse (Annexe 2, B).

Le taux de réussite de ce reboisement est exceptionnel, quatre stations ont dépassé les 90% et atteignent même les 100%. A l'exception des stations 11 et 12, les taux dépassent, dans tous les cas, les 70%. La station 5 située dans un environnement pédologique défavorable (sol argileux et temporairement hydromorphe) affiche un taux de réussite de 79%. Il s'avère que ces conditions n'ont pas d'effet négatif sur la reprise des plants et sur leur croissance juvénile mais le ralentissement de la croissance en hauteur et en circonférence est bien évident (Annexe 2, C).

### **3.1.1.1. Croissance et productivité**

Les résultats obtenus du reboisement du col de Tirourda ont été confrontés à ceux des différentes cédraies algériennes, marocaines et françaises, notamment, celle du Belezma (Batna), Chréa (Blida), le Rif et les plantations de Bretagne et de sud de la France. Il serait judicieux de comparer les hauteurs moyennes et dominantes, pour cela, la hauteur dominante de chaque station est estimée par le calcul de la hauteur moyenne des cent plus gros arbres à l'hectare. Les douze valeurs ont été réparties en trois niveaux de fertilité relative

à la zone. Dans notre cas, la hauteur dominante n'est pas estimée à un âge de référence mais à celui de la plantation (34 ans). Les estimations sont présentées ci-dessous :

- Fertilité faible : la hauteur dominante varie de 9 à 11m (stations 1, 5, 7 et 12) ;
- Fertilité moyenne : la hauteur dominante varie de 11 à 14m (stations 3, 4, 8, 10, et 11);
- Fertilité bonne : la hauteur dominante est supérieure à 14m (stations 2, 6 et 9).

A noter que ce classement est fait de façon arbitraire puisque les notions de bonne ou de faible fertilité sont liées seulement aux conditions de fertilité globale de la zone reboisée. Donc les autres contextes pédoclimatiques n'ont pas été intégrés pour l'établissement de ce classement, l'appréciation de la fertilité est l'aboutissement du calcul de la hauteur dominante. Le tableau 3.3 représente la croissance annuelle en hauteur dominante à 34 ans des différentes cédraies.

Tableau 3.3 : Comparaison de la productivité de quelques cédraies méditerranéennes.

Cédraies	Tirourda (Djurdjura)			Belezma (Batna)		Chrèa (Blida)		Sud de France		Rif marocain		Bretagne	
	H <sub>d-34</sub>	Ac. H	Ac.C	H <sub>d-34</sub>	Ac. H	H <sub>d-34</sub>	Ac. H	H <sub>d-34</sub>	Ac. H	H <sub>d-34</sub>	Ac. H	H <sub>d-34</sub>	Ac. H
<b>Bonne</b>	14,08	41,42	2,41	5,85	17,23	13,98	41,14	15,73	46,28	14.4	42.35	16.80	49.41
<b>Moyenne</b>	12,14	35,71	2,13	4,91	14,47	11,271	33,15	12,81	37,7	13.1	38.53	-	-
<b>Faible</b>	9,03	26,57	1,87	4,03	11,88	8,35	24,57	9,42	27,71	11.7	34.41	-	-

*H<sub>d-34</sub>* : hauteur dominante à 34 ans (m) ; *Ac.H* : accroissement annuel en hauteur dominante (cm/an).

*Ac.C* : accroissement en circonférence (cm/an).

A cet âge où le reboisement est au stade bas-perchis et selon les conditions de fertilité, on considère que les arbres ont atteint une hauteur dominante considérable (14,08m) et le rythme de croissance annuel en hauteur est important (41.42cm/an).

L'essai d'introduction du cèdre de l'Atlas en Bretagne sur sol brun acide et profond avec une pluviométrie moyenne variant de 700 à 1100mm/an révèle une productivité très appréciable. Ce peuplement atteint une H<sub>dom</sub> de 16.8m à 34 ans et 17.1m sur des sols caractérisés par une réserve utile comprise entre 45 et 100mm et une densité de plantation ne dépassant pas 1300 tiges/ha (Hainry et Colombet, 2009). Il est remarqué aussi que le cèdre de l'Atlas paraît capable de supporter le climat humide et frais du Centre Bretagne, ce qui est en apparence contradiction avec ses préférences méridionales. En ce qui concerne la hauteur totale moyenne, les auteurs ont ajusté le modèle hauteur-âge suivant :

$$H = 9.2485 \ln(\text{âge}) - 15.66$$

A 34 ans, la courbe affiche une hauteur totale moyenne de 16.95m, ce qui est nettement plus élevé que les valeurs obtenues au col de Tirourda.

Le même constat est observé pour les cédraies artificielles du sud de la France (Mont Ventoux), nos résultats sont inférieurs à ceux trouvés par Toth (1973) surtout dans les cédraies sur substrat gréseux et cristallin puisque les arbres ont une croissance annuelle en

hauteur de l'ordre de 46.28cm/an. Cependant, sur substrat calcaire, l'accroissement chute jusqu'à 27.71cm/an. A titre de comparaison, les conditions les plus favorables au col de Tirourda coïncident avec la fertilité moyenne en Provence.

Les observations de Ripert et Boisseau (1994) confirment qu'en Provence, le cèdre de l'Atlas ne dépasse pas 12m à 30 ans, 24m à 50 ans et 36m à 80 ans. Ils notent aussi que la croissance de cette essence est lente dans le jeune âge, la concurrence est donc à craindre dans les régénérations et les plantations, soit vis-à-vis de la végétation adventice, notamment des graminées, soit vis-à-vis d'essences à croissance plus rapide (pin noir par exemple). Dans le vieil âge, les courbes présentent une asymptote oblique. Les cèdres en peuplement forestier continuent de croître légèrement au-delà de 90 ans.

Confrontés aux cédraies de l'Atlas blidéen (Chrèa), les résultats apparaissent presque similaires. Bien que le Djurdjura soit plus humide, les conditions stationnelles sont plutôt identiques avec une altitude qui varie de 1100 à 1600m, le sol est brun forestier moyennement profond sur substrat schisteux et une pluviométrie qui dépasse les 980mm/an. Dans de telles situations, le cèdre de l'Atlas trouve toutes les conditions nécessaires à son développement optimal. La productivité étudiée par Nedjahi (1987) a montré que dans les stations les plus favorables, la hauteur dominante atteint 13.98m à 34 ans. La plantation du col de Tirourda affiche une valeur très proche (14.08m).

La cédraie du Rif marocain apparaît légèrement plus productive avec une hauteur dominante de 14.4m à 34 ans pour la première classe de fertilité. Le plus grand écart est noté pour la troisième classe (11.7m). M'hirit (1994) signale que le cèdre de l'Atlas se retrouve dans son aire optimale dans cette région dont la situation géographique se caractérise par une double influence atlantique et méditerranéenne avec une douceur du climat et une abondance des précipitations qui peuvent atteindre 1350mm/an.

Par contre, comparés à la productivité du cèdre dans le Belezma, les résultats sont très distincts. Dans la première classe de fertilité, la hauteur dominante à l'âge de référence chute à 5.85m ce qui fait un élanement annuel de 17.23cm/an (Bentouati et Oujehih, 1999), le double de ces performances est noté dans le col de Tirourda. Le substrat ne pourra pas être l'élément de discrimination puisque le Belezma repose dans l'ensemble sur des grès ou des schistes, les faibles précipitations seraient le facteur déterminant, en effet le massif, soumis aux influences sahariennes, se caractérise par un climat continental très contrasté présentant une faible pluviométrie (500 mm/an) et une amplitude thermique accentuée.

### **3.1.2. Reboisements du col de Chellata et de Tizi Oujaâboub**

La plantation du col de Chellata est localisée à l'extrême est de la chaîne du Djurdjura à 1400m d'altitude. Réalisée en 1990 sur une surface de 40 ha. Le taux de réussite apparaît très faible mais il n'est pas possible de l'estimer avec exactitude puisque les traces de plantation ont été effacées par le pacage très accentué dans cette zone où le broutage des plants rabougris est observé. A noter aussi que cette plantation a été incendiée volontairement

plusieurs fois par les riverains, le motif principal est pour permettre le développement de la strate herbacée prisée par les animaux d'élevage (régénération du diss : *Ampelodesma mauritanica*).

Le reboisement de Tizi Oujaâboub est situé dans la partie occidentale du massif montagneux du Djurdjura (à 15 kilomètres au sud-est de la ville de Boghni). Réalisé en 1987 et occupe une surface de 40 ha (Annexe 2, D). La surface initiale apparaît beaucoup plus importante puisque des parties importantes de la plantation ont été ravagées par des incendies et dégradées par des coupes illicites (Annexe 2, E). La partie inventoriée est relativement préservée (Annexe 2, F).

Vu que leur âge est très proche (22 et 25 ans), l'intérêt de la comparaison de ces deux reboisements s'inscrit dans le but de mettre en évidence l'effet des conditions de mise en place, notamment édaphiques ainsi que l'influence de la pression humaine surtout au cours des premières années de reboisement sur la réussite des reboisements et la croissance des arbres. Le tableau 3.4 présente le descriptif détaillé des deux plantations.

Tableau 3.4 : Descriptif des deux reboisements (col de Chellata et Tizi Oujaâboub).

Plantations	Coo.Géo.	Alt. (m)	Exposition	Densité (Tiges/ha)	Pente(%)	Substrat, sol et observations
Col de Chellata (1990)	N 36°31'07,1" E 04°27'29,2"	1400	Sud-ouest	985	19%	- Substrat schisteux, moyennement profond, charge caillouteuse importante. Terrain sur terrasses mal entretenues par endroits, piétiné par le surpâturage et présente des signes d'érosion.
Tizi Oujaâboub (1987)	N 36°27'9.5" E 03°56'53.3"	1220	Générale sud	1960	Plateau (<5%)	Plantation sur une ligne de crête. Substrat calcaire et sol brun lessivé, profond, charge caillouteuse très faible.

Après mesures dendrométriques et analyse des données, les résultats sont récapitulés dans le tableau 3.5.

Tableau 3.5: Résultats des mesures dendrométriques.

Plantations	Hauteurs				Circonférences		
	$\bar{X}$	CV	$H_d^*$	Ac.H	$\bar{X}$	CV	Ac.C
Col de Chellata	4.13	0.60	5,03	22,86	24.66	0.79	1,12
Tizi Oujaâboub	11,43	0,10	11,58	46,32	55,82	0,21	2,23

$H_d^*$  : hauteur dominante à 22 ans pour Chellata et à 25 ans pour Tizi Oujaâboub.

Dans le reboisement du col de Chellata (Tab.3.5), la dispersion affichée par le coefficient de variation est très élevée aussi bien pour la hauteur totale que pour la circonférence, ce qui démontre l'hétérogénéité des mesures. Ceci est dû au comportement individuel différent des arbres en réponse à des conditions de milieu homogènes.

A 22 ans, la circonférence atteint 24.66cm et la hauteur moyenne 4.13m ce qui fait un accroissement annuel en hauteur dominante de l'ordre de 22.86cm/an. Cette plantation affiche des performances très modestes puisque l'accroissement est inférieur à celui mesuré dans les conditions les plus défavorables à Chréa (24.57cm/an) et dans le reboisement du col de Tirourda proche géographiquement (26.57cm/an). Elle est quand même légèrement plus productive par rapport au Belezma (11.88cm/an). Donc, en termes de fertilité et à cet âge, cette zone est rangée dans la dernière classe de fertilité. Malgré son jeune âge où la croissance est supposée rapide, les accroissements annuels en hauteur dominante et en circonférence sont faibles par rapport à toutes les plantations étudiées. Les conditions de reprise des plants (citées ci-dessus) en seraient la cause puisque le taux de réussite apparent dans cette plantation est dérisoire.

A Tizi Oujaâboub où le cèdre trouve les meilleures conditions édapho-topographiques, même si la plantation est hyperdense (1960 tiges/ha), les accroissements annuels en hauteur dominante et en circonférence sont appréciables. L'accroissement en grosseur est légèrement inférieur à celui du col de Tirourda. L'accroissement en hauteur dominante est exceptionnel dans ce reboisement (46,32cm/an), il est comparable aux peuplements de cèdre les plus productifs (Mont Ventoux, 46,28cm/an et Bretagne, 49,41cm/an). Donc, tenant en compte ce paramètre, la productivité du cèdre à Tizi Oujaâboub est supérieure à toutes les cédraies présentées dans ce travail, y compris celle du Rif marocain.

### **3.2. Les reboisements de l'Atlas blidéen**

#### **3.2.1. Description succincte du Parc National de Chréa**

Le Parc National de Chréa est localisé à 50 km au sud-ouest d'Alger, il s'étend sur 26587 ha le long des parties centrales de l'Atlas tellien où il chevauche les départements de Blida, Médéa et Ain Defla (Fig.3.3). Il domine vers le nord la plaine de la Mitidja, les collines de Sahel, les monts de Chenoua et la mer méditerranée. Vers le sud, la vue s'étale sur le plateau de Médéa, l'anticlinal de Takiount et les telwegs des oueds Meurdja et Mektaâ. Vers l'ouest, les reliefs montagneux de la terminaison orientale de l'Ouarsenis, et enfin vers l'est, les hauteurs de la chaîne du Djurdjura (Abdou et Oukhaf, 2002). Le Parc National entoure le village de Chréa et s'étend sur une longueur de 39,5 km environ d'est en ouest et sur une largeur de 7 à 14 km.

En ce qui concerne le substrat géologique, la partie de l'Atlas blidéen sur laquelle s'étend le Parc National de Chréa est homogène et constituée de schiste du crétacé supérieur et d'éboulis de pente de même origine (Halimi, 1980). Les sols sont constitués de schiste marneux en alternance avec des plaquettes de quartzite (Boudani, 1989). Sur les pentes fortes,

les sols sont dominés par des éléments grossiers, tels que les cailloux et les graviers. Les argiles et les limons sont présents en faibles proportions. Dans les poches de ravins, les sols sont très pauvres en phosphore, en calcaire et en chlore (Halimi, 1980).

Du point de vue relief, le PNC englobe le djebel Gueroumene, le djebel Ferroukha et le djebel Mouzaia à Tamesguida. Il se répartit sur les versants nord et sud de l'Atlas blidéen, qui est une région montagneuse dont les points culminants sont : le Koudiat de Chréa (1500m), le Djebel Mouzaia (1600m) et le pic de Sidi Abdelkader à 1629m (Chekchak, 1985). Le massif forestier se présente comme une barrière d'aspect mouvementé à fortes pentes. L'allure générale du relief de l'Atlas blidéen forme une limite entre les influences maritimes du nord et les influences continentales du sud, influençant ainsi le climat régnant dans cette région.

Quant au climat et au bioclimat (station de Médéa, 1030m d'altitude), Belabbas (2007) note qu'au cours de la période hivernale, les températures varient de 4,62 à 5°C. Pour la période estivale, les moyennes des températures sont comprises entre 20,54°C et 24,1°C. Les précipitations annuelles varient entre 600 et 800 mm. Le cumul peut dépasser exceptionnellement 1000mm, par exemple en 2003, comme il survienne aussi des années très sèches (322,8mm en l'an 2000). Le régime saisonnier est de type HPAE. Le diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussen montre que la période sèche s'étale de la mi-mai à la mi-septembre. La zone se confie dans le bioclimat sub-humide à hivers tempérés.

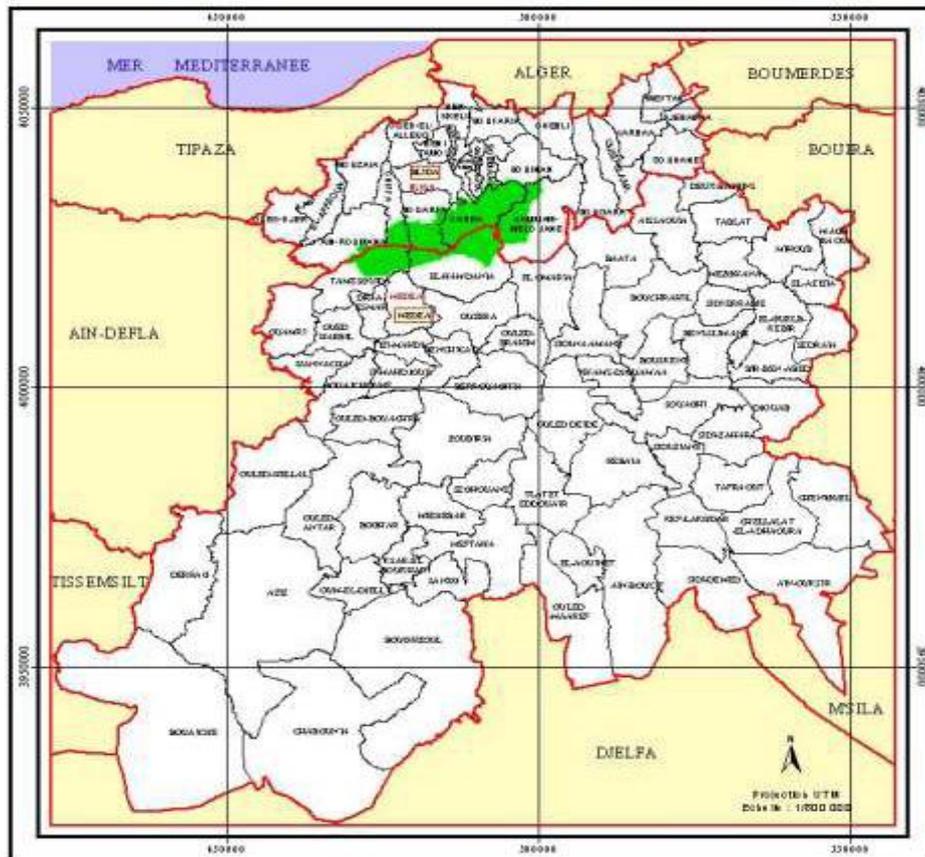


Fig. 3.3 : Situation géographique du Parc National de Chréa (DGF, 2006).

### 3.2.2. Description, croissance et productivité

Le territoire du Parc National de Chréa renferme plusieurs plantations de cèdre de différents âges. Il existe quelques reliques d'un reboisement ancien datant de 1890 qui ne pourra pas faire l'objet d'une étude dendrométrique puisque l'effectif restant est faible. L'étude comparative a concerné quatre reboisements réalisés en 1935, 1958, 1970 et 1998 dans la localité de "El Hawdh" et sur la route menant vers "Ghellay" (Annexe 2, G, H, I, J). Le tableau 3.6 présente la description détaillée de chaque plantation. Les résultats des mesures et des traitements sont récapitulés dans le tableau 3.7.

Tableau 3.6: Description des reboisements de Chréa.

Reboisements (âge)	Coor. Géo.	Altitude (m)	Exposition	pen- te	Densité (tiges/ha)	Végétation, sol et observations
1998 (15 ans)	N 36°27'006" E 2°54'255"	1459	Sud-est	15%	1600	Cèdre+chêne vert Routage et travail du sol Sur ligne de crête
1970 (43 ans)	N 36°27'336" E 2°55'242"	1475	nord	11%	1050	Sol profond, réalisé dans une cuvette (probable stagnation d'eau). Sous- bois absent.
1958 (55 ans)	N 36°27'537" E 2°55'823"	1400	Sud-est	10%	1250	Sous bois inexistant.
1935 (78 ans)	N 36°27'798" E 2°56'410"	1466	sud	15%	900	Absence de chêne vert. Paillage à l'aide de branchage et de feuillage de chêne vert au moment de la plantation.

Tableau 3.7 : Comparaison de la croissance et de la production des cédraies de l'Atlas blidéen.

Plantations	Hauteur (m)				Circonférence (cm)		
	$\bar{X}$	CV	Hd	Ac.H	$\bar{X}$	CV	Ac.C
1998 (15ans)	4.93	0.21	5.95	39.66	28.51	0.31	1.90
1970 (43ans)	12.85	0.15	13.04	30.32	68.41	0.25	1.59
1958 (55ans)	16.27	0.13	15.98	29.05	89.12	0.19	1.62
1935 (78ans)	20.78	0.14	22.70	29.10	91.32	0.26	1.17

En comparaison avec l'étude sur la productivité de cèdre de l'Atlas à Chréa (Nadjahi, 1987) et en calculant la hauteur dominante atteinte pour chaque âge, il apparaît que les trois reboisements de 1998, 1970 et 1935 font partie de la deuxième classe de fertilité, par contre celui de 1935 appartient à la première classe de fertilité. Ces résultats et autres observations sur terrain mènent à affirmer un éventuel effet positif du sous-bois constitué essentiellement de chêne vert sur la reprise des plants, donc, dans la réussite des reboisements et même dans la croissance future des arbres. En effet, au cours de la réalisation du reboisement de 1935, les

plants ont été recouverts par des branchages de chêne vert issus du débroussaillage qui a précédé la préparation de la plantation. Cette opération vise la protection des jeunes plants contre les vents chauds qui risquent de les dessécher, en plus, la décomposition de ce paillage améliore les conditions de nutrition des plants et protège le sol contre les pluies agressives. Cet effet positif est souligné aussi au Maroc par Dubé (2007). Dans la même optique, Courbet et *al.* (2012) pensent qu'un abri latéral permet de protéger les jeunes plantations des vents chauds, par exemple des abris en genêt. L'absence actuelle de cèpée de chêne vert dans la plantation de 1935 est due à la fermeture du peuplement qui a éliminé pratiquement tout le sous-bois. Cette plantation est caractérisée par sa faible densité (900tiges/ha), prenant en compte la densité de plantation pratiquée anciennement et qui est de 2000plants/ha, la densité actuelle serait le résultat de l'effet d'une sélection naturelle accrue ou de pratiques sylvicoles réalisées déjà à l'époque coloniale et même après l'Indépendance.

Le tableau 3.7 montre que les accroissements annuels en hauteur dominante et en circonférence apparaissent diminuer avec le vieillissement des plantations, de soit, les jeunes reboisements sont plus productifs que les vieux. Prenant en compte la cinétique de la croissance en hauteur et en diamètre des arbres, ce calcul se retrouve biaisé du fait que l'accroissement (rythme de croissance) diminue avec l'âge. Evidemment, pour le cas de la futaie adulte de 1935 (âgé de 78 ans), la diminution de l'accroissement qui survient en se rapprochant de l'âge d'exploitabilité du cèdre provoque, par un effet arithmétique, une diminution de l'accroissement moyen. Il serait donc plus pertinent d'estimer les accroissements annuels pour chaque tranche d'âge déterminée par les âges des reboisements étudiés (comme le montre le Tab. 3.8).

Tableau 3.8 : Estimation des Ac.H et Ac.C par tranche d'âge.

Tranche d'âge	Ac.H (m/an)	Ac.C (cm/an)
0-15	0,39	1,9
15-43	0,25	1,42
43-55	0,24	1,32
55-78	0,22	0,09

Il en ressort du tableau 3.8, qu'à la période juvénile, les accroissements annuels en hauteur dominante et en circonférence sont maximaux ; respectivement de 39,66 cm/an et de 1,90cm/an. Après une légère baisse de l'accroissement en  $H_{dom}$  pour la période allant de 15 à 43 ans, il affiche une relative stabilité où il varie de 22,27 à 25,19 cm/an. Quant à l'accroissement annuel en circonférence, à part une baisse brutale pour la tranche d'âge comprise entre 55 et 78 ans (de 1,72 à 0,09 cm/an), la diminution semble être régulière. A ce stade d'analyse et avec seulement quatre paliers d'âge représentant les reboisements étudiés, la cinétique de l'évolution des deux accroissements ne peut pas être établie avec précision et l'hypothèse selon laquelle l'accroissement en hauteur se stabilise et atteint le stade stationnaire plus vite que celui en diamètre, ne pourra pas être vérifiée.

Toutefois, supposant que l'accroissement est constant sur une période courte (8ans) et considérant seulement les résultats relatifs à la plantation de 1970, les potentialités de

production (Ac.H et Ac.C) peuvent être comparées à celles du reboisement du col de Tirourda (Djurdjura orientale). La comparaison montre que l'accroissement en  $H_{dom}$  à Chréa est proche de celui de la deuxième classe de fertilité au col de Tirourda (35,71cm/an), la première classe est un peu plus supérieure (41,42 cm/an). Par contre, l'accroissement en circonférence est nettement plus faible à Chréa. Mais, globalement, pour des peuplements âgés entre 30 et 40 ans, la productivité du cèdre à Chréa et au Djurdjura est pratiquement identique.

### 3.3. Dendroécologie des reboisements de cèdre de l'Atlas

Les résultats des analyses dendrochronologiques des carottes et rondelles prélevées dans les reboisements du Djurdjura et de Chréa sont présentés dans le tableau 3.9.

Tableau 3.9: Résultats des paramètres dendrochronologiques.

Régions	Reboisements	N	LMC	CV	SM	CI	LCmin	LCmax
Djurdjura	Tirourda	19	3.44	0.23	0.13	0.54	3.63	7.34
	Chellata	20	4.90	0.57	0.19	0.50	0.9	8.73
	Tizi Oujaâb.	29	5.58	0.21	0.16	0.42	3.83	7.41
Chréa	1935	53	2.45	0.52	0.13	0.65	1.65	5.12
	1958	36	3.28	0.31	0.22	0.50	0.72	5.52
	1970	30	4.76	0.28	0.13	0.60	2.6	8.5

*N* : nombre de cernes ; *LMC* : largeur moyenne du cerne (mm) ; *CV* : coef. de variation ; *SM* : sensibilité moyenne ; *CI* : coef. d'interdatation ; *LC min et max* : largeurs minimale et maximale du cerne (mm).

#### 3.3.1. Les plantations du Djurdjura

Pour la plantation du col de Tirourda, nous n'avons pas observé de synchronisme entre les douze séries chronologiques réparties par zone (Fig. 3.4), puisque la juxtaposition des douze chronologies sur une même figure n'a pas permis de visualiser les années synchrones. Bien qu'il soit observable pour certaines années, le chevauchement interannuel caractérise la majorité des parcelles. Le coefficient d'interdatation calculé confirme ce constat (CI=0,54). Ce résultat semble interpréter que la largeur des cernes est dépendante des facteurs du milieu propres à la parcelle ; chacune d'entre elle module l'action des divers facteurs en fonction de ses exigences annuelles. L'épaisseur du cerne varie de 3,63 à 7,34mm, elle est en moyenne de 3,44mm. A titre d'exemple, la parcelle 5 de Laâzayeb marquée par la présence d'une hydromorphie et une faible pente et la parcelle 2 à forte pente et sol rocailleux n'enregistrent pas le même signal.

Le calcul de la sensibilité moyenne montre que, globalement, les arbres sondés sont faiblement sensibles aux variations interannuelles avec une SM égale à 0,13, inférieure à la norme méditerranéenne qui est de 0,21 (Serre, 1973). Cette valeur faible de la sensibilité caractérise une croissance radiale de type complacente, signifiant que les variations annuelles de l'épaisseur des cernes sont régulières. Ces interprétations sont confortées par une valeur pas trop élevée du coefficient de variation (CV=0,23).

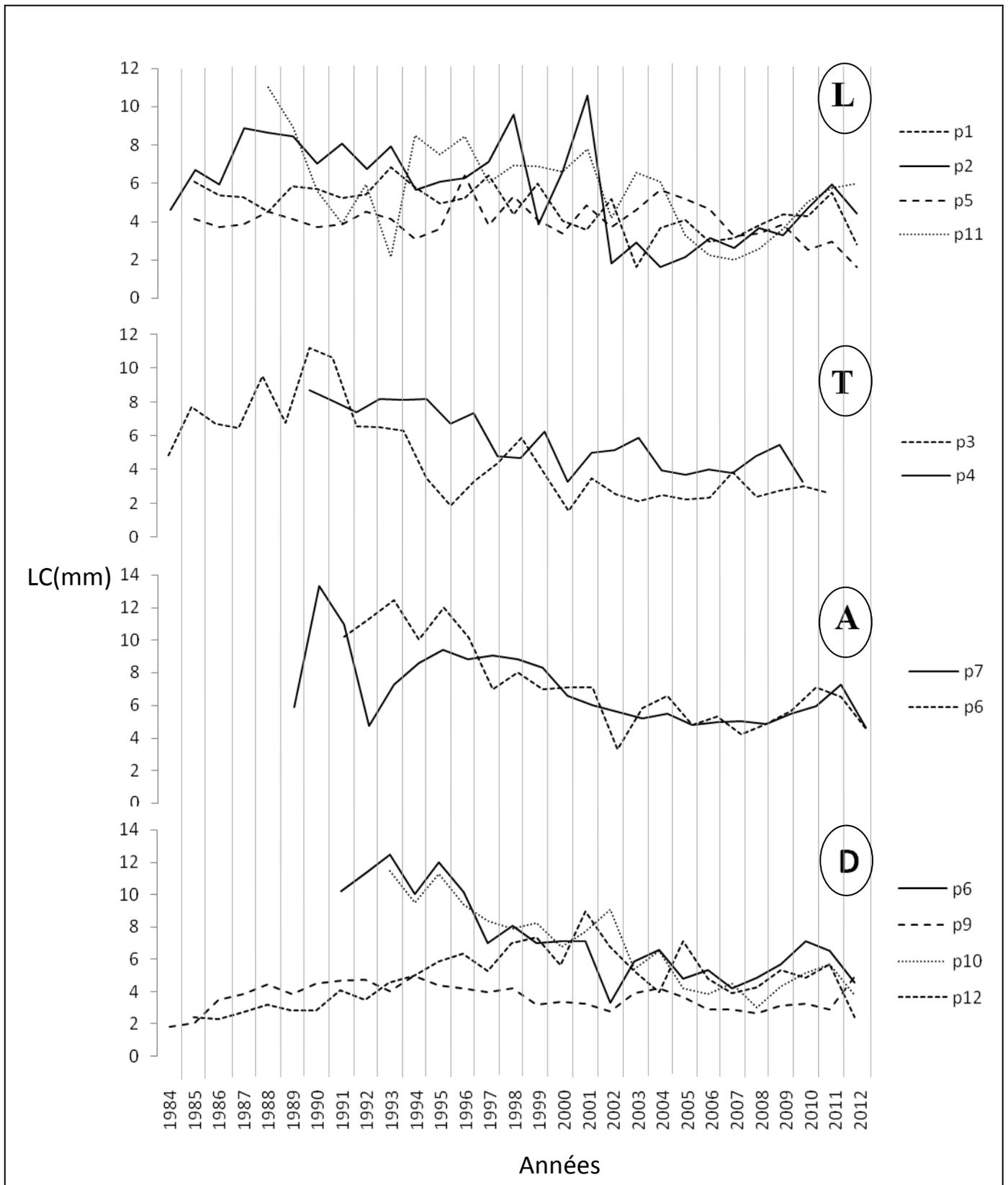


Fig. 3.4: Chronologies de synthèse de la croissance radiale des douze parcelles de Tirourda.  
*L :Laazayeb, T :Tiliwa; A :Almiwene; D :Diverses ; p6 :Tamizeft, p9 :Tala n Tkhabit, p10 :Agni n Laâker, p12 :Tizi n Tirourda.*

Quant aux plantations du col de Chellata et de Tizi Oujaâboub, elles montrent un mauvais synchronisme (les coefficients d'interdatation sont respectivement 0,50 et 0,42), les sensibilités sont faibles mais plus élevées que Tirourda (0,19 et 0,16). L'épaisseur moyenne du cerne de Tizi Oujaâboub est la plus élevée (5,58mm). En concordance avec ce résultat, la figure 3.5 montre que cette plantation est la plus productive malgré qu'elle soit en difficulté de croissance (croissance radiale faible) pendant les premières années. A partir de 2003, la plantation de Tizi Oujaâboub marque une augmentation très notable de l'accroissement annuel où il passe de 3,2mm à 6,8mm. Le rythme de croissance radiale des trois plantations du Djurdjura n'affiche pas de synchronisme.

La croissance des trois plantations ne présente pas la même tendance. Les phases de croissance juvénile sont inférieures à la moyenne ce qui dénote une légère difficulté de reprise des plants après plantation. Vu que les reboisements sont encore jeunes, les profils des largeurs des cernes ne suivent pas la tendance à la diminution de leur croissance avec l'âge. Quant aux courbes de croissance cumulée en fonction de l'âge des reboisements (Fig.3.6), bien que le rythme de croissance des trois plantations soit similaire au début, elles bifurquent dès l'âge de 10 ans ; Tizi Oujaâboub apparaît la plus productive.

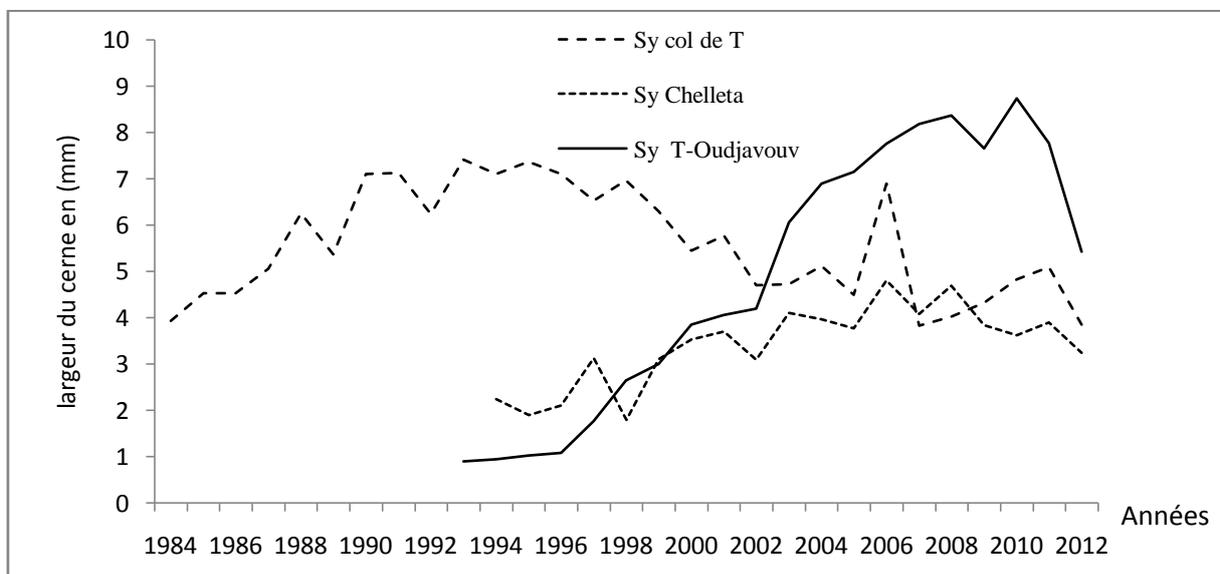


Fig.3.5 : Chronologies de synthèse des plantations du Djurdjura.

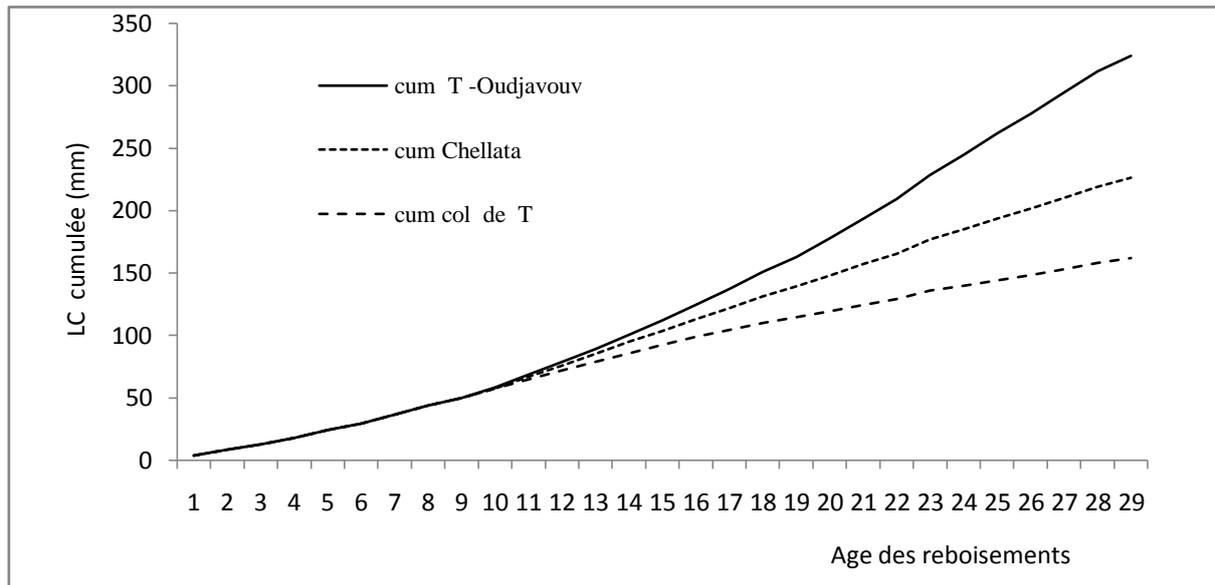


Fig.3.6 : Courbes de croissance cumulée des plantations du Djurdjura.

### 3.3.2. Les plantations de Chréa

La plantation de 1998 est exclue de cette analyse car sa chronologie est très courte (9ans). Donc la croissance radiale de trois reboisements de différent âge (réalisés en 1935, 1958 et 1970) a été étudiée. Les résultats montrent qu'elle fluctue d'une année à une autre où une absence de synchronisme est observée et appuyée par des coefficients d'interdatation faibles (0,65-0,50-0,60). La tendance globale de la croissance affichée par les chronologies est plus ou moins similaire entre ces reboisements et sur lesquels nous observons une légère diminution de la largeur du cerne avec l'âge. Sur les courbes courantes de la croissance (Fig.3.7), la plantation de 1970 apparaît la plus productive suivie de celle de 1958. La comparaison des largeurs moyennes des cernes met en évidence la forte productivité de la plantation de 1970. Celle-ci profite d'un environnement édapho-topographique très favorable (pente faible et sol profond). Les largeurs moyennes des cernes des plantations de 1935 et de 1958 sont plus faibles, respectivement de 2,45 et de 3,28mm. Quant à la sensibilité moyenne, les trois plantations fournissent des valeurs plus faibles (0,17-0,13-0,13), donc elles se situent sur des stations dites complacentes signifiant que les variations annuelles de l'épaisseur du cerne sont peu sensibles aux fluctuations climatiques.

Pour les courbes des accroissements cumulés, les profils ne semblent pas suivre la tendance théorique en forme sigmoïde des arbres adultes (Fig.3.8). En accord avec les courbes d'accroissements courants, l'observation des trois courbes cumulées confirme la productivité élevée de la plantation de 1970. Il apparaît de la comparaison des périodes de croissance communes qu'un parallélisme parfait les caractérise ; il explique que les facteurs du milieu agissent de la même façon sur la croissance radiale mais cette influence est modulée par le comportement propre à chaque arbre.

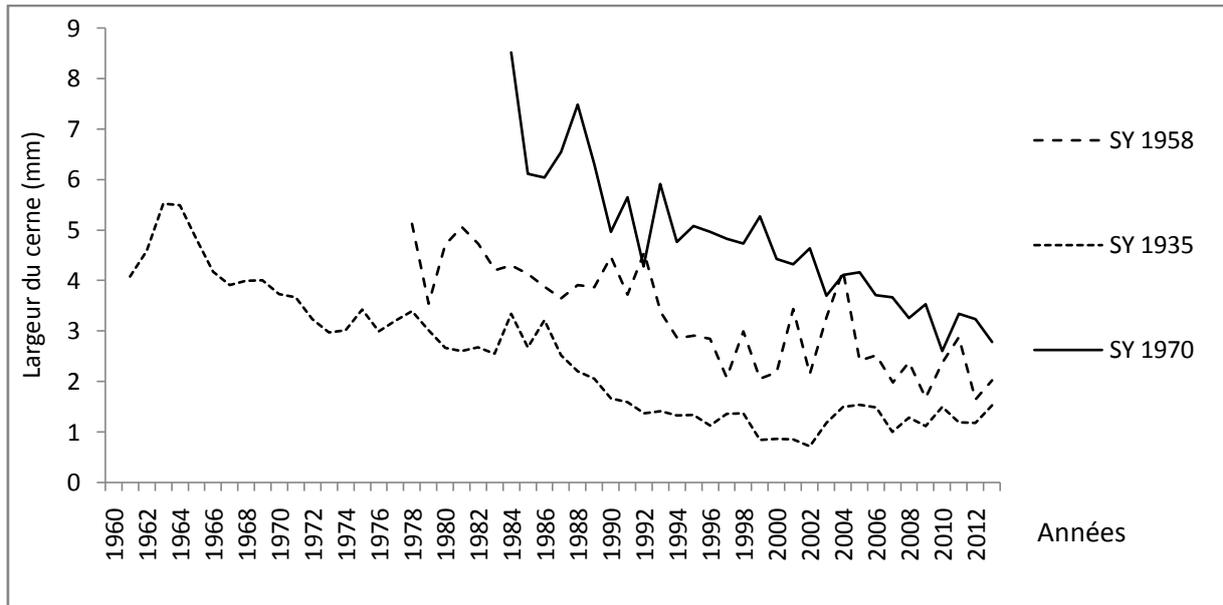


Fig.3.7 : Chronologies de synthèse des plantations de Chréa.

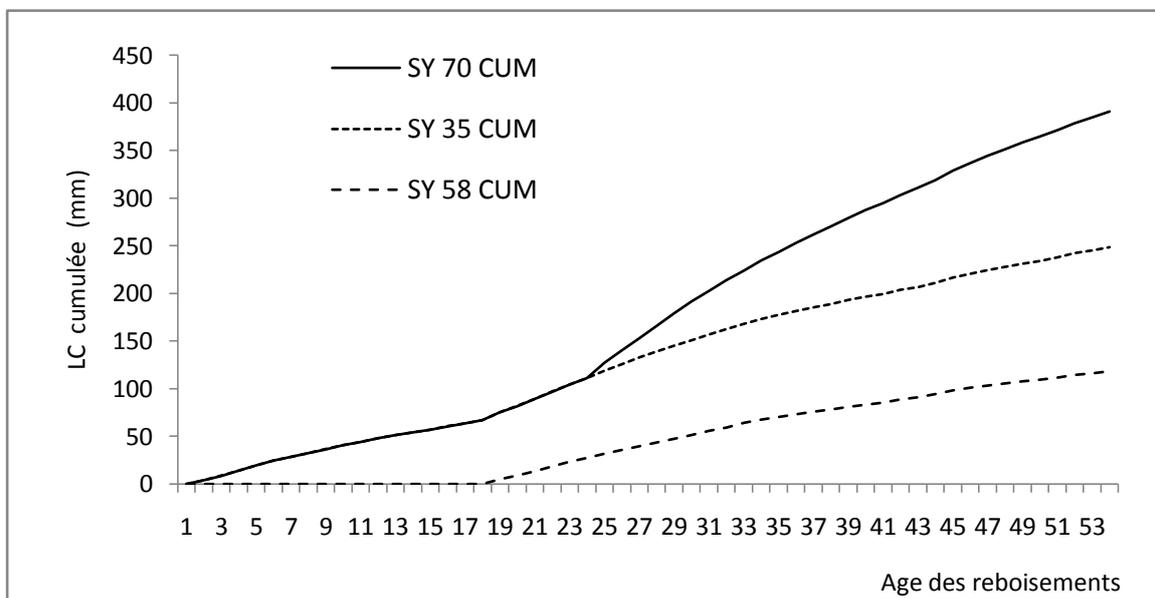


Fig.3.8 : Courbes de croissance cumulée des plantations de Chréa.

### 3.3.3. Analyse comparative (Chréa et Djurdjura)

En récapitulatif, l'établissement de deux chronologies de synthèse pour la croissance radiale des reboisements de cèdre au Djurdjura et à Chréa permet d'éliminer toutes tendances liées aux facteurs stationnels pour ne garder que l'effet régional. La figure 3.9 montre l'absence de synchronisme entre les deux séries. Bien que celle de Chréa soit plus longue, il apparaît qu'à partir des années 1980, la croissance radiale du Djurdjura présente des amplitudes de largeur de cerne plus importantes, donc la plus productive en termes

d'accroissements cumulés (Fig.3.10). Cette forte productivité se caractérise par une largeur du cerne de 4,63mm pour le Djurdjura et 3,61mm pour Chréa.

Par comparaison à quelques cédraies méditerranéennes adultes, les largeurs moyennes des cernes (LMC) des reboisements étudiés sont plus larges par rapport aux Belezma, Theniet El Had et Djurdjura (Loukkas, 2001 ; Messaoudène *et al.*, 2004 ; Sarmoum, 2008), du Mont-Ventoux, France (Guibal, 1984), du Maroc (Till, 1986), des arboretums d'Amance et du Domaine des Barres (France) (Niederlender et Badeau, 2010) et les données fournies par Kherchouche *et al.* (2013) pour la seule cédraie de Tougguert (Belezma). Nous pouvons donc penser que la dynamique de la croissance radiale diminue avec l'âge. Cette diminution peut s'observer dès l'âge moyen de 30 ans dans le cas où le forestier n'opère pas des actions de sylviculture dans le peuplement.

Kadi-Bennane (2003) a comparé la croissance radiale de trois régions proches géographiquement du Djurdjura et de Chréa (Akkfadou, Benchicao et Meurdja). Il en résulte que la croissance moyenne annuelle du cerne est très variable d'une région à une autre. Elle varie de 2,34 à 3,92 mm pour l'Akkfadou, de 2,43 à 6,99mm à Meurdja et de 1,54 à 3,15mm à Benchicao. Il apparaît que le cèdre est plus productif dans l'arboretum de Meurdja.

L'examen des sensibilités moyennes (SM) montre que la croissance radiale des deux régions d'étude est complacente avec une  $SM=0.11$ , alors que celle des arbres adultes de cèdre du Djurdjura et de Chréa est sensitive avec des sensibilités moyennes supérieures à 0.30 (Tafer *et al.*, non publié). Cette forte variation au cours de la dernière décennie semble traduire des différences d'origine climatique tout en le considérant comme seule variable aléatoire, surtout que pendant cette période aucune activité humaine n'est signalée.

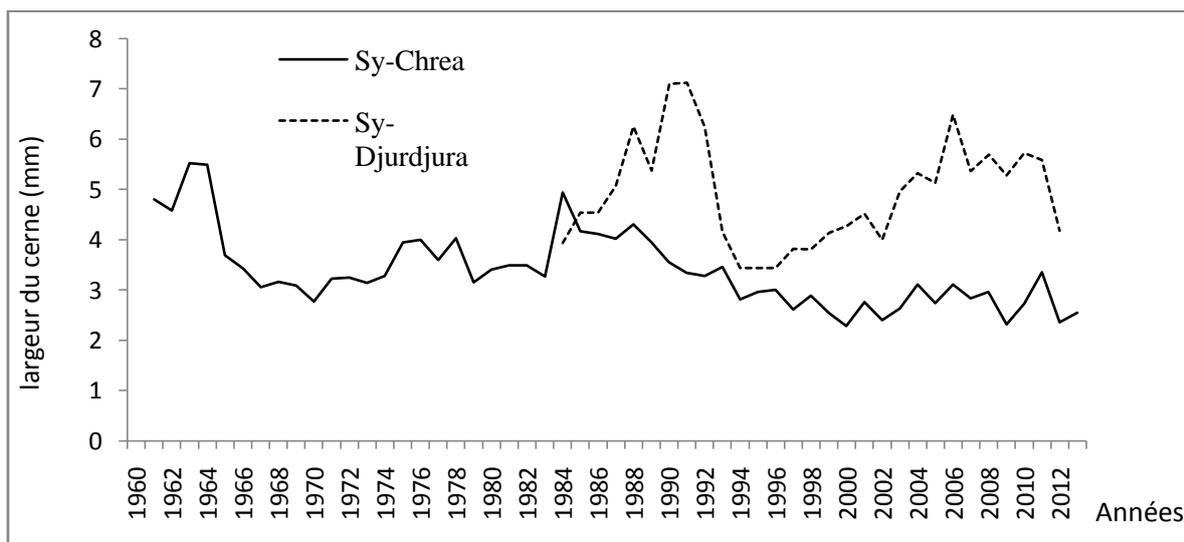


Fig.3.9 : Chronologies de synthèse de Djurdjura et de Chréa.

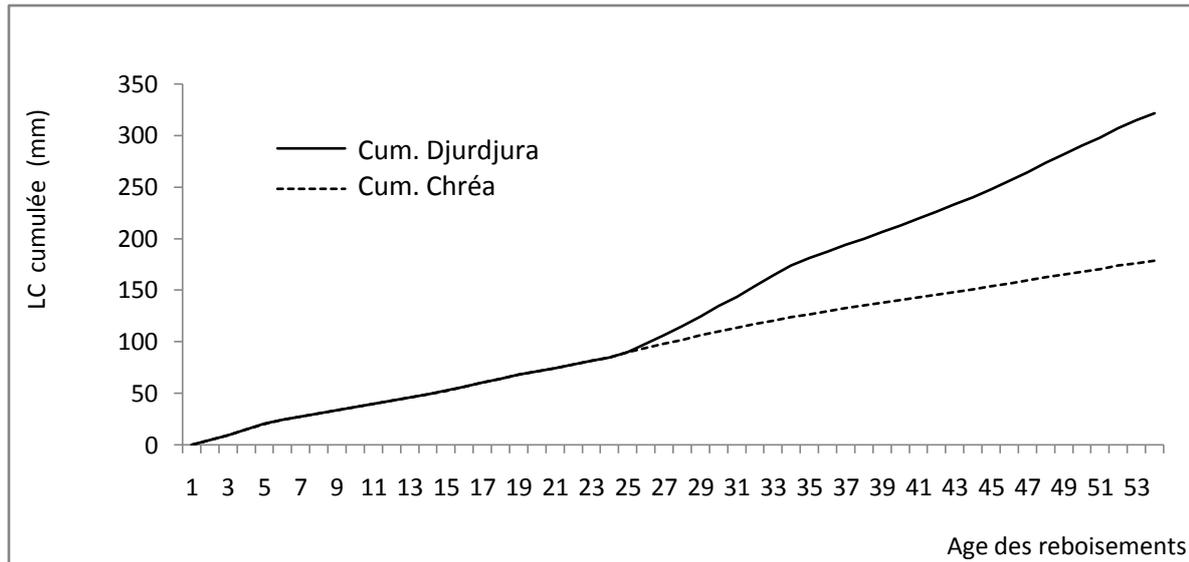


Fig.3.10 : Courbes de croissance cumulée de Chréa et Djurdjura.

## Conclusion

Ce travail a consisté à comparer la croissance et la productivité de sept plantations de cèdre de l'Atlas d'âge différent, réparties sur le Djurdjura et l'Atlas blidéen. Dans l'ensemble, les performances de production du cèdre dans ces deux régions sont très proches, donc, en réponse à des conditions édapho-climatiques favorables (forte pluviométrie et sols siliceux profonds), les résultats convergent vers un même comportement du cèdre. De même, la productivité estimée dans ces deux régions du Tell algérien est comparable à celle du Rif marocain, mais, en dehors de son aire naturelle, notamment en Bretagne et en Provence françaises, le cèdre apparaît plus productif.

Bien que le manque de données sur la provenance des graines et la qualité des plants d'une part, et d'autre part, sur les techniques de plantation et les soins post-installations, ne permettent pas de se prononcer sur les causes d'échec et de pouvoir faire un bilan exhaustif sur les reboisements de cèdre, les résultats obtenus ont montré l'efficacité des actions antiérosives visant l'amélioration du comportement hydrique des sols sur forte pente (les terrasses et les banquettes). Quant à la pression anthropique, le broutage et le brûlage du sous-bois et de la strate herbacée qui surviennent surtout au cours des premiers stades s'avèrent très nuisibles aussi bien sur la reprise des plants (taux d'échec important) que sur la croissance future des arbres. Ce constat est parfaitement vérifié pour la plantation du col de Chellata. Cependant, dans le Parc National de Chréa, les résultats ont pu démontrer l'effet positif des cépées de chêne vert sur la protection des jeunes plantations et dans l'amélioration de la fertilité des sols par une meilleure décomposition de la litière et l'obtention d'un humus de qualité.

L'intégration de la composante "cerne" dans l'étude du comportement des reboisements de cèdre a montré l'efficacité des conditions édapho-climatiques et topographiques dans lesquelles les arbres évoluent en tant que descripteur de la croissance radiale. Il est souligné la productivité élevée des plantations du Djurdjura par rapport à Chréa ainsi que l'effet prépondérant de l'âge sur le ralentissement de la croissance.

Enfin, le comportement et la croissance de ces peuplements réguliers seront traités dans les chapitres suivants où il sera question de l'étude de leurs structures (chapitre 4) et de la modélisation de la croissance en hauteur et en diamètre, qui sera présentée dans le chapitre 7.

# Chapitre IV

## Modélisation de la structure

### Introduction

La structure d'un peuplement est définie comme étant la manière avec laquelle sont agencées les variables dendrométriques d'un peuplement (Stewart et Roustide, 1974). Elle 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 une loi de forme unimodale, alors que dans un peuplement irrégulier, la distribution des tiges est représentée par une courbe exponentielle en J-inversé (Pardé 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. Le paramètre pris en considération dans cette partie est la circonférence, donc, il sera question d'étudier la distribution des effectifs par classes de grosseur.

Une distribution des fréquences est définie par le regroupement de toutes les tiges recensables dans un peuplement par catégories de grosseur. Elle présente un grand intérêt en matière de gestion forestière car elle exprime la structure du peuplement. Elle traduit aussi la réaction de celle-ci aux conditions de croissance et aux opérations sylvicoles pratiquées. Dans un peuplement équienné, les grosseurs présentent une grande variabilité d'où la nécessité de les regrouper en classes d'égales étendues s'apparentant à une courbe de distribution. Selon Rondeux (1993), la recherche de modèle mathématique s'ajustant à la distribution du nombre de bois par catégories de diamètre relève de plusieurs types de préoccupations :

- La construction et l'utilisation d'outils de gestion telles que des tables de production ou des modèles de croissance par classes de grosseur ;
- L'étude de la structure du peuplement ;
- L'estimation de la quantité de matériel ligneux par assortiments (type de produit) ou par catégorie de grosseur ;
- La simulation des normes de traitement sylvicole.

De nombreuses distributions théoriques ont été utilisées pour modéliser la structure des peuplements forestiers. Plusieurs travaux visant la comparaison de la précision de plusieurs lois de probabilité dans le but d'obtenir la meilleure adéquation de la structure avec la loi théorique. A ce titre, il convient de citer l'utilisation des déciles de Jedlinski et la loi Log-normale (Dagnelie et Rondeux, 1971) et du système de Pearson pour les distributions unimodales (Sghaier et palm, 2002 ; Fonton et Sagbo, 2004 ; Sghaier et Ammari, 2012).

La recherche de l'optimisation de la précision des estimateurs des paramètres de chaque distribution a conduit à l'utilisation de plusieurs méthodes. Une méthode basée sur la régression non linéaire est développée par Abd Kudus (1999). Liu *et al.* (2004), pour leur part, ont comparé l'efficacité de trois méthodes : a) la méthode de Maximum de Vraisemblance ; b) méthode des Moments et c) méthode des Percentiles. Une méthode de régression linéaire est aussi utilisée et comparée avec celle des percentiles par Hudak et Tiryakioglu (2009). La pertinence de ces méthodes sera discutée dans les paragraphes présentés ci-dessous.

La comparaison de la précision de la loi de Weibull avec la loi normale (Lejeune, 1994), avec celle de Béta (Maltamo *et al.*, 1995) et avec le système de Johnson (Zhoo et Mc Tague, 1996 et Zhang *et al.*, 2003) a montré que parmi toutes les lois précédemment citées, c'est la distribution de Weibull qui enregistre une plus grande fidélité à la répartition des tiges avec un minimum d'erreur, ensuite la loi normale dont l'adéquation est aussi appréciable.

La distribution de Weibull, sensiblement plus complexe que celle normale - classiquement utilisée, se caractérise par une grande souplesse d'emploi. Pour d'une part, sa grande flexibilité et l'existence d'une forme explicite de sa fonction de répartition et d'autre part, sa capacité à décrire une large gamme de distributions uni-modales, y compris la forme de fréquence en J-inversé, elle est assez couramment utilisée dans la littérature forestière spécialisée (Bailey et Dell, 1973; Gorgozo *et al.*, 2007 ; Lei, 2008).

L'objectif de cette partie est d'établir des modèles de répartition des tiges par catégories de circonférence en utilisant plusieurs distributions théoriques des probabilités et d'évaluer l'efficacité des différentes méthodes d'estimation de leurs paramètres respectifs. Il sera aussi question d'étudier l'effet de la fertilité de la station, de la densité des peuplements et de l'âge sur l'agencement de la structure et le paramétrage de chaque modèle.

Ces méthodes seront appliquées, d'une part, sur les reboisements de cèdre de l'Atlas réalisés au Djurdjura et dans l'Atlas blidéen (à titre comparatif) pour construire un modèle

adapté à la structure régulière de ces plantations et, d'autre part, sur les peuplements naturels de Tikjda pour proposer des modèles pour les structure d'allure jardinée.

#### 4.1. La distribution de Weibull

##### 4.1.1. Historique et définition

Au cours de la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle, la distribution de Weibull a attiré l'attention des statisticiens travaillant dans divers domaines de la statistique appliquée. Avec les distributions normales, exponentielle,  $\text{Khi}^2$ , Student et Fisher, celle de Weibull est, sans aucun doute, le modèle le plus populaire des statistiques modernes (Rinne, 2009). Elle est intéressante de par sa capacité à s'adapter aux données de divers champs (biologique, climatique, financier et économique).

Le développement de cette loi de probabilité a commencé depuis les années 20<sup>s</sup> jusqu'à sa présentation devant la communauté scientifique par Wallodi WEIBULL (1887-1979). Cet ingénieur suédois avait publié en 1939 deux rapports sur la durabilité des matériaux dans les séries éditées par "The Royal Swedish Institute for Engineering Research". Ensuite, la fonction de distribution est introduite dans "A Statistical Theory of the Strength Material", basée sur des observations expérimentales obtenues à partir des tests de tension, de la flexion et de la torsion, les paramètres ont été estimés à l'aide de graphiques. Après la fin de la deuxième guerre mondiale, Weibull a expliqué ses travaux par le biais de plusieurs publications, notamment en 1949, 1951, 1952, 1959, 1961.

En finalité, il était impressionnant de découvrir que l'attribution du nom de l'auteur aux différents travaux est sujette à un débat scientifique et même historique. On peut citer à ce titre le cas de la distribution normale appelée arbitrairement "distribution de Gausse". Ce sujet n'échappe pas à cette règle, en effet, ce qui est connu maintenant comme la distribution de Weibull a pris naissance au cours de la période 1922-1943. Le déroulement des événements est relativement compliqué parce que il y eu trois équipes qui travaillent indépendamment avec différents objectifs formant ainsi une chaîne de trois liens, Wallodi Weibull en était le dernier. La distribution a pris son nom parce qu'il a réussi à lui conférer un caractère interdisciplinaire (Rinne, 2009).

La formule de la fonction de densité de la distribution de Weibull est la suivante :

$$f(x) = \frac{c}{b} \left( \frac{x-a}{b} \right)^{c-1} \cdot e^{-\left( \frac{x-a}{b} \right)^c}$$

Quant à sa fonction de répartition, utile en matière de modélisation de la production des peuplements et d'estimation du nombre de tiges compris entre deux limites de diamètre, elle s'écrit :

$$F(x) = 1 - e^{-\left( \frac{x-a}{b} \right)^c}$$

Une fois la distribution est paramétrée, l'effectif estimé d'une classe de diamètre  $[d_1, d_2]$  est calculé par l'intégrale suivante :

$$\int_{d_1}^{d_2} \frac{c}{b} \left( \frac{x-a}{b} \right)^{c-1} \cdot e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c} dx = \left[ 1 - e^{-\left(\frac{d_2-a}{b}\right)^c} \right] - \left[ 1 - e^{-\left(\frac{d_1-a}{b}\right)^c} \right]$$

#### 4.1.2. Paramètres de la loi de Weibull

Selon les objectifs de chaque étude, cette distribution peut être décrite à l'aide de deux ou trois paramètres, l'application forestière a souvent fait appel aux trois paramètres a, b et c :

Le paramètre "a" est défini sur  $\mathbb{R}$  ( $-\infty < a < +\infty$ ), il est mesuré dans la même unité que la variable aléatoire. Pour le sens physique, ce paramètre traduit le temps de garantie ou la durée de vie maximum (relatif à l'étude des durées de vie des matériaux et des processus) où il doit être positif ( $a \in [0, +\infty[$ ). Il est souvent appelé l'origine. Du point de vue statistique, il est appelé paramètre de localisation. Supposant les autres paramètres constants, sa variation donne un mouvement parallèle des courbes de densité au dessus de l'axe des abscisses. L'augmentation ou la réduction de sa valeur produit un décalage à droite ou à gauche. En foresterie, il est considéré comme la plus petite valeur possible du diamètre dans le peuplement, il sera donc compris entre zéro et le minimum observé. Lei (2008) a montré qu'il prend souvent la valeur de la moitié du diamètre minimal mesuré ( $0,5 * D_{\min}$ ).

Le paramètre d'échelle "b" : il est valide sur  $\mathbb{R}^+$  et tient l'unité de mesure de la variable aléatoire. La variation du paramètre altère la densité de probabilité dans le sens des ordonnées. L'augmentation de l'échelle induit une compression de la probabilité, par contre la réduction cause un étirement.

Le paramètre de forme "c" : il est valide sur  $\mathbb{R}^+$  et il n'accepte aucune dimension. Il détermine l'aspect de la courbe de densité, celle-ci étant à dissymétrie gauche ou droite selon que "c" est supérieur ou inférieur à 3,6. La distribution de Weibull peut prendre de nombreuses formes selon la valeur du paramètre "c" :

$C \leq 1$ : courbe en J inversé.

$C=1$ : courbe exponentielle.

$C > 1$  : l'effet de la part polynomiale de la densité devient prononcé et la courbe apparaîtra unimodale asymétrique.

$1 < C < 3,36$  : courbe en cloche à dissymétrie gauche.

$C = 3,6$  : approximation de la courbe de Gausse (loi normale).

$C > 3,36$  : courbe en cloche à dissymétrie droite.

Les autres paramètres de forme souvent utilisés pour percevoir la forme de la courbe sont le coefficient d'asymétrie (skewness) et le kurtosis. Plusieurs formules sont proposées pour leur calcul mais l'approche par les percentiles s'avère la plus simple.

$$\text{Skewness} : B_0 = \frac{(x_{0,75} - x_{0,5}) - (x_{0,5} - x_{0,25})}{(x_{0,75} - x_{0,25})}, B_0 \in [0, +\infty]$$

Le kurtosis (L) est mesuré sur la base des percentiles orientés, il résulte du produit de mesure de queue de la distribution (T) :

$$T = \frac{(x_{0,975})(x_{0,025})}{(x_{0,875})(x_{0,125})}$$

et de la mesure du facteur d'irrégularité (P) :

$$P = \frac{(x_{0,875})(x_{0,125})}{(x_{0,75})(x_{0,25})}$$

$$\text{Le kurtosis (L)} = T * P = \frac{(x_{0,975}) - (x_{0,025})}{(x_{0,75}) - (x_{0,25})}$$

Lorsque la valeur aléatoire est normalement distribuée, le kurtosis prend la valeur de 2,9058, cette dernière est atteinte par une distribution de Weibull pour un paramètre de forme égale à 6,85. De ce fait, les deux distributions sont sensiblement égales pour "c" ∈ [3,25, 3,61] (Rinne, 2009).

#### 4.1.3. Méthodes et procédures d'ajustement (*fitting methods*)

Il est important que différentes méthodes d'estimation seront comparées pour ajuster les paramètres de la fonction de densité de la distribution choisie (dans notre cas celle de Weibull), car les procédures d'estimation par itération donnent souvent des résultats légèrement différents selon l'estimateur et le programme de calcul utilisé. Plusieurs méthodes d'estimation sont employées (Liu, 2009): basée sur les percentiles, sur le maximum de vraisemblance, basée sur les moments, les moindres carrés, la régression non linéaire, le paramétrage prédictif, la méthode hybride "moment-percentile" et la régression de la fonction de distribution cumulative.

Pour ce travail, nous avons choisi de tester seulement les trois premières méthodes.

##### a. Méthode basée sur les percentiles de la distribution

La notion de quantile d'ordre  $p$  (où  $0 < p < 1$ ) généralise la médiane. Formellement, un quantile est donné par l'inverse de la fonction de répartition :

$$x_p = F^{-1}(p)$$

Si la fonction de répartition est continue et strictement croissante, la définition du quantile serait sans équivoque. La fonction de répartition est cependant discontinue et "par palier". Quand la fonction de répartition est par palier, il existe au moins neuf manières

différentes de définir les quantiles selon que l'on fasse ou non une interpolation de la fonction de répartition. Nous présentons une de ces méthodes, donc les valeurs des quantiles diffèrent légèrement d'un logiciel statistique à un autre.

Soit  $x$  une variable aléatoire d'effectif  $n$  et  $x_p$  le quantile d'ordre  $p$  :

$$\text{Si } np \text{ est entier : } x_p = \frac{1}{2}(x_{np} + x_{np+1}) ;$$

$$\text{Si } np \text{ n'est pas entier : } x_p = x_{[np]} \text{ où } [np] \text{ est le nombre entier supérieur ou égal à } np.$$

Les valeurs sont obtenues par les équations suivantes:

$$a = \frac{n^{1/3} \cdot p_0 - p_{0.5}}{n^{1/3} - 1}$$

$$\ln b = \frac{\ln p_r - \frac{\ln p_t \cdot \ln(-\ln(1-r))}{\ln(-\ln(1-t))}}{1 - \frac{\ln(-\ln(1-r))}{\ln(-\ln(1-t))}}$$

$$c = \frac{\ln \left[ \frac{\ln(1-r)}{\ln(1-t)} \right]}{\ln \left( \frac{p_r}{p_t} \right)}$$

$P_r$  et  $P_t$  sont des percentiles d'ordre  $r$  et  $t$ . Pour leurs valeurs respectives, nous avons repris celles utilisées par Rinne (2009) où  $r = 0,97366$  et  $t = 0,16731$ .

## b. Méthode de Maximum de Vraisemblance

C'est une méthode théorique d'estimation des paramètres. On considère  $n$  valeurs observées  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  d'un échantillon de  $n$  variables aléatoires indépendantes et de même loi, la loi dépend d'un paramètre  $\theta$ . On définit alors une fonction  $L(\theta ; x_1, x_2, \dots, x_n)$  qui est, pour la valeur  $\theta$  du paramètre, la probabilité de la loi jointe de l'échantillon  $(X_1, X_2, \dots, X_n)$  dans le cas discret, ou sa densité jointe dans le cas continu. Considérée comme fonction de  $\theta$  seul, cette fonction s'appelle la « log-vraisemblance ». Dans son principe, la méthode du maximum de vraisemblance consiste à choisir, comme estimation de  $\theta$ , la valeur qui maximise la vraisemblance  $L(\theta ; x_1, x_2, \dots, x_n)$ , la valeur pour laquelle les observations effectuées avaient « le plus de chance » de se produire. Cette justification empirique est confirmée par des théorèmes de mathématique et cette méthode générale fournit des estimateurs qui sont très souvent les meilleurs (Baudot, 2012).

La vraisemblance (*Likelihood*) mesure donc l'adéquation entre la distribution observée sur un échantillon aléatoire et une loi de probabilité supposée décrire la réalité sur la population dont l'échantillon est issu. Le principe est de définir en premier lieu la fonction de vraisemblance de la fonction de densité de la distribution de Weibull, ensuite estimer les

paramètres pour lesquels la fonction de vraisemblance est maximale. Une dérivée partielle nulle étant un moyen éprouvé pour trouver un extremum. La fonction de vraisemblance de la distribution de Weibull est la suivante :

$$\ln L(a, b, c) = n(\ln c - c \cdot \ln b) + (c - 1) \sum_{i=1}^n \ln(x_i - a) - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - a}{b}\right)^c$$

Ce qui implique :

$$b = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - a)^c \right]^{\frac{1}{c}}$$

$$\begin{cases} \frac{c-1}{c} \sum_{i=1}^n (x_i - a)^{-1} - n \cdot \frac{\sum (x_i - a)^{c-1}}{\sum (x_i - a)^c} = 0 \\ \frac{1}{c} + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i - a) - \frac{\sum (x_i - a)^c \ln(x_i - a)}{\sum (x_i - a)^c} = 0 \end{cases}$$

Ces deux équations seront résolues par itération pour estimer "a" et "c", ensuite utilisées pour estimer b.

### c. Méthode des moments

Les moments sont des indicateurs numériques associés à une variable aléatoire réelle qui fournissent de nombreux renseignements sur sa distribution. L'espérance mathématique et la variance sont des moments particuliers. En calcul des probabilités, les moments sont reliés à la fonction caractéristique, et en statistique, ils sont notamment utilisés pour définir des indicateurs de dispersion et de forme (Baudot, 2012).

Un moment d'ordre  $n$  est l'espérance d'une variable aléatoire à la puissance  $n$ . C'est pourquoi l'espérance est appelée moment d'ordre 1 et la variance est le moment d'ordre 2. Le moment d'ordre  $k$  de la distribution de Weibull est calculé à partir de la fonction de densité dont l'expression est la suivante :

$$m_k = \left(\frac{1}{b}\right)^{k/c} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{k}{c}\right) \text{ où } \Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$

$m_k$  est le moment d'ordre  $k$  et  $\Gamma(x)$  est la fonction gamma.

$$m_1 = \mu = \left(\frac{1}{b}\right)^{1/c} \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right); \hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

$$m_2 = \mu^2 + \sigma^2 = \left(\frac{1}{b}\right)^{2/c} \cdot \left[ \Gamma\left(1 + \frac{2}{c}\right) - \left[ \Gamma\left(1 + \frac{1}{c}\right) \right]^2 \right]; \hat{m}_2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$$

$m_1$  et  $m_2$  sont respectivement les moyennes arithmétique et quadratique de l'échantillon.

$$\frac{\sigma^2}{\mu^2} = \frac{\Gamma(1 + \frac{2}{c}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{c})}{\Gamma^2(1 + \frac{1}{c})}$$

$$\sigma^2 = \frac{[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i]^2}{\Gamma^2(1 + \frac{1}{c})} \cdot [\Gamma(1 + \frac{2}{c}) - \Gamma^2(1 + \frac{1}{c})]$$

$$b = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i}{\Gamma(1 + \frac{1}{c})}$$

$$a = 1/2 \cdot p_0$$

#### 4.1.4. Qualité et pertinence des estimations

Il est important de pouvoir apprécier si la distribution théorique que l'on utilise donne une bonne représentation de la distribution des tiges d'un peuplement. Le test de conformité peut être utilisé à différents stades de la construction du modèle de répartition. Au moment de l'estimation des paramètres, il est nécessaire de tester la concordance entre les distributions théorique et observée. On aura ainsi une idée de l'aptitude de la famille de distribution choisie à représenter le type de peuplement concerné par le modèle, on cherche alors à déterminer si le jeu de données suit cette loi de probabilité.

L'utilisation des tests de conformité classiquement employés en statistique (tests de "Goodness-of-fit") pose certains problèmes. Les tables de valeurs critiques relatives au test de Kolmogorov-Smirnov (K-S) ne prévoient pas le cas de distribution telle que Weibull où trois paramètres doivent être estimés. Le test K-S recherche la plus grande distance entre les fonctions de répartition empiriques cumulées. Ce test n'est toutefois valable que pour des données continues, et son utilisation avec des données discrètes n'est possible qu'avec une version modifiée (Lafond, 2010). Bien que le test K-S souffre quelques faiblesses d'emploi, il a montré une efficacité notable dans la comparaison de six méthodes d'ajustement entreprise par Liu et *al.* (2009) puisqu'il est en parfaite concordance avec un indice d'erreur mis en œuvre pour la circonstance.

Le test de  $\text{Khi}^2$  de Pearson compare les effectifs prédits et observés pour chaque classe de diamètre. Il a l'avantage d'être bien adapté aux données discrètes mais il est sensible à la définition des classes, qui a une forte influence sur le résultat du test. Cependant, son utilisation impose souvent de regrouper certaines classes extrêmes en cas d'effectifs insuffisants (Dagnelie, 1973). De même, le test de  $\text{Khi}^2$  a l'inconvénient de tester l'égalité entre distributions, ce qui est peut être trop strict dans le cas de l'évaluation de modèles (Lafond, 2010), il serait donc plus pratique d'utiliser la valeur de  $\text{Khi}^2$  comme mesure de la distance entre distributions.

Nous avons finalement appuyé les comparaisons par l'utilisation d'un indice mis en œuvre par Reynolds et *al.* (1988), simplifié par Zhang (2003) et Liu et *al.* (2009), qui correspond à la sommation des différences absolues entre les effectifs prédits et observés au sein des classes de grosseur définies pour chaque distribution. Contrairement au test de  $\chi^2$  de Pearson, cet indice d'erreur (EI) s'intéresse aux différences absolues, ce qui évite les compensations entre classes. La formule d'application est la suivante, où  $P_i$  et  $E_i$  sont respectivement les effectifs prédit et observé :

$$EI = \sum_{i=1}^n |P_i - E_i|$$

## 4.2. Etablissement d'un modèle global de structure régulière

### 4.2.1. Description du matériel expérimental

De par l'étendue importante des mesures de circonférence ainsi que la consistance de l'échantillon qui a touché les conditions de croissance les plus extrêmes, nous avons opté pour l'utilisation de la distribution de Weibull puisque celle normale et autres formes unimodales n'ont pas montré une bonne adéquation. Une difficulté d'ajustement est rencontrée en utilisant des classes de circonférence à intervalle de 5 et même de 10 cm ce qui nous a conduit à choisir un intervalle de 2 cm, celui-ci est, certes, rarement applicable sur terrain puisque l'intervalle est considéré trop petit mais en termes de précision il est le mieux recommandé.

Il est évident que l'ajustement d'une distribution de probabilité nécessite une grande quantité de mesure. En tout, 605 individus répartis sur 18 placettes de deux ares ont été inventoriés. Le tableau 4.1 reprend les principales caractéristiques dendrométriques des peuplements échantillonnés. Ces placettes ont été implantées de façon stratifiée pour inclure toutes les conditions de plantation d'un reboisement de cèdre de l'Atlas âgé de 34 ans. Le reboisement est situé dans le col de Tirourda à 1752 m d'altitude à l'extrême est de la chaîne montagneuse du Djurdjura.

Tableau 4.1 : Principales caractéristiques dendrométriques des placettes d'échantillonnage.

<b>Variables</b>	<b>Moy.</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>C.V. (%)</b>
<b>Nombre de tiges / ha</b>	1669	964	2247	18
<b>Diamètre (cm)</b>	22.59	6.5	39.8	23
<b>Hauteur (m)</b>	11.51	4.4	18	12

### 4.2.2. Estimation des paramètres

Les résultats de l'estimation des paramètres des deux distributions testées (normale et Weibull) ainsi que les critères d'appréciation de la qualité des ajustements suivant les trois estimateurs sont récapitulés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Paramétrage des distributions - normale et Weibull, et qualité d'ajustement.

	$\bar{X}$	$\sigma$	a	b	c	IE	p.Kh <sup>2</sup>	KS	C <sub>M3</sub> C-IE (%)
<b>Distr. Normale</b>	22.590	5.258	-	-	-	17.193	0.091	0.028	11-7-15 (48.56%)
<b>Distr. Weibull</b>									
MMV	-	-	3.250	24.641	4.792	15.619	0.134	0.037	9-16-15 (34.46%)
MM	-	-	3.250	24.628	4.917	14.279	0.128	0.039	16-13-12 (41.76%)
MP	-	-	3.250	24.280	5.171	49.883	0.001	0.04	13-8-9 (40.21)

$\bar{X}$  : Moyenne arithmétique ;  $\sigma$  : écart-type ; a : paramètre de localisation ; b : paramètre d'échelle ; c : paramètre de forme ; IE : indice d'erreur de Reynolds ; p.Kh<sup>2</sup> : p-value du test de Kh<sup>2</sup> ; KS : test de Kolmogorov et Smirnov ; C<sub>M3</sub>C-IE : les trois classes de contribution maximale à l'indice d'erreur ; MMV : méthodes de maximum de vraisemblance ; MM : méthode des moments ; MP : méthode des percentiles.

Le modèle final de répartition de tiges pour l'estimation des effectifs d'une classe de diamètre [d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>] est le suivant :

$$F(x) = \int_{d_1}^{d_2} 0.19 \left( \frac{x - 3.25}{24.64} \right)^{3.79} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x - 3.25}{24.64} \right)^{4.79} \right] dx$$

Comme nous l'avons signalé en méthodologie, seul l'indice d'erreur de Reynolds est retenu pour apprécier la qualité des ajustements, celle-ci est établie à partir des normes définies empiriquement par Lafond (2010). De la figure 4.1, on observe que la distribution de Weibull représente mieux la répartition des classes de diamètre observées, l'approche la plus adaptée est celle basée sur la méthode des moments puisqu'elle génère le plus faible indice d'erreur, non loin de celle du maximum de vraisemblance. La méthode basée sur les percentiles montre un mauvais ajustement (IE>35).

Malgré que la plus part des travaux signalent que les meilleurs ajustements sont obtenus par la méthode de maximum de vraisemblance (Zhang et al., 2003), pour Gorgozo et al. (2007), cette méthode présente une sous-estimation accentuée des fréquences de faible diamètre ce qui diminue considérablement la qualité du modèle obtenu. Quant à la méthode des moments, elle est citée parmi les méthodes d'estimation les plus précises (Lejeune, 1994 ; Lei, 2008 ; Liu et al., 2004 et Liu et al., 2009). La faiblesse de cette méthode est qu'elle trouve des difficultés à modéliser les distributions multimodales. Néanmoins, d'autres procédures beaucoup moins utilisées ont montré des résultats satisfaisants, à titre indicatif, la méthode utilisant la régression non linéaire (Gorgozo et al., 2007).

Contrairement à nos estimations, la méthode des percentiles montre dans quelques cas de bons résultats (Magnussen, 1986). Enfin, ces travaux s'accordent à dire que les estimateurs basés sur la méthode des percentiles et sur la prédiction directe des paramètres sont de moindre précision.

Pour les méthodes montrant la meilleure qualité d'ajustement, le maximum de vraisemblance et les moments, les classes de gros diamètre (>30cm) présentent une difficulté d'adéquation alors que pour la méthode des percentiles et la distribution normale, ce sont plutôt les classes moyennes qui montrent un indice d'erreur élevé (Fig. 4.2).

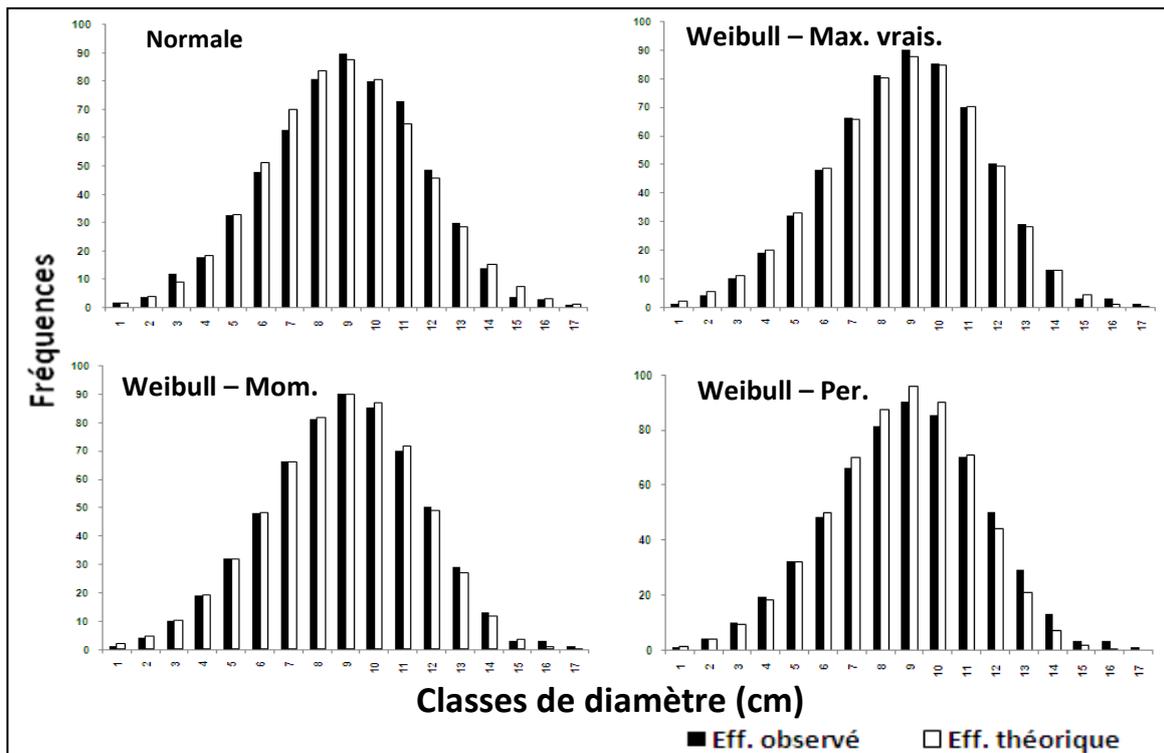


Fig. 4.1 : Comparaison des effectifs théoriques et observés des trois méthodes d'estimation.

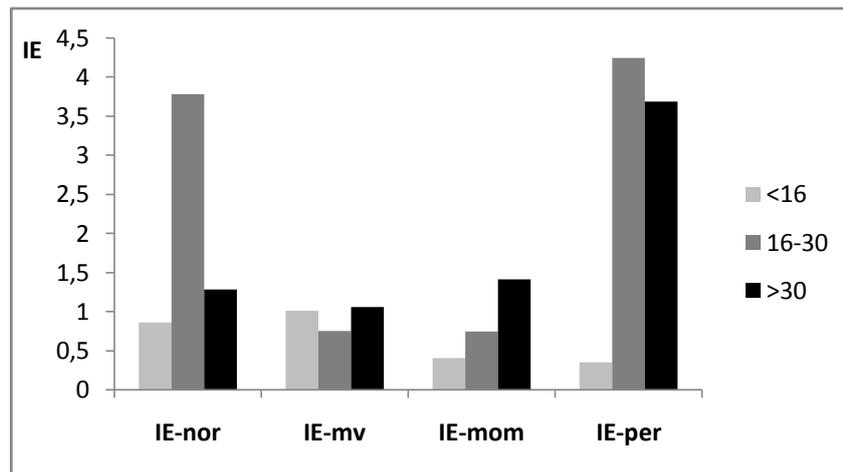


Fig. 4.2 : Contribution respective des classes de diamètre à l'indice d'erreur.

### 4.3. Modèle de structure et fertilité de la station

Sur la base du descriptif stationnel et de la hauteur dominante, le reboisement du col de Tirourda a montré trois zones de fertilité différente (chapitre 3). L'objectif est de voir le changement de la structure sur un peuplement régulier âgé de 34 ans suivant un gradient de fertilité de la station. L'appréciation de la forme de la structure est basée sur le coefficient

d'asymétrie et d'aplatissement. Une procédure de modélisation avec une distribution théorique sera aussi mise en œuvre. Les résultats sont récapitulés dans le tableau 4.3.

Tableau 4.3 : Représentation de la forme et de la description de chaque distribution.

Fertilité	Forme			Description		
	N	$\gamma$	$\beta$	%<40	Mod.	%>90
<b>faible</b>	189	-0.40	0.32	4%	29% [50-60]	2%
<b>Moyenne</b>	253	-0.0053	0.19	2%	28% [70-80]	8%
<b>Bonne</b>	161	0.044	0.11	1%	29% [70-80]	27%

*N : effectif total des arbres ;  $\gamma$  : coef. d'asymétrie ;  $\beta$  : coef. d'aplatissement ; %<40 : fréquence des effectifs inférieurs à 40cm de circonférence ; Mod. : classe modale ; %>90 : fréquence des effectifs supérieurs à 40cm de circonférence.*

Un coefficient d'asymétrie négatif renseigne sur une dissymétrie à gauche (localisation de la queue du côté des faibles diamètres). Dans des conditions stationnelles médiocres, la structure a tendance à se glisser à gauche puisqu'il y aura une présence de plus en plus fréquente de tige de faible diamètre. Cette relation est confortée par les résultats relatifs à la fréquence des tiges inférieures à 40cm de circonférence affichée par le peuplement évoluant sous de mauvaises conditions édapho-topographiques.

Cependant, une structure à dissymétrie droite est signalée pour les peuplements de bonne fertilité, ceci est la conséquence de la présence des classes à gros diamètre (27% des arbres dépassent 90cm de circonférence).

La fertilité de la station influence aussi la position et le poids de la classe modale. D'une part, les peuplements de fertilité moyenne et bonne ne diffèrent pas grandement entre eux dans la mesure où ils montrent la même classe modale [70-80] et presque la même fréquence (respectivement 28% et 29%), la différence réside dans le poids des classes post-modales [80-90] où elles sont respectivement de 16% et 27%, ce qui donne un aperçu clair sur la dominance des classes de gros diamètre. D'autre part, bien que la classe modale observe une tendance centrale pour les trois types de fertilité (Fig.4.3), celle représentant le peuplement de fertilité médiocre est localisée à la classe [50-60].

Quant au coefficient d'aplatissement, les résultats affichés par le tableau 4.3 ne montrent pas de grandes différences puisque le kurtosis varie de 0,11 à 0,32, néanmoins, on peut dire que la structure du peuplement médiocre est plus pointue par rapport à celle du peuplement bien venant. Une structure moins pointue signifie que les classes adjacentes (de part et d'autre de la classe modale) sont relativement plus représentées ce qui mène à l'obtention d'une structure aplatie. Une structure très pointue prédispose le peuplement au déséquilibre en cas d'accidents climatiques ou d'attaques parasitaires, par conséquent, elle est susceptible de perdre la forme unimodale caractéristique des structures régulières. Ces

résultats mènent à conclure que les conditions de croissance défavorables accentuent la fragilité des peuplements.

Après plusieurs essais avec différentes distributions théoriques, la distribution normale de Gauss et le système de distribution unimodale de Pearson s’ajustent difficilement aux répartitions des tiges par classes de circonférence. Le choix est donc porté sur la distribution de Weibull, celle-ci est retenue pour ajuster un modèle de structure. Les résultats de l’estimation des paramètres et les modèles obtenus sont récapitulés dans le tableau 4.4.

Les résultats du test KS et de l’indice d’erreur de Reynolds montrent que les trois modèles obtenus sont acceptables, celui de la fertilité moyenne apparaît moins précis que les autres. Les trois modèles de distribution montrent un comportement différent vis-à-vis des classes, les modèles ajustés pour la bonne et la faible fertilité sont sensibles aux effectifs des deux premières classes de circonférence alors que ce sont les classes centrales qui constituent une difficulté d’ajustement pour le modèle ajusté pour la fertilité moyenne.

Les trois modèles obtenus sont graphiquement représentés dans la figure 4.3.

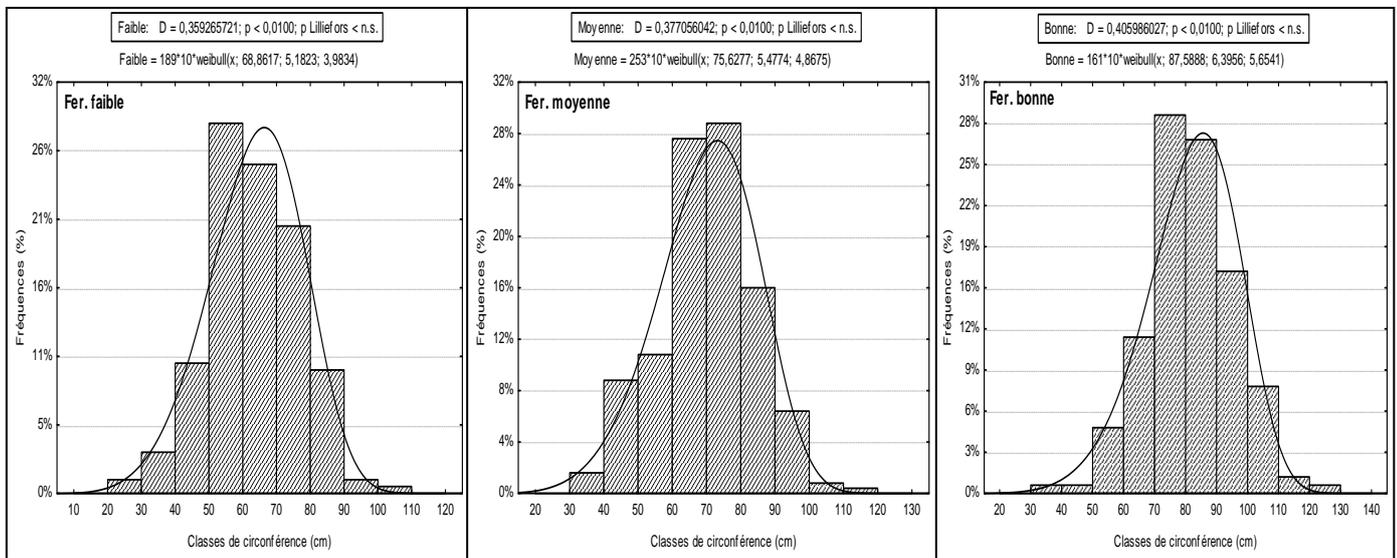


Fig.4.3 : Représentation graphique des structures avec l’ajustement théorique de la loi de Weibull.

Le paramètre d’échelle “b” apparaît suivre le gradient croissant de la fertilité de la station puisque le déplacement à droite des courbes induit une augmentation de la valeur d’échelle de la distribution. Ce paramètre se montre en étroite relation avec la tendance centrale de chaque distribution.

Le caractère unimodale des trois courbes a fait que les paramètres de forme “c” estimés se retrouvent supérieurs à 1 mais le fait qu’ils soient supérieures à 3,6 signifie que les modèles sont à dissymétrie droite.

L'observation des modèles groupés dans la figure 4.4 montre un acheminement de la structure à droite du fait de la présence de plus en plus de gros diamètres dans les stations de bonne fertilité. L'évolution de l'aplatissement ne semble pas suivre un gradient défini par la fertilité.

Tableau 4.4 : Résultats de la modélisation pour les trois types de fertilité.

	Paramètres estimés			Modèles ajustés	Qualité d'ajustement	
	a	b	c		D(KS)	EI
<b>Fer. Faible</b>	3,98	68,86	5,18	$F(x) = \int_{d1}^{d2} 0,074 \left(\frac{x - 3,98}{68,86}\right)^{4,18} \cdot \text{Exp} \left[-\left(\frac{x-3,98}{68,86}\right)^{5,18}\right] dx$	0.36	20.45
<b>Fer. Moy.</b>	4,86	75,62	5,47	$F(x) = \int_{d1}^{d2} 0,072 \left(\frac{x - 4,86}{75,62}\right)^{5,39} \cdot \text{Exp} \left[-\left(\frac{x-4,86}{75,62}\right)^{5,47}\right] dx$	0.37	33.16
<b>Fer. bonne</b>	5,65	87,58	6,39	$F(x) = \int_{d1}^{d2} 0,073 \left(\frac{x - 5,65}{87,58}\right)^{5,39} \cdot \text{Exp} \left[-\left(\frac{x-5,65}{87,58}\right)^{6,39}\right] dx$	0.40	17.81

*D(KS) : distance du test de Kolmogorov et Smirnov ; EI : indice d'erreur de Reynolds ; a, b et c : paramètres de la distribution de Weibull.*

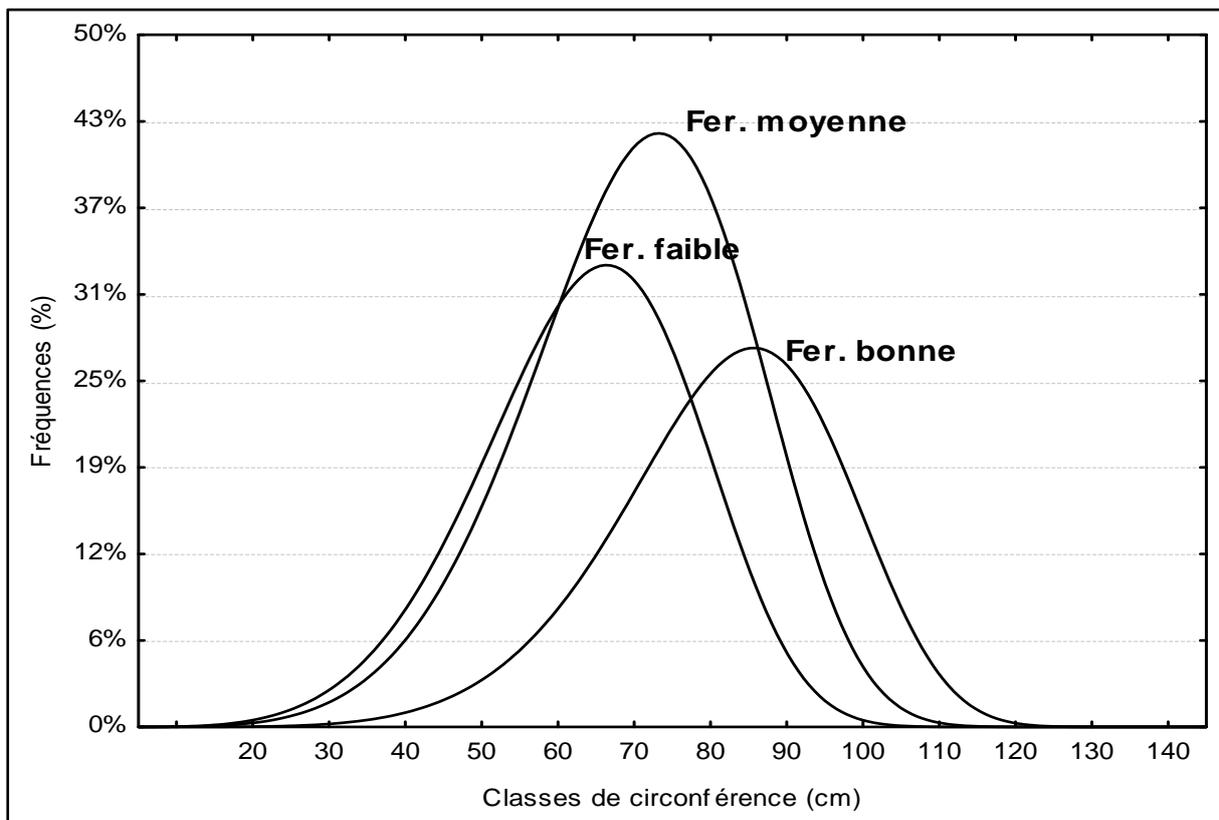


Fig.4.4 : Evolution des trois modèles de structure avec la fertilité.

#### 4.4. Modèle de structure et densité des peuplements

Dans la plantation du col de Tirourda, les stations 11 et 4 représentant les deux extrêmes de densité ont été analysées (respectivement de 964 et 2247 tiges à l'hectare) en vue de montrer un éventuel effet de la densité sur l'agencement des deux structures. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5 : Effet de la densité sur les paramètres descriptifs de chaque structure.

	$\gamma$	$\beta$	Classes modales	Qualité d'ajustement	
				D(KS)	EI
Densité faible	-0,02	0,01	[70-75]	0,39	22,48
Densité élevée	-0,11	0,59	[65-70]	0,40	26,13
	Paramètres estimés			Modèles ajustés	
	a	b	c	Loi de Weibull	
Densité faible	3,47	68,63	5,56	$F(x) = \int_{d_1}^{d_2} 0,081 \left( \frac{x - 3,47}{68,63} \right)^{4,56} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x - 3,47}{68,63} \right)^{5,56} \right] dx$	
Densité élevée	3,92	68,93	6,69	$F(x) = \int_{d_1}^{d_2} 0,097 \left( \frac{x - 3,92}{68,93} \right)^{5,69} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x - 3,92}{68,93} \right)^{6,69} \right] dx$	

L'analyse du tableau 4.5 montre qu'en cas de densité faible, la classe modale est légèrement plus élevée par rapport à une structure caractérisée par une densité élevée. Toutefois, l'observation des deux structures (Fig.4.5) confirme que la classe modale ne semble pas être un bon descripteur de la relation expliquant l'influence de la densité sur la structure.

Pour la station hyperdense, le kurtosis de valeur importante est la conséquence de la fréquence élevée non seulement de la classe modale mais aussi des classes de tendance centrale allant de 55cm à 80cm de circonférence. Les résultats de l'asymétrie montrent que le peuplement est d'autant plus dense que la queue de sa distribution tend à gauche. Ceci est la conséquence des faibles fréquences constatées des petits diamètres. Dans un reboisement (peuplement régulier), les tiges de faible circonférence résultent du ralentissement de la croissance suite à des difficultés survenues au stade juvénile, celles-ci sont le résultat de la qualité médiocre des plants produits en pépinière et le non respect des normes de plantation. Avec l'âge et en situation de forte densité accentuée par une quasi-absence d'opérations sylvicoles, les arbres seront éliminés par le couvert qui leur bloque l'accès à la lumière en outre de la concurrence devenue de plus en plus insupportable pour les sujets dominés.

De la figure 4.5, on voit clairement deux structures différentes du point de vue agencement et représentation de chaque classe mais les deux gardent le caractère unimodale ce qui permet de trouver une adéquation facile avec la loi de Weibull malgré qu'un

rapprochement intéressant avec la loi normale est constaté mais le modèle gaussien issu est de qualité inférieure.

Le paramétrage des deux modèles de structure des deux extrêmes de densité montre une différence insignifiante entre eux. Dans ce cas, les trois paramètres de la distribution de Weibull n'ont pas permis la mise en exergue de l'influence de la densité sur l'agencement de la structure. Les autres paramètres de forme (coefficients d'asymétrie et d'aplatissement) précédemment discutés apportent de plus amples explications sur ce sujet.

Les deux modèles sont présentés graphiquement dans la figure 4.6. Le modèle de répartition ajusté pour la station de densité élevée observe une diminution des effectifs des classes centrales, celle-ci est de l'ordre de 10%. Eu égard de l'influence de la densité sur la croissance en diamètre des arbres, on peut s'attendre à ce que la tendance centrale se déplacera à gauche avec l'élévation de la densité mais la figure 4.6 fait apparaître seulement un léger décalage à droite pour le peuplement de faible densité. Cette comparaison permet de conclure que, dans ce cas, la densité influence beaucoup plus les effectifs de la classe modale, par contre, sa position se trouve insensible à l'influence de la densité.

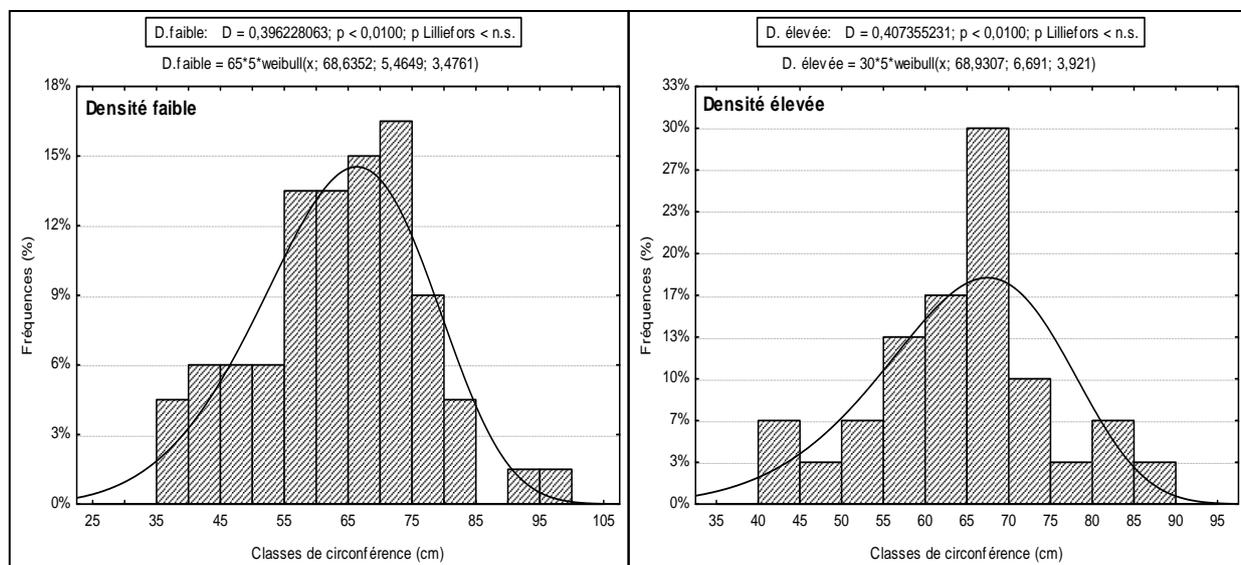


Fig.4.5 : Graphiques des deux structures avec ajustement de la loi de Weibull.

L'absence des queues de distribution pour la densité élevée est le résultat de la faible représentation des tiges de petit et de gros diamètre. Etant dans une structure régulière, les tiges de faible diamètre sont celles formant l'étage dominé, on peut supposer donc que les arbres appartenant à cette catégorie sont éliminés par la concurrence et la fermeture progressive du peuplement. De l'autre côté, un peuplement hyperdense couplé à une absence d'éclaircie n'as pas permis l'obtention d'arbres de gros diamètre.

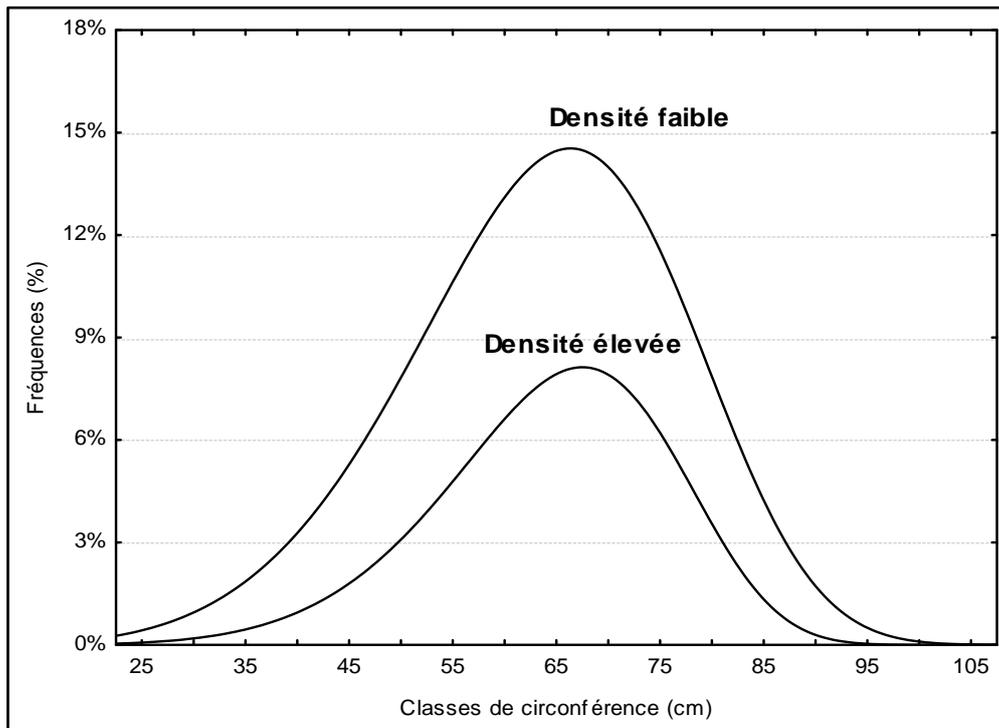


Fig.4.6 : Evolution des deux modèles de structure avec la densité.

#### 4.5. Evolution de la structure avec l'âge

En plus du reboisement du col de Tirourda au Djurdjura, l'étude de la structure s'intéressera aussi à d'autres reboisements inventoriés dans la même zone ainsi que ceux réalisés dans l'Atlas blidéen (Parc National de Chréa) dont les conditions écologiques et sylvicoles (à l'exemple de la densité) ne diffèrent pas grandement. Cet impératif est primordial en vue d'éliminer l'effet station et établir l'évolution de la structure avec l'âge. Il sera question de trois plantations du Djurdjura réalisées en 1978, 1987 et 1990 et de quatre reboisements à Chréa réalisés en 1935, 1958, 1970 et 1998.

##### 4.5.1. Plantations de l'Atlas blidéen (Parc National de Chréa)

Les résultats relatifs à la forme de chaque distribution et la qualité de chaque modèle sont présentés dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 : Forme et modèle de distribution de chaque plantation de l'Atlas blidéen.

	N	$\gamma$	$\beta$	Classes modales	Qualité d'ajustement	
					d(KS)	EI
<b>1998</b>	50	0,18	-0,75	[30-35]	0,30	24,07
<b>1970</b>	54	-0,76	1,17	[60-70]	0,36	20,41
<b>1958</b>	40	0,18	-0,21	[70-90]	0,36	19,13
<b>1935</b>	59	0,09	-0,71	[80-90]	0,31	17,81
	Paramètres estimés			Modèles ajustés		
	a	b	c	Loi de Weibull		
<b>1998</b>	2,67	30,55	3,65	$F(x) = \int_{d_1}^{d_2} 0,119 \left( \frac{x - 2,67}{30,55} \right)^{2,65} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x - 2,67}{30,55} \right)^{3,65} \right] dx$		
<b>1970</b>	3,87	75,46	2,52	$F(x) = \int_{d_1}^{d_2} 0,033 \left( \frac{x - 3,87}{75,46} \right)^{1,52} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x - 3,87}{75,46} \right)^{2,52} \right] dx$		
<b>1958</b>	4,53	95,86	5,47	$F(x) = \int_{d_1}^{d_2} 0,057 \left( \frac{x - 4,53}{95,86} \right)^{4,47} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x - 4,53}{95,86} \right)^{5,47} \right] dx$		
<b>1935</b>	4,05	100,61	4,17	$F(x) = \int_{d_1}^{d_2} 0,041 \left( \frac{x - 4,05}{100,61} \right)^{3,17} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x - 4,05}{100,61} \right)^{4,17} \right] dx$		

Il est évident que la classe modale observe une tendance à droite suivant l'âge de chaque plantation. Néanmoins, pour les reboisements les plus anciens (1958 et 1935) la différence n'apparaît pas aussi importante par rapport à la différence d'âge qui caractérise ces deux peuplements. A travers les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement, les formes des distributions apparaissent faiblement aplaties et presque symétriques. Graphiquement (Fig.4.7), le plus jeune peuplement (1998) montre une distribution relativement déséquilibrée du fait de la fréquence élevée de la classe de circonférence [15-20] et une dominance pas trop flagrante de la classe modale qui peut induire à l'avenir une bimodalité de la distribution.

La structure traduit la réaction du peuplement aux conditions de croissance et aux opérations sylvicoles pratiquées. Donc, un abaissement des effectifs des classes de faible diamètre par un dépressage permettra de ramener cette structure à l'état unimodale caractéristique des peuplements équiennes.

La comparaison des modèles ajustés montre une différence notable entre eux. La valeur du paramètre de forme "c" indique que la structure de la plantation de 1998 accepte aussi un modèle gaussien (loi normale). Il est noté que contrairement aux autres modèles déjà décrits, celui de la plantation de 1970 se caractérise par une asymétrie à droite.

Le paramètre d'échelle "b" augmente avec l'âge mais celui-ci observe un ralentissement pour les deux vieilles plantations.

Même si les tests utilisés (KS et EI) confirment l'acceptation des modèles établis pour la plantation de 1970, l'ajustement graphique (Fig.4.7) montre une mauvaise superposition entre la répartition des fréquences et le tracé de Weibull, celui-ci apparaît trop aplati par rapport à la tendance centrale observée. Ce cas est induit lorsque les classes adjacentes sont fortement représentées alors que la classe modale montre des fréquences moyennes ou faibles (une structure pas suffisamment pointue).

A propos de l'évolution de la structure avec l'âge, Rondeux (1993) note que durant la vie d'un peuplement, l'évolution du nombre de bois par catégories de grosseur donne lieu à un ensemble de courbes dissymétriques, celle-ci étant souvent à gauche pour les jeunes peuplements pour devenir en principe à droite aux âges avancés. Théoriquement et en concordance avec les modèles de structure établis par Sghaier et Ammari (2012) pour les peuplements de pin d'Alep subissant une sylviculture extensive en Tunisie, la structure devient de plus en plus aplatie et dissymétrique à droite avec l'âge. Cependant, la présentation des structures groupées en fonction de l'âge dans la figure 4.8 ne semble pas obéir à cette théorie. La forme des distributions étant largement tributaire de la sylviculture pratiquée, dans le cas de ces plantations et comme conséquence de l'absence d'éclaircie, deux remarques s'imposent :

- La fréquence de la tendance centrale qui reste pratiquement constante au cours de 28 ans (de 1998 à 1970) ;
- Une structure qui n'a pas évolué durant 23 ans (1958 à 1935), avec une fréquence presque constante de la tendance centrale qui a évolué de seulement 2,67 cm de circonférence.

Si des coupes ont été réalisées durant la période juvénile, on peut s'attendre à observer des courbes présentant une dissymétrie à gauche et un aplatissement négatif du fait que les effectifs de la tendance centrale diminuent progressivement en plus du déplacement appréciable de la classe modale à droite (gain en grosseur).

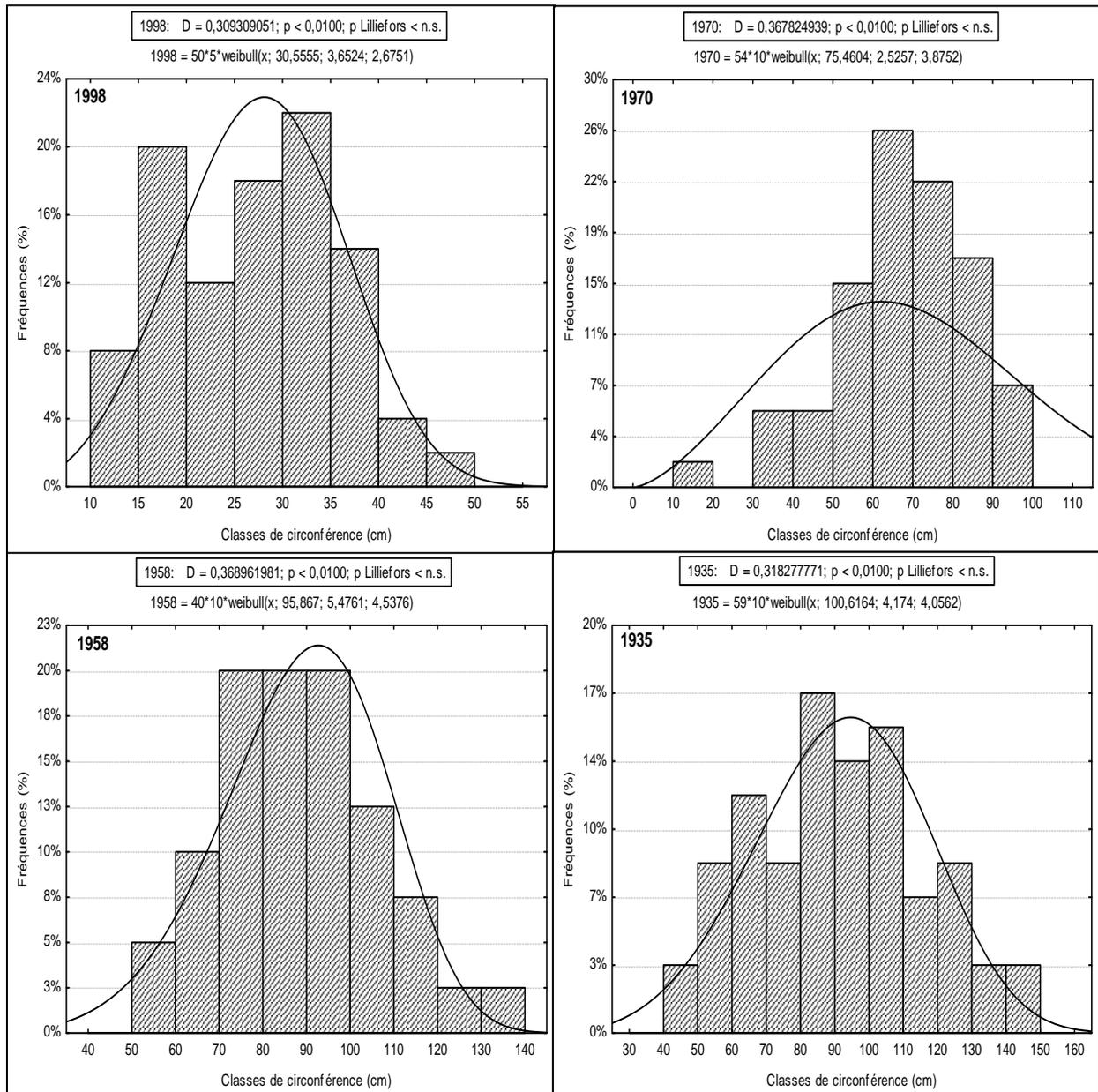


Fig.4.7 : Présentation des structures régulières des plantations de Chréa (1998, 1970, 1958, 1935).

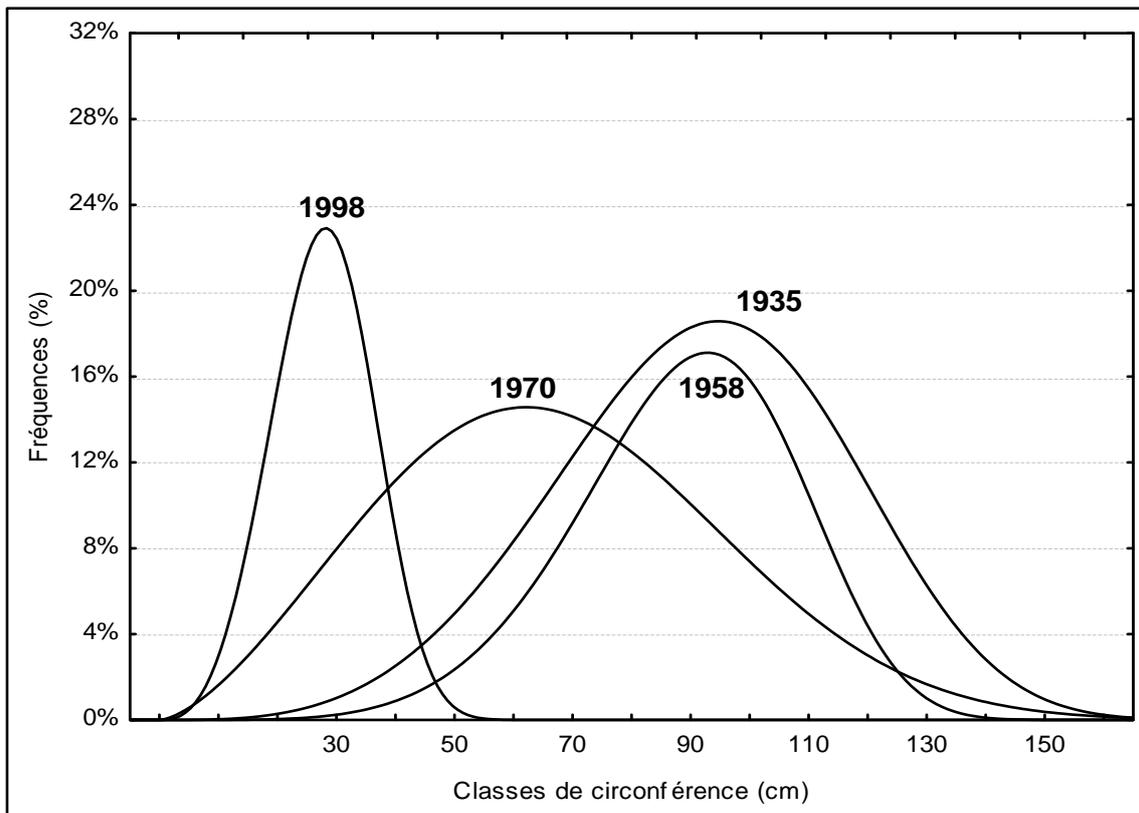


Fig. 4.8 : Présentation des structures groupées de Chréa en fonction de l'âge de chaque plantation.

#### 4.5.2. Plantations du Djurdjura

Des modèles de distribution sont construits pour les reboisements du col de Tirourda (Tir), de Tizi Oujaâboub (TO) et du col de Chellata (Chell), réalisés respectivement en 1978, 1987 et 1990. Les modèles obtenus, leurs paramètres de forme ainsi que les tests de qualité sont présentés dans le tableau 4.7. Les structures graphiques séparées et leur évolution groupée sont présentées respectivement dans les figures 4.9 et 4.10.

En comparaison avec les structures des peuplements qui font l'objet de sylviculture dont plusieurs exemples ont été rapportés par Lanier (1986), nous pouvons affirmer que, globalement, les remarques émises sur les modèles de structure établis pour les plantations de Chréa sont aussi valables pour celles du Djurdjura. Néanmoins, le modèle de "Tir-1978" se discrimine par sa qualité d'ajustement très appréciable. Il sera opportun de le prendre comme référence dans l'établissement d'un modèle unifié pour les peuplements de cèdre où les autres modèles relativement déséquilibrés seront optimisés et "rééquilibrés" sur la base des estimations qui découlent de ce modèle.

Tableau 4.7 : Forme et modèle de distribution de chaque plantation du Djurdjura.

	N	$\gamma$	$\beta$	Classes modales	Qualité d'ajustement	
					d(KS)	EI
<b>Chell-1990</b>	120	-0,59	0,52	[25-30]	0,31	18,93
<b>TO-1987</b>	53	-0,23	0,38	[55-60]	0,38	14,68
<b>Tir-1978</b>	606	0,03	0,06	[70-80]	0,34	5,74
	Paramètres estimés			Modèles ajustés		
	a	b	c	Loi de Weibull		
<b>Chell-1990</b>	3,89	27,69	3,89	$F(x) = \int_{d1}^{d2} 0,140 \left( \frac{x-3,89}{27,69} \right)^{2,89} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x-3,89}{27,69} \right)^{3,89} \right] dx$		
<b>TO-1987</b>	4,02	60,47	5,58	$F(x) = \int_{d1}^{d2} 0,092 \left( \frac{x-4,02}{60,47} \right)^{4,58} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x-4,02}{60,47} \right)^{5,58} \right] dx$		
<b>Tir-1978</b>	4,37	77,30	4,76	$F(x) = \int_{d1}^{d2} 0,060 \left( \frac{x-4,37}{77,30} \right)^{3,76} \cdot \text{Exp} \left[ - \left( \frac{x-4,37}{77,30} \right)^{4,76} \right] dx$		

Du point de vue forme, le modèle "Tir-1978" est presque symétrique et accepte aussi un ajustement avec la loi normale de Gausse. Cependant une légère asymétrie à droite est observée pour les deux autres structures. Le kurtosis élevé constaté pour la plantation "Chell-1990" confirme le caractère pointu des peuplements jeunes décrit dans les structures établies pour les forêts subissant une sylviculture où les effectifs diminuent avec une intensité et une périodicité préalablement fixées. A cet effet, la tendance que devraient suivre les trois structures du Djurdjura impose un aplatissement progressif avec l'âge résultant de la baisse des effectifs des classes centrales, mais le résultat affiché par la figure 4.10 montre que, contrairement à la tendance théorique précédemment décrite, le peuplement le plus âgé (Tir-1978) est plus pointu par rapport à celui plus jeune (TO-1987).

Quant aux paramètres de localisation (a) et de forme (c) de Weibull, ils ne montrent aucun changement notable avec l'âge. Par contre, le paramètre d'échelle (b) qui coïncide avec la position de la classe modale, interprète, avec une précision acceptable, la circonférence moyenne de chaque peuplement. Evidemment, celle-ci évolue positivement avec l'âge mais le rythme d'augmentation constaté entre "Chell-1990" et "TO-1987" est considéré très élevé du fait de la faible différence d'âge qui les sépare (seulement 3 ans). Ceci pourrait être expliqué par les conditions stationnelles difficiles (terrains caillouteux en forte pente, pâturage et brulage saisonniers de la strate herbacée) qui régnaient dans la région du col de Chellata.

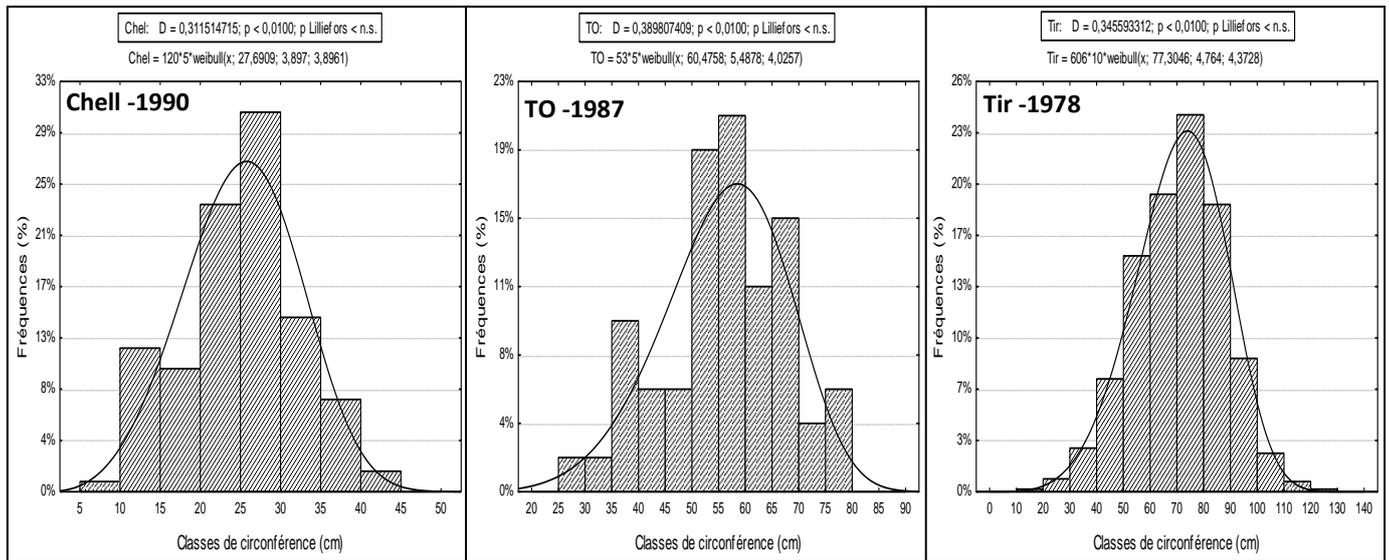


Fig.4.9 : Présentation des structures régulières des plantations du Djurdjura (1990, 1987, 1978).

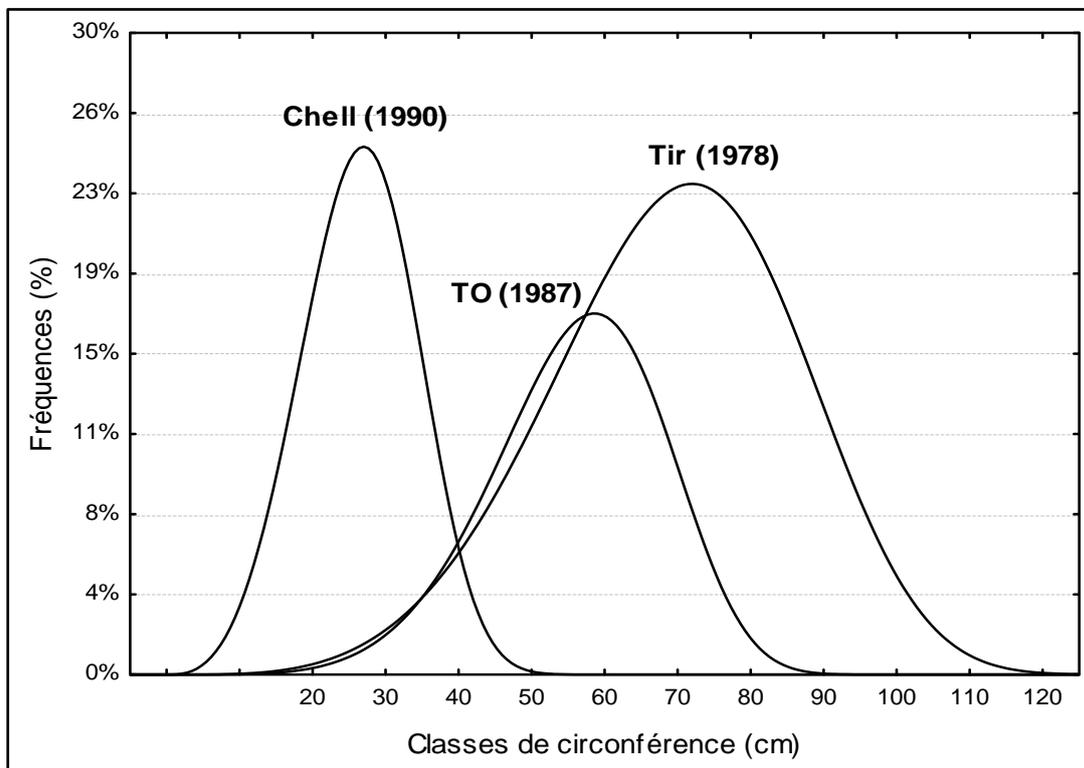


Fig.4.10 : Présentation des structures groupées du Djurdjura.

#### 4.6. Modèles de structure irrégulière

En peuplements inéquiennes, caractérisés par des arbres de tous âges et de toutes dimensions, la distribution des nombres de bois par catégories de grosseur prend la forme d'une courbe d'allure décroissante. Dans cette partie, il sera question de comparer l'efficacité

de deux distributions théoriques, Weibull et exponentielle, dans la construction d'un modèle de répartition des tiges pour la cédraie naturelle de Tikjda (Parc National de Djurdjura). L'échantillonnage et les inventaires effectués dans cette forêt (13 placettes de 2 ares réparties sur la surface de la forêt) ont révélé qu'elle est d'allure jardinée par bouquet puisque tout les stades de développement de la futaie (semis, fourré, gaulis, perchis et futaie) sont représentés mais par bouquet de surface et de fréquence variables.

Dans un premier temps, nous allons établir plusieurs modèles de structure régulière propre à chaque stade et tenter de vérifier l'adéquation avec l'évolution d'une structure théorique. Ensuite un modèle de structure d'allure jardinée sera construit pour la totalité de la cédraie.

L'individualisation de plusieurs bouquets équiennes à permis de réunir sept stades de développement de la futaie du cèdre de l'Atlas :

- Fourré (F) ;
- Gaulis (G) ;
- Bas perchis (BP) ;
- Haut perchis (HP) ;
- Jeune futaie (JF) ;
- Futaie adulte (FA) ;
- Vieille futaie (VF).

La figure 4.11 présente les structures établies à l'aide de la distribution de Weibull de tous les stades. A part le glissement à droite des classes modales et une augmentation progressive du paramètre d'échelle, il apparaît que l'évolution des structures avec l'âge n'obéit pas au schéma théorique qui prévoit une baisse des effectifs et un aplatissement des structures avec l'âge (Lanier, 1986).

Quant aux structures irrégulières globales, la qualité des deux modèles obtenus est acceptable mais celui de Weibull apparaît plus rigide et montre une difficulté d'adéquation aux classes de faible grosseur (inférieures à 50 cm de circonférence). La valeur du paramètre de forme du modèle de Weibull ( $c=0,9381$ ) indique que ce dernier se rapproche de la forme exponentielle (Fig.4.12 à gauche). Les deux modèles construits sont les suivants :

$$\text{Modèle de Weibull : } F(x) = \int_{d1}^{d2} 0,023 \left( \frac{x-7,92}{40,54} \right)^{-0,061} \cdot \text{Exp} \left[ -\left( \frac{x-7,92}{40,54} \right)^{0,9381} \right] dx$$

$$\text{Modèle exponentiel : } Y = 58,56 \cdot e^{-7,736x}$$

Dans la limite de l'échantillon étudié, le modèle exponentiel est retenu pour proposer une démarche d'optimisation de la structure en vue de la rendre équilibrée. Celle-ci impose un abaissement de 4% des effectifs des classes de circonférence allant de 60 à 80cm et de 100 à 130cm (Fig.4.12 à droite). Le petit manque d'environ 3% constaté pour les classes [20-60cm] sera inévitablement rattrapé du fait que les fréquences des classes [0-20] sont élevées.

Cependant, cet ordre peut ne pas être assuré si des pertes d'individus ou des chablis importants se sont produits à moyen terme. Toutefois, nous pouvons affirmer qu'à long terme, l'avenir de cette cédraie ne sera pas compromis puisque les stades jeunes sont fortement représentés.

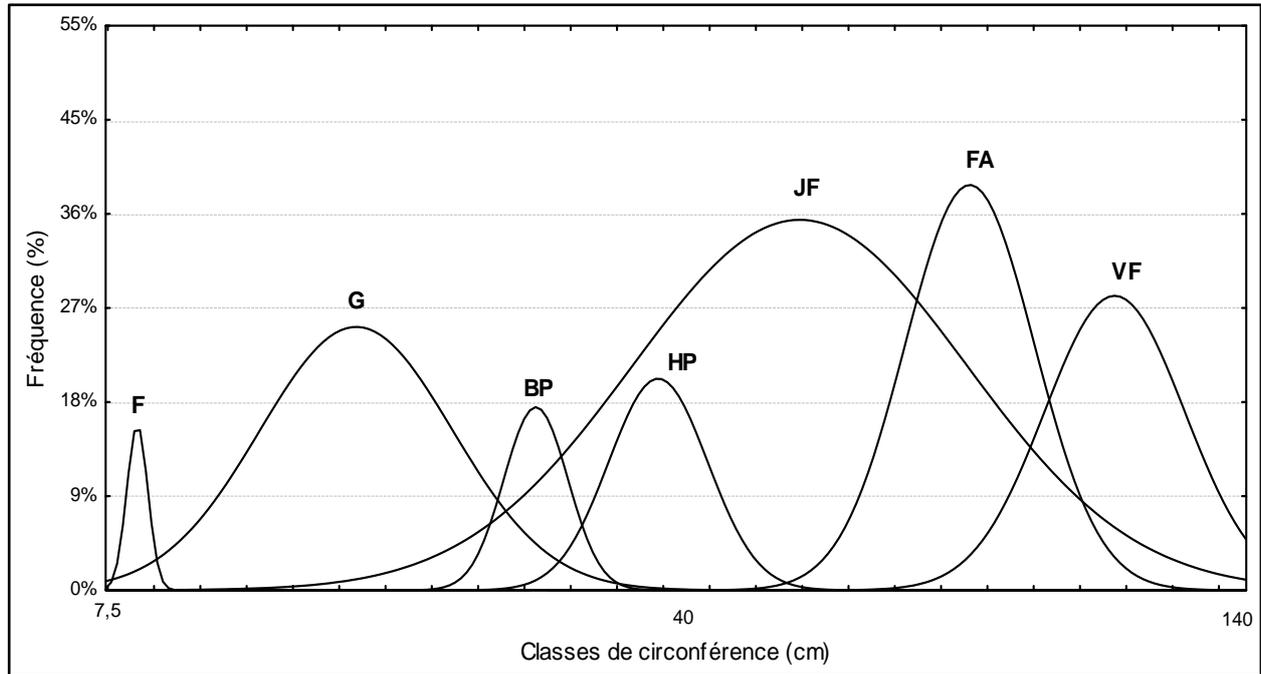


Fig.4.11 : Evolution de la structure en fonction du stade de développement.

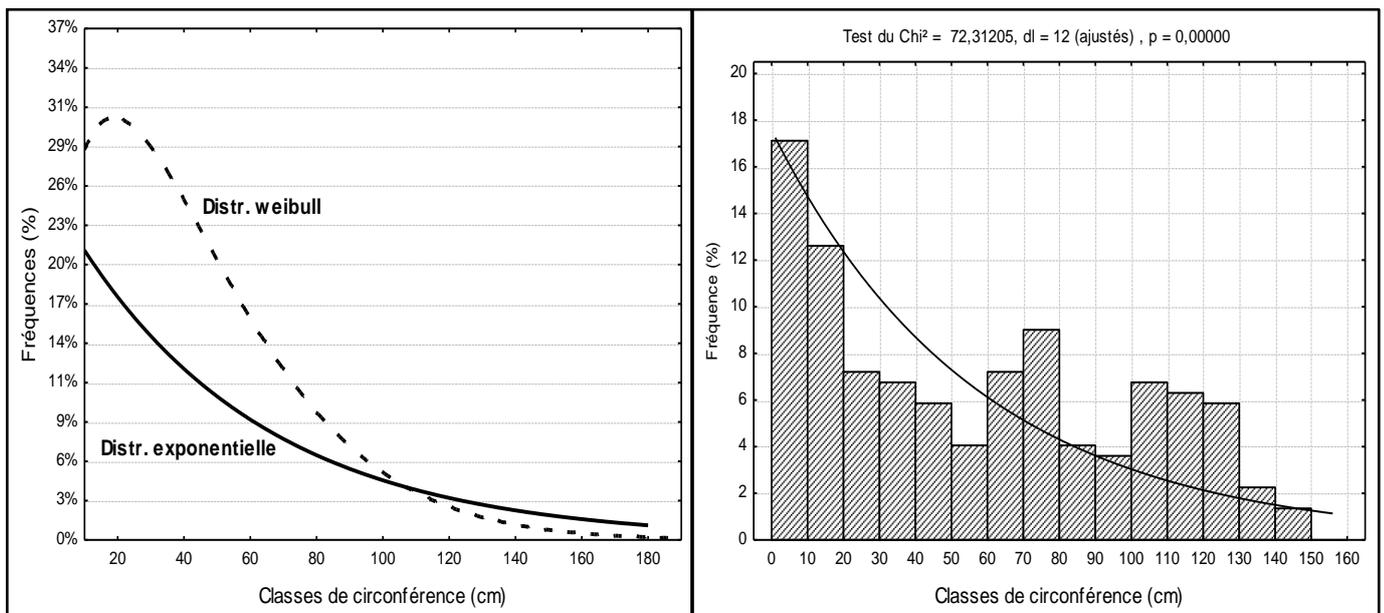


Fig.4.12 : Comparaison des deux distributions utilisées (à gauche) et présentation du modèle exponentiel retenu (à droite).

## Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de construire des modèles de structure en vue d'estimer et de prédire avec précision les effectifs d'arbres pour chaque classe de circonférence. La démarche consiste à tenter plusieurs lois de probabilité aussi bien pour les peuplements réguliers (reboisements) que pour ceux d'allure jardinée (cédraie naturelle de Tikjda). Ensuite, l'effet de la fertilité de la station, de la densité et de l'âge sur le paramétrage et la forme des modèles est étudié.

Les résultats montrent que pour les structures régulières, la distribution de Weibull s'adapte parfaitement. Cependant, elle est moins efficace pour les modèles décroissants des structures irrégulières. La comparaison des estimateurs a confirmé que les méthodes des moments et de maximum de vraisemblance sont les mieux recommandées pour l'estimation des paramètres du modèle de Weibull puisque l'indice d'erreur qui en découle est le plus faible.

L'évolution des structures apparaît étroitement liée à la fertilité de la station dans la mesure où sur les niveaux de fertilité pris en considération, l'échelle des modèles augmente sensiblement. Quant à l'effet de la densité, à l'exception d'une baisse de l'aplatissement en cas de forte densité, aucun effet notable n'est observé. En ce qui concerne l'effet de l'âge, il est noté pour toutes les plantations de Chréa et du Djurdjura que leurs structures respectives marquent un glissement à droite témoignant d'une augmentation significative du paramètre d'échelle. Celui-ci apparaît corrélé positivement avec la classe modale de chaque structure.

Néanmoins, une interaction est décelée entre l'effet de l'âge et celui de la densité. Dans des peuplements subissant une sylviculture même extensive où la diminution des effectifs avec le temps est contrôlée par le forestier en fixant l'intensité et la périodicité des coupes, on pourrait s'attendre à ce que les structures s'aplatissent avec l'âge et la classe centrale, qui s'apparente au diamètre moyen, augmente sensiblement en réaction aux éclaircies pratiquées. Mais du fait de l'absence de sylviculture, due au statut d'espèce protégée du cèdre de l'Atlas, les modèles de structure obtenus n'obéissent pas à ce schéma théorique. Une démarche d'optimisation visant le rééquilibrage des structures peut être proposée en procédant à un abaissement des classes préalablement ciblées.

Le même constat est observé pour la structure d'allure jardinée établie pour la cédraie naturelle de Tikjda. Même si, dans la littérature forestière spécialisée, la loi de Weibull est décrite comme étant la plus flexible, le cas de cette forêt fait apparaître une meilleure adéquation de la distribution exponentielle.

# Chapitre V

---

## Structure du couvert et modèle de transfert radiatif

### Introduction

La lumière a un rôle biologique fondamental. Elle a probablement été un facteur essentiel de la formation et du développement de la vie sur terre, tant par le maintien d'une température ambiante favorable que par les réactions photochimiques qu'elle permet, notamment la photosynthèse. C'est un facteur clef de la dynamique végétale, du fait qu'elle est la source d'énergie de la photosynthèse, donc de la croissance et de la production.

En fonction des objectifs, le facteur "éclairage" est abordé à différentes échelles, depuis la captation des photons par les pigments photosynthétiques, jusqu'au rayonnement global reçu par un peuplement forestier au cours de l'année. On peut aborder la répartition de l'éclairage, intégré sur la période de végétation, au sein d'un peuplement forestier. Les applications de ce niveau d'analyse sont nombreuses. Ayant réalisé une carte d'éclairage au niveau du sol, on peut, par exemple, l'utiliser pour comprendre la dynamique de la régénération d'une parcelle. On peut également envisager une cartographie de l'éclairage à hauteur du houppier des arbres afin d'en étudier la dynamique de croissance.

Dans cette partie, l'utilisation du couvert comme descripteur dans un modèle de lumière permet une description morphologique précise du houppier, celle-ci passe par l'intégration de plusieurs critères verticaux et horizontaux de l'arbre et de son houppier. Vis-à-vis de la croissance, la largeur du houppier pourrait représenter le facteur le plus prépondérant. Cependant, la difficulté de mesure de celui-ci incite à chercher les meilleurs descripteurs pouvant mieux renseigner sur son évolution. Donc, dans ce travail, une procédure de régression et de modélisation est entreprise.

L'estimation des surfaces et des volumes des couronnes par unité de surface indique le degré de concurrence en se basant sur les capacités d'extension des houppiers à travers l'espace disponible.

Enfin, l'utilisation du modèle de transfert radiatif de Beer-Lambert permet une estimation du LAD (*leaf area density*) et, indirectement, du LAI (*leaf area index*), qui sont deux indicateurs efficaces de la productivité des peuplements végétaux.

Ces méthodes sont appliquées sur quelques peuplements échantillonnés dans la cédraie naturelle de Tikjda.

### 5.1. Le rayonnement solaire et le couvert végétal

Le rayonnement solaire est la seule source d'énergie externe de notre planète et il est le moteur de tous les processus biologiques qui rendent possible la vie sur la terre. C'est un processus de transport d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques sans support matériel. Ces ondes sont associées à des particules élémentaires (les photons). Les rayonnements sont caractérisés par leur longueur d'onde ou leur fréquence de vibration. En termes de transport d'énergie, la quantité élémentaire d'énergie (quantum) du photon est proportionnelle à la fréquence de l'onde électromagnétique qui lui est associée (Sonohat *et al.*, 2003). La nature ondulatoire de la lumière permet de la décrire par des longueurs d'onde (correspondant à des couleurs dans le spectre visible). Sa nature particulaire permet de schématiser sa transmission au sein d'un milieu par des lois géométriques.

Pour caractériser l'activité biologique du rayonnement solaire sur les végétaux, on mesure généralement l'éclairement énergétique ou photonique d'une surface horizontale. L'éclairement est le flux de rayonnement reçu par unité de surface réceptrice. Les variations les plus importantes de la qualité de la lumière pour une plante sont celles qui existent au sein de couverts végétaux. Elles résultent essentiellement des propriétés optiques des organes chlorophylliens et de leurs interactions avec les rayonnements incidents (transmission, absorption et réflexion). Les propriétés optiques d'une feuille peuvent être simulées, avec une bonne précision à l'aide de peu de paramètres : un paramètre "N" de description de la structure foliaire interne, la concentration en chlorophylles "a" et "b", et l'épaisseur en eau de la feuille (Jacquemoud et Baret, 1990).

Un couvert forestier (ou plus généralement végétal) est constitué d'une multitude d'éléments foliaires et ligneux ayant une certaine surface et une certaine répartition dans l'espace. Les rayonnements sont absorbés, réfléchis, réfractés ou transmis par ces éléments. La part absorbée constitue l'extinction du rayonnement. Les parts réfléchies, réfractées et

transmises constituent les rediffusions. Le cheminement d'un rayon à l'intérieur d'un couvert forestier est schématisé dans la figure 5.1.

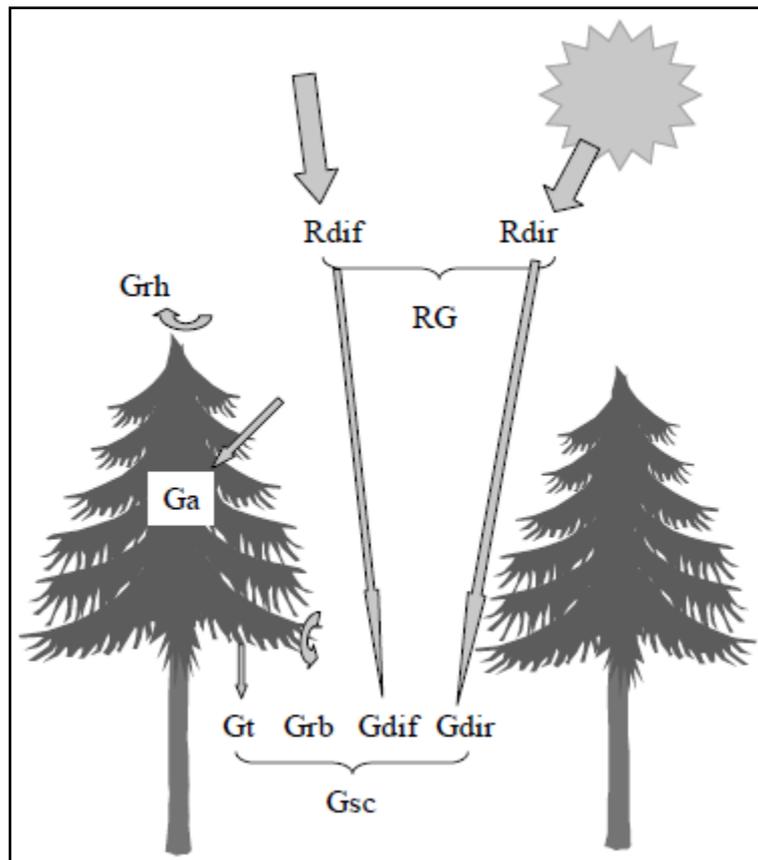


Fig.5.1 : Décomposition du rayonnement incident atteignant un couvert forestier (Ruchaud et *al.*, 2000).

**Grh** : partie du rayonnement incident réfléchi vers l'extérieur ;

**Ga** : partie absorbée par les feuilles et les éléments ligneux aériens ;

**Gsc** : rayonnement sous le couvert des arbres, qui se divise en :

**Gt** : rayonnement transmis par les feuilles et les éléments ligneux aériens ;

**Grb** : rayonnement réfléchi vers le bas par ces mêmes éléments ;

**Gdir** : rayonnement direct ;

**Gdif** : rayonnement diffus.

**Gdir** et **Gdif** constituent le rayonnement global qui passe par les espaces laissés libres dans la canopée

## 5.2. La lumière comme facteur de régénération, de croissance et de production

La lumière est indispensable pour le développement de tous les végétaux chlorophylliens. Elle est la source d'énergie qui permet aux plantes autotrophes d'élaborer des composés organiques à partir de matières premières inorganiques. La plante convertit l'énergie lumineuse en énergie chimique grâce aux processus de la photosynthèse. L'énergie

fixée est utilisée dans des phénomènes de croissance et d'entretien (maintien des tissus). Pour compenser les pertes respiratoires, une quantité minimum d'éclairement est nécessaire. Ce seuil qui détermine le point de compensation (production photosynthétique = pertes dues à la respiration) varie suivant les espèces considérées, qu'elles soient arborées ou herbacées (Aussenac et Granier, 1978). Seule la lumière visible intervient dans la photosynthèse. Le rayonnement utile à la photosynthèse, appelé PAR (*Photosynthetically Active Radiation*), correspond à la bande spectrale du visible (400 à 700 nm).

Du point de vue de la morphogenèse (mise en place des organes en nombre et en volume), les végétaux chlorophylliens ont développé des systèmes multiples d'information sur leurs conditions d'éclairement (niveau, direction, durée, composition spectrale). Ces caractéristiques agissent comme des signaux qui peuvent déclencher de nombreuses réponses de régulation de la croissance et du développement de la plante (Smith, 1982; Ballaré et al., 1987). Des travaux récents (cités par Sonohat et al., 2003) ont identifié deux photorécepteurs (cryptochrome et phytochrome) qui sont particulièrement impliqués dans la régulation de la morphogenèse et de l'architecture (arrangement topologique et spatial des organes) de la plante (syndrome "*shade avoider*", Smith 1982). La mise en évidence et l'analyse de ces régulations ont surtout été conduites sur des espèces herbacées mais des travaux plus rares effectués sur les ligneux montrent la généralité de ces mécanismes photo-morphogénétiques.

Comme finalité pratique de ces processus fondamentaux sus-énumérés, le facteur lumière en forêt est appréhendé sous deux angles : son rôle dans l'installation de la régénération ainsi que son influence sur la production des écosystèmes forestiers.

La lumière arrivant au sol, directement ou par la chaleur qu'elle apporte, est généralement considérée comme l'élément déterminant dans le renouvellement des peuplements forestiers (Ponge et al., 1994). Les travaux expérimentaux effectués sur plusieurs espèces d'arbres forestiers (Pin, Hêtre, Frêne, Épicéa, Pruche américaine) montrent que les modifications les plus importantes liées à l'ensoleillement affectent le système racinaire, sa morphologie et l'intensité de la mycorhization. L'accroissement de la quantité d'énergie lumineuse disponible pour la photosynthèse provoque un développement plus important des parties souterraines par rapport aux parties aériennes chez le jeune semis ainsi qu'un taux de mycorhization accru. Ces facteurs sont favorables à l'assimilation hydrique et compensent la sensibilité des jeunes semis à la sécheresse, notamment chez les espèces très sensibles.

Une inhibition de la croissance s'observe cependant aux fortes quantités d'éclairement en conditions expérimentales et la lumière est souvent associée à la sécheresse de l'air qui peut entraîner une forte mortalité estivale. Les variations constatées ont trait essentiellement à la morphologie et à la vitesse de croissance du jeune semis. Enfin, la régénération naturelle est avant tout un phénomène relatif à la démographie d'une essence donnée dans un écosystème donné.

Balandier et al. (2010) notent que les caractéristiques de l'éclairement déterminent les possibilités de régénération des arbres. Les plantes, et en particulier les jeunes arbres

forestiers, réagissent souvent très vite aux modifications de l'environnement lumineux. Quand la lumière est réduite, elles entrent en compétition pour accéder à cette ressource devenue limitante. Elles adaptent leur appareil foliaire pour capter le maximum d'énergie lumineuse ainsi que leur croissance et leur forme pour continuer à accéder à la lumière.

Par le biais de la sylviculture pratiquée et plus spécifiquement des éclaircies, le forestier a de tout temps cherché à doser la quantité de lumière parvenant au sol (Fig. 5.2). Si les niveaux de lumière requis pour diriger la dynamique des différents processus dans une direction souhaitée sont plus ou moins bien connus, il manque encore au sylviculteur des outils qui lui permettent d'estimer les niveaux de lumière régnant sous le couvert. Pour l'aider dans cette pratique, il serait intéressant qu'il dispose d'une relation entre l'intensité d'éclaircie, la lumière parvenant au sol et la composition et le recouvrement de la végétation du sous-bois ainsi que les possibilités de régénération et de croissance des arbres.

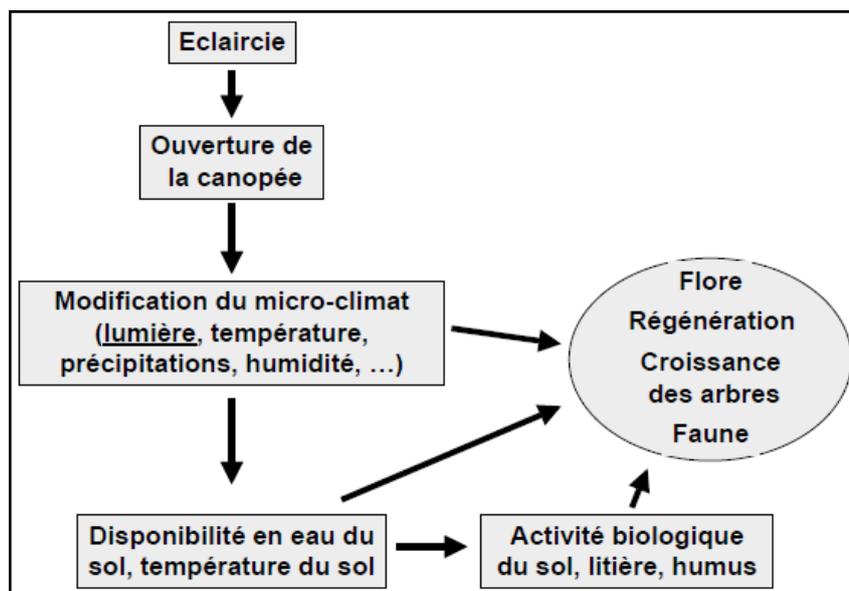


Fig. 5.2 : Représentation schématique des modifications, notamment microclimatiques, engendrées par les éclaircies en forêt et conséquences sur la flore et la faune (Balandier et Pauwels, 2002).

### 5.3. Estimation et mesure de l'éclairement sous le couvert

En forêt, la lumière traverse une structure complexe constituée d'éléments (feuilles, branches, troncs) ayant des propriétés optiques spécifiques, qui tour à tour la réfléchissent, l'absorbent ou la transmettent. Sa quantité et sa qualité sont fortement modifiées au fur et à mesure de sa traversée de la canopée. De plus, l'hétérogénéité du couvert crée de nombreuses taches d'ombre ou de lumière, de tailles variables et se déplaçant avec le temps, depuis les petites taches centimétriques jusqu'aux grandes trouées décamétriques. En fonction de leur dimension, elles reçoivent un éclairement direct sur des durées variant de quelques secondes à plusieurs heures. Les effets de la saison ou des conditions météorologiques du moment (journée ensoleillée ou bien nuageuse) sur les caractéristiques de l'éclairement incident ne

sont pas moindres (Balandier et *al.*, 2010). C'est la combinaison de tous ces facteurs qui va déterminer la quantité et la qualité de la lumière parvenant au niveau du sol et donc le microclimat du sous-bois, la composition et la dynamique de la flore et de la végétation (Balandier et Pauwels, 2002).

Mesurer directement la lumière dans le sous-bois n'est pas aisé à cause de la grande variabilité spatiale et temporelle de sa distribution, mais aussi parce que les systèmes de mesure existant actuellement sont fragiles, coûteux, et souvent lourds à mettre en œuvre. Une alternative est de disposer de relations liant le niveau de lumière sous le couvert à certaines caractéristiques dendrométriques du peuplement, que le sylviculteur pourrait aisément mesurer. Ces relations permettraient ainsi d'estimer assez simplement la lumière. En effet, Balandier et *al.* (2010) présentent pour des peuplements réguliers et/ou mélangés une relation forte liant l'éclairement et la surface terrière. Pour la mesure proprement dite, on distingue deux groupes de méthodes : directe et indirecte.

### 5.3.1. Méthodes directes

Le PPFD (*photosynthetic Photon Flux Density*) est défini comme la densité du flux de photons dans le domaine du PAR (*Photosynthetically Active Radiation*). Celui-ci représente la lumière visible utile à la photosynthèse.

Les méthodes dites directes permettent de mesurer le PPFD. Pour obtenir un éclairement relatif, deux mesures simultanées en continu et sur une période donnée sont réalisées. Une mesure de référence au dessus du couvert (en plein découvert) permet d'obtenir l'éclairement incident (avant interception) sur la période. L'autre mesure, au point considéré, permet d'obtenir l'éclairement transmis sur la même période. Le rapport des deux mesures, sommées sur la période considérée, permet d'obtenir l'éclairement relatif sur cette période. Les mesures de PPFD sont réalisées à l'aide de capteurs ponctuels, par exemple le luxmètre.

L'avantage principal des méthodes directes est qu'elles obtiennent de l'éclairement relatif par mesure et non par simulation. Elles prennent en compte toutes les composantes de l'éclairement (direct, diffus et rediffusions). Il faut cependant noter qu'en général une mesure directe est réalisée par un seul capteur placé à l'horizontale sur un support et dirigé vers le ciel. Dans ce cas, la part des rediffusions provenant du sol ne peut être mesurée. Les méthodes directes sont considérées comme une référence pour évaluer les autres méthodes, car elles sont précises et non biaisées.

Cependant, elles ont des limites. L'éclairement relatif sous couvert varie fortement dans le temps. Pour avoir une bonne caractérisation de l'éclairement moyen, il faut donc mesurer l'éclairement de façon continue sur une période significative. De plus, l'éclairement relatif varie fortement dans l'espace. Pour bien caractériser l'éclairement sur une surface donnée il faut donc multiplier les capteurs. Cela a de lourdes conséquences du point de vue logistique (Piboule, 2005).

### 5.3.2. Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes sont basées d'une part sur une modélisation du rayonnement incident (au dessus du couvert) en quantité et en trajet, et d'autre part sur une mesure des obstacles (la végétation dans notre cas) à sa transmission vers le point considéré. La façon dont est caractérisé l'obstacle, ainsi que le modèle employé pour obtenir l'éclairement incident, varie d'une méthode à l'autre. Ces méthodes permettent, à partir d'une mesure ponctuelle dans le temps et dans l'espace, de déterminer l'éclairement relatif sur une période pendant laquelle l'obstacle mesuré (les feuilles des arbres en particulier) peut être considéré comme invariant. La précision de l'estimation et les conditions d'utilisation dépendent de la méthode employée.

La plus connue des méthodes indirectes est celle des photographies hémisphériques (Piboule, 2001 et 2005). Cette méthode se fonde sur l'utilisation d'une photographie prise avec un appareil sur lequel a été monté un objectif hémisphérique (ou *fish-eye*). Ce type d'objectif permet d'obtenir une photographie de l'intégralité de l'hémisphère céleste visible depuis le point de prise de vue. La photographie obtenue représente tous les obstacles aux rayons lumineux provenant des différentes directions du ciel. La méthode consiste à modéliser la répartition du rayonnement incident sur l'hémisphère céleste pour ensuite modéliser l'interception de ce rayonnement par les obstacles présents sur la photographie.

### 5.3.3. Le modèle de transfert radiatif et le couvert forestier

L'intégration du couvert forestier comme descripteur dans un modèle de transfert radiatif nécessite une simplification. Il existe, en effet, différentes approches pour décrire le couvert. On utilise souvent deux indices. Le L.A.I. (*Leaf Area Index*) qui représente la surface foliaire totale en  $m^2$  par unité de surface du sol (en  $m^2$ ). Le L.A.D. (*Leaf Area Density*) représente la surface foliaire totale en  $m^2$  par  $m^3$  de volume contenant les feuilles. On peut définir de façon similaire le W.A.I. (*Wood Area Index*) et le W.A.D. pour les éléments ligneux ainsi que le P.A.I. (*Plant Area Index*) et le P.A.D. prenant en compte à la fois les éléments foliaires et ligneux (Piboule, 2001).

Dans le cas des photographies hémisphériques, on réalise une projection optique des éléments végétaux sur la voûte céleste pour un point donné. Les modèles de transfert radiatif représentent le couvert sous forme d'une maquette informatique en trois dimensions, à partir de mesures géométriques plus ou moins détaillées de ce couvert.

Toutes les méthodes et les modèles de transfert radiatif ont en commun cette approche de l'extinction du rayonnement par la théorie de la fraction de trouée. Mais les modèles réalisent, en plus, la projection des éléments végétaux qu'ils représentent. Ceux-ci sont en général distribués de façon statistique. Une loi d'extinction de Bouguer (également nommée loi de Beer-Lambert) permet d'obtenir la projection de la distribution dans une direction donnée (modèle utilisé dans la méthode par photographies hémisphériques) :

$$P_0(\alpha, \theta) = \text{Exp}[-G(\alpha, \theta).LAD.L]$$

(Sinoquet et *al.*, 1995 in Piboule, 2001).

“ $\alpha$ ” : est l’azimut de la direction ;

“ $\theta$ ” : son angle zénithal ;

“LAD” : (Leaf Area Density), représente la surface foliaire en  $\text{m}^2$  par  $\text{m}^3$  ;

“L” : est la longueur de trajet parcouru au sein du couvert ;

“G” : caractérise la distribution statistique des éléments végétaux. Celle-ci prend en compte le degré d’agrégation des éléments foliaires, la distribution de leur azimut et celle de leur inclinaison zénithale. Notons que certains modèles gèrent les rediffusions à l’aide de la notion de fonction de phase (décrite dans Sinoquet et *al.*, 1993 cité par Piboule, 2005).

## 5.4. Méthodologie appliquée

### 5.4.1. Choix du modèle de transfert radiatif

La méthode de mesure de l’éclairement appliquée est de type direct en utilisant un luxmètre. Le modèle utilisé est plus simple mais obéit toujours à la théorie d’extinction de Beer-Lambert où il est question du calcul de la transmittance ( $T$ ) d’un corps non transparent qui est, dans notre cas, les houppiers des arbres. Celle-ci est calculée par le modèle suivant :

$$T = \frac{I}{I_0} = \text{Exp}(-k.L.LAD)$$

$I$  : rayon finalement transmis par le houppier, mesuré sous la canopée ;

$I_0$  : rayon incident, mesuré dans un lieu à découvert proche du peuplement étudié ;

$k$  : coefficient d’extinction ou d’atténuation du couvert, il mesure la perte de rayonnement lorsque la lumière traverse une feuille. La valeur dépend de la constitution et de la disposition des feuilles ou des aiguilles. Il est souvent fixé à 0,5.

La valeur de ce paramètre dépend de l’efficacité d’interception de la lumière (*light interception efficiency, LIE*) d’une plante qui est liée au déploiement de la surface foliaire (arrangement des feuilles au sein du houppier) et de la distribution de la lumière qui atteint la surface d’interception.

Il est possible d’illustrer ceci avec un exemple mentionné par Caquet (2008) : dans un environnement lumineux où tous les rayonnements viennent du zénith, une surface horizontale (qui peut être assimilée à une feuille) aura une efficacité d’interception plus grande qu’une surface verticale alors que si l’ensemble des rayonnements sont horizontaux, une surface verticale sera plus efficace pour intercepter la lumière. Dans un cas réel, l’évaluation de l’efficacité d’interception d’une plante est évidemment plus complexe. D’une part, les rayons incidents parvenant sur le couvert forestier proviennent de toutes les directions du ciel avant d’atteindre les strates les plus basses. D’autre part, une plante entière est constituée d’un ensemble de feuilles dont l’arrangement au sein du houppier est déterminé

par de nombreux facteurs : la largeur et la hauteur du houppier, le nombre de branches, leur longueur et leur orientation, le nombre et la taille des feuilles, leur dispersion et leur inclinaison.

**L** : longueur du trajet parcouru par le rayonnement (longueur du houppier) ;

**LAD** : (Leaf Area Density) : représente la surface foliaire totale en  $m^2$  par  $m^3$  d'espace contenant les feuilles.

Dans un contexte climatique et stationnel donné, l'un des facteurs majeurs de la production d'un écosystème est son indice foliaire (*Leaf Area Index* pour les anglophones, abrégé par LAI), c'est-à-dire sa surface de feuilles exprimée par unité de surface au sol. La relation entre ce paramètre et la productivité est évidente : l'indice foliaire représente la surface par laquelle les flux de carbone (échanges photosynthétiques) et d'eau (transpiration) transitent. L'accumulation de matière sèche dépend ainsi de l'indice foliaire, du rayonnement incident, et de l'efficacité de conversion de ce rayonnement via la photosynthèse en matière sèche.

L'indice foliaire est donc une grandeur sans dimension, qui exprime la surface foliaire d'un arbre, d'un peuplement, d'un écosystème ou d'un biome par unité de surface de sol (Bréda, 1999).

Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'estimation du LAD ou du LAI. Bréda (1999) décrit une méthode simple et directe pour les espèces à feuilles caduques qui consiste à collecter les retombées de litières à l'automne sur des superficies échantillons connues et d'en mesurer ou évaluer la surface. Ainsi, les feuilles collectées peuvent être séchées et le poids de feuilles sèches converti en surface à partir d'un coefficient appelé surface spécifique (surface de feuille par unité de poids sec).

Pour les essences à feuilles persistantes, la collecte des litières ne donne accès qu'à la fraction renouvelée chaque année de l'indice foliaire. Il faut avoir recours à l'abattage et à la mesure de la surface foliaire d'arbres de statuts et de diamètres divers. Des tarifs sont établis (relations allométriques entre surface foliaire et diamètre ou, mieux, section conductrice) et permettent d'évaluer l'indice foliaire du peuplement à partir d'un histogramme de distribution des diamètres des tiges. Cette méthode est destructive et lourde à mettre correctement en œuvre.

Actuellement, la télédétection (aéroportée ou satellitale) ouvre une autre voie possible de quantification indirecte de l'indice foliaire où divers indices de végétation sont définis, le plus connu est le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Davi et al., 2006). Des méthodes plus pointues se basant sur les photographies hémisphériques (Walter, 2000) ou sur la procédure LIDAR (*aerial light detection and ranging*) (Richardson et al., 2009).

En outre la difficulté matérielle pour les mettre en œuvre, ces méthodes ne peuvent pas fournir le LAI pour chaque arbre puisqu'elles sont à la base conçues pour de grandes surfaces agricoles, ensuite forestières. L'objectif final est le calcul du LAD dont les valeurs sont sujettes à la perte de précision en subissant des transformations. Par rapport à la structure

verticale et horizontale des peuplements étudiés, du fait de l'agrégation du feuillage, de l'auto-ombrage des feuilles et de l'enchevêtrement des houppiers en peuplements denses, le choix de LAI conduit à des estimations biaisées.

Etant en peuplement monospécifique et reprenant l'hypothèse émise par Piboule (2001) selon laquelle le LAD est constant pour une espèce donnée évoluant dans un site donné. L'estimation du LAD passe par une transformation logarithmique de la forme exponentielle du modèle de Beer-Lambert :

$$T = e^{-k.L.LAD}$$

$$\Leftrightarrow -\text{Log}(T) = k.L.LAD$$

Un jeu de données composé de couple (T) et (L) permet d'établir une régression linéaire où la pente du modèle représente le *LAD*.

#### 5.4.2. Inventaire et mesures effectuées

Le choix est porté sur des placettes circulaires de 200m<sup>2</sup> matérialisées sur quelques peuplements d'allure jardinée de cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) culminant à 1450m d'altitude dans la cédraie de Tikjda (Annexe 2, L). Par des proportions différentes, l'échantillonnage a pris en considération les stades de développement de la futaie (fourrée, gaulis, bas-perchis, haut-perchis, jeune futaie, futaie adulte et vieille futaie). Ceux-ci se répartissent par bouquets de surfaces réduites.

Le placement de ces placettes doit éviter l'effet lisière qui est très influent sur l'éclairement. Il est évident que l'espacement entre arbre, la hauteur du houppier et son extension latérale modifient l'éclairement mesuré au dessous du couvert. Donc, le type d'échantillonnage est subjectif où l'installation des placettes doit couvrir l'hétérogénéité stationnelle et structurale de la cédraie en question. La position des placettes a pris en considération la pente du terrain et l'exposition puisqu'elles influencent l'ensoleillement, donc la lumière reçue par le feuillage.

Partant du principe que le houppier d'un cèdre peut être assimilé à deux cônes inversés (Fig.5.3) (Annexe 2, K). Il est mentionné ci-dessous les paramètres dendrométriques mesurés sur chaque arbre :

- D, C : diamètre et circonférence du tronc (à 1,3m) ;
- H<sub>t</sub> : hauteur totale ;
- H<sub>m</sub> : hauteur de l'extension horizontale maximale du houppier ;
- H<sub>b</sub> : hauteur de la base du houppier ;
- L<sub>h1</sub> : première longueur du houppier (L<sub>h1</sub> = H<sub>t</sub> - H<sub>m</sub>) ;
- L<sub>h2</sub> : deuxième longueur du houppier (L<sub>h2</sub> = H<sub>m</sub> - H<sub>b</sub>) ;
- EM<sub>h</sub> : extension horizontale maximale du houppier (crown width : CW).

L'EMh qui représente la largeur de la couronne (CW=crown width) est obtenue par les mesures de rayons de projection réalisées sur treize arbres répartis sur toutes les classes de diamètre (Fig. 5.4).

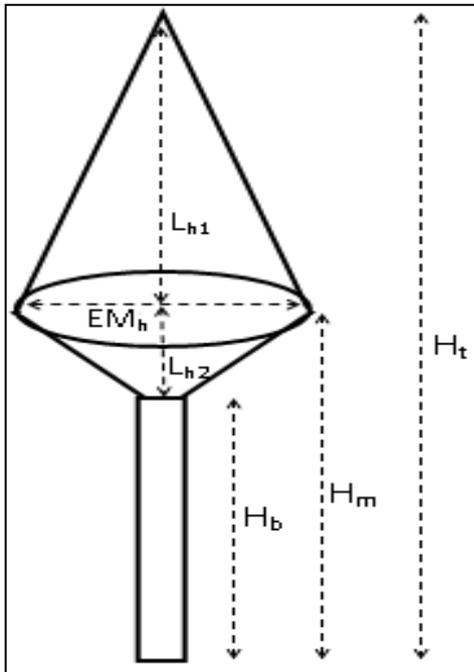


Fig.5.3 : Schématisation de la forme théorique d'un cèdre de l'Atlas.

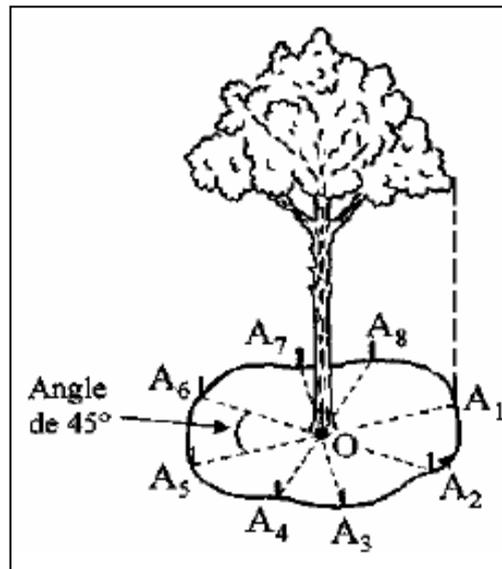


Fig. 5.4 : Mesure des rayons de projection de la couronne.

### 5.4.3. Attributs morphologiques des couronnes

#### ❖ Paramètres de forme du houppier

Sur les treize arbres couvrant les classes de diamètre et répartis uniformément sur les stades de développement et le gradient de densité (Tab.5.1), l'asymétrie (A) et l'excentricité (e) du houppier telles que définies par Curtin (1970) et Bragg (2001) ainsi que le coefficient d'extension maximale (CE) établi par Piboule (2005) ont été calculés.

L'utilisation de houppiers réguliers (circulaires) est choisie pour éviter l'influence de la distorsion des couronnes, ces déformations peuvent être évitées par la prise en compte de ces trois paramètres de forme. Cette procédure a pour objectif de prédire une forme idéale du houppier et ainsi optimiser la robustesse des modèles construits.

Le coefficient d'extension maximale (CE) permet d'évaluer à quel point l'extension du houppier dans une direction particulière est importante par rapport à une extension isotrope théorique. Une valeur de "1" indique que la forme du houppier est un cercle. Il caractérise l'extension maximale du houppier par rapport à son extension moyenne. Ce critère peut être interprété comme une capacité de fuite de la compétition dans le cas où celle-ci est intense et ne laisse que quelques directions libres à l'houppier pour s'étendre. C'est en quelques sortes une quantification de l'opportunisme du houppier à se frayer un chemin entre ses

compétiteurs. A noter que cet attribut débouche sur la même signification que l'asymétrie du houppier (A).

Les formules sont présentées ci-dessous :

$$A = P/\bar{R}$$

P : Rayon de projection maximale des branches ;

$\bar{R}$ : Moyenne des autres rayons de projection.

$$e = \sqrt{\frac{(Cw_{min}/2)^2}{(Cw_{max}/2)^2}}$$

Où :  $Cw_{min}$  et  $Cw_{max}$  sont respectivement les largeurs maximale et minimale du houppier mesuré.

$$C_E = R_{max}/R_{eq}$$

$R_{max}$  : rayon maximal ;

$R_{eq}$  : rayon d'un cercle de même aire que le houppier.

#### ❖ Estimation du volume des houppiers

$EM_h$  représente le diamètre de la base du cône et  $L_{h1}$  égale à la hauteur du cône.

- Volume du grand cône :  $V = \frac{1}{12} \cdot \pi \cdot EM_h^2 \cdot L_{h1}$

- Volume du petit cône :  $V = \frac{1}{12} \cdot \pi \cdot EM_h^2 \cdot L_{h2}$

Rondeux (1993) propose la formule générale suivante pour tous les résineux :

$$V = \frac{1}{10} \cdot \pi \cdot EM_h^2 \cdot L_h$$

Mais celle-ci ne prend pas en considération les différences de forme de houppier entre les différentes essences. Le volume du houppier du cèdre se retrouve surestimé de 17%.

#### 5.4.4. Mesure de l'éclairement sous le couvert

Un luxmètre (Fig.5.5) est utilisé pour la mesure de la quantité de lumière. Pour éliminer l'effet journalier (position du soleil) ainsi que celui des nuages sur la quantité et la

qualité de l'éclairement, il sera impératif de prendre les mesures pendant un temps clair et lorsque le soleil se localise approximativement au zénith.

Pour la mesure proprement dite, il est procédé à l'estimation d'une valeur moyenne établie à partir de la prise de neuf mesures réparties à l'intérieur de chaque placette. Cette démarche est justifiée du faite que l'éclairement transmis n'est pas seulement filtré par le houppier de l'arbre en question mais aussi par ceux des arbres voisins. Le schéma suivant montre la démarche suivie :

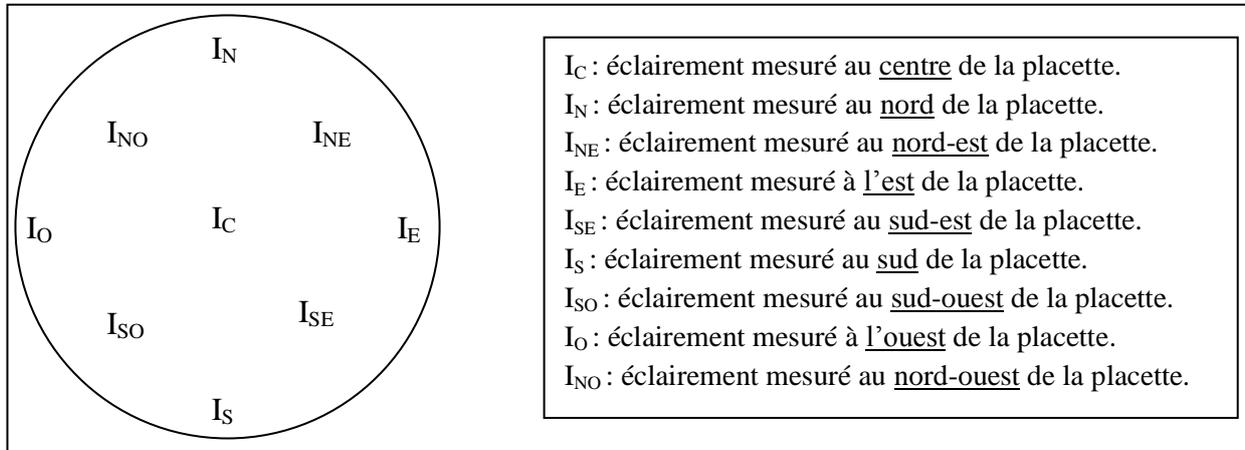


Fig.5.5 : Photo d'un luxmètre.

## 5.5. Résultats, interprétations et discussions

### 5.5.1. Modélisation de la largeur du houppier

Dans l'étude de la croissance des arbres et des peuplements, le houppier des arbres tient une importance centrale parce qu'il conditionne les surfaces photosynthétiques. Sa forme, son volume et son efficacité sont fortement liés à la croissance des arbres. Un houppier efficace est défini comme étant l'espace requis dans la canopée de sorte que sa dimension détermine la limite supérieure de l'espace vital par unité de surface (Curtin, 1970). Les dimensions de la couronne souhaitées pour un maximum de croissance sont rarement optimisées. Minckler et Gingrich (1970) notent que pour une relation entre le diamètre et

l'espace d'extension du houppier, la somme de ces espaces est souvent utilisée pour interpréter et prédire la croissance et le développement des peuplements. Pour ces objectifs, la masse de la couronne est préférablement choisie. L'interaction entre la surface et la forme du houppier, d'une part et la structure et la densité des peuplements, d'autre part, est importante dans toute tentative de réconcilier le comportement des arbres et leur croissance.

Bragg (2001) a noté que la largeur du houppier est un paramètre difficilement mesurable sur terrain mais il représente un excellent prédicteur de la croissance et du rendement. Différentes approches d'estimation ont été proposées, par exemple, en utilisant les photographies aériennes (Gill et *al.*, 2000) ou par la modélisation qui consiste à lier ce paramètre à d'autres plus faciles à obtenir. En effet, il apparaît que la corrélation entre la largeur du houppier et le diamètre du tronc est très forte. La stabilité de cette relation indique que ces deux variables peuvent être liées directement. Cette affirmation est vérifiée par plusieurs auteurs et sur une multitude d'espèces. Nous présentons, ci-dessous, la synthèse des résultats de la littérature exploitée.

Curtin (1970) a établi une régression simple expliquant le diamètre à la base du houppier ( $D_b$ ) en fonction de sa largeur pour l'eucalyptus :

$$D_b = -1,46 + 0,4952CW$$

L'intégration de l'asymétrie (A) dans une régression multiple semble améliorer la qualité du modèle, il en résulte l'équation suivante :

$$D_b = -0,96 + 0,25CW + 0,14CW.A$$

Ce modèle illustre les variations de diamètre avec l'asymétrie, ce dernier évalue la faculté d'une couronne à s'élargir sur une direction donnée à la recherche d'un espace vital limité par les compétitions entre individus. Une éventuelle influence de la densité sur la croissance en hauteur et la descente des branches basses (élagage) laisse penser que l'intégration de la longueur du houppier (B) et de la hauteur totale (H) pourrait mieux expliquer ce phénomène. Le modèle issu est le suivant :

$$CW = 1,36 + 0,68D + 1,90\frac{BD}{AH}$$

Donc, pour trois cas de densité, l'auteur explique les situations suivantes :

- Pour les arbres en croissance libre, la relation entre la largeur du houppier et le diamètre est indépendante de la hauteur :  $[CW=2,58+1,73D]$ . Cette indépendance est notée lorsque B/H est constant, ce rapport approche l'unité pour le cas des arbres en croissance libre (très faible densité).

- Pour les arbres en peuplements denses : la largeur du houppier (CW) dépend au même temps du diamètre et de la hauteur :  $[CW=1,19+1,45D-0,00066H^2]$ , il est admis que la diminution du CW avec l'augmentation de la hauteur (même faible) est expliquée par l'élévation de la hauteur du tronc.
- Lorsque la hauteur est exclue de la régression en peuplements très denses :  $[CW=1,26+0,96D]$ . La comparaison de celui-ci avec le modèle ajusté pour les peuplements lâches montre que, pour un même diamètre, la croissance du houppier soumis à la compétition est réduite de moitié par rapport à celui en croissance libre.

Pour Minckler et Gingrich (1970), la relation CW-D est, en générale, linéaire. La pente de la droite est invariable pour différents statuts sociaux. Pour les essences étudiées (chênes et douglas), les modèles sont presque similaires :

$$CW = 3,70 + 1,709D$$

La relation est exceptionnellement stable et s'accorde à la règle suivante : "*crown width in feet was two times the diameter in inch*" : la largeur du houppier en pied est le double du diamètre à 1,3m en pouce. Les résultats montrent que pour les espèces étudiées, le diamètre à 1,30 peut être utilisé efficacement pour estimer le taux d'occupation de l'espace par les couronnes. Cela implique qu'après éclaircie, le diamètre et la surface du houppier augmentent en réponse à l'augmentation de l'espace vital et le rapport CW-D est généralement maintenu. Les auteurs suggèrent que cette relation ne diffère pas entre les arbres en croissance libre et en peuplement parce que dans ce dernier cas les houppiers s'entrelacent et se chevauchent. Par conséquent, le rapport de surface des couronnes basé sur une valeur moyenne de la largeur du houppier est plus grand que la surface unitaire au sol puisque la forme et la plénitude des couronnes diffèrent dans les deux situations de croissance.

En accord avec Minckler et Gingrich (1970), Francis (1988) a pu ajuster aussi un modèle linéaire pour sept espèces nord-américaines. Cette relation est indépendante du site, du statut social et de l'espèce. Les pentes des modèles varient de 0,486 à 0,931 et les constantes de 1,33 à 6,61.

En se basant sur des estimations provenant des photographies aériennes, Gering (1995) a souligné que l'inclusion de la hauteur totale dans un modèle " $CW = f(D)$ " n'améliore pas l'efficacité des prédictions. Les résultats ne divergent pas grandement entre cette méthode et celle utilisant des mesures classiques sur terrain, les modèles issues sont :

$$CW = 1,52D + 6,37 \text{ (Mesures par photographies aériennes).}$$

$$CW = 1,89D + 2,39 \text{ (Mesures classiques sur terrain).}$$

La pertinence de l'utilisation de la forme linéaire est mise en évidence par Hitchcock (1974) cité par Gering (1995) où il a trouvé des coefficients de détermination avoisinant 0,80 pour 900 sujets de *Pinus ponderosa*.

Cependant, Bragg (2001) a mis en œuvre, pour 24 espèces, des régressions non linéaires de forme :

$$CW = b_1 + b_2 D^{b_3}$$

Considérant que les arbres répondent sensiblement à la densité, les sujets affranchis de la compétition des voisins tendent à développer une extension radiale et longitudinale importante du houppier. En situation de compétition accrue (fermeture du peuplement), le développement du houppier est réduit. L'approche proposée par Bragg (2001) pour modéliser ces interactions intègre la surface terrière (*BA*, *basal area*) en raison de son accessibilité et de sa pertinence. La procédure aboutit à un modèle de forme :

$$CW = b_1 + b_2 D^{b_3} + b_4 BA$$

Quasiment dans tout les cas (excepté deux essences), le coefficient  $b_4$  est négatif indiquant une réponse notable de la largeur du houppier à la densité.

Même constat pour Bertrand (2001) qui a obtenu un modèle de forme :  $[CW=34,94D-16,03D^2]$  pour le chêne sessile. Bechtold (2003) a également étudié la relation entre le diamètre du houppier et le diamètre à hauteur d'homme avec une plus large base de données de 87 espèces forestières couvrant une grande variété de structure aux Etats-Unis. En France, Piboule (2005) a obtenu un modèle de forme  $[CW=aD^2+b]$  pour neuf feuillus.

Cette synthèse fait apparaître clairement la stabilité de la relation : largeur du houppier – diamètre (où circonférence) puisque la différence entre les paramètres des modèles linéaires n'est pas accentuée. La stabilité de la relation implique aussi la validation de modèles avec de petits échantillons, de 5 à 14 jeux de données (Curtin, 1970 ; Bragg, 2001 ; Piboule, 2005). Anciennement, la forme linéaire semble dominer ces relations, mais des travaux plus récents ont montré des formes polynomiales indiquant que la croissance du houppier n'est pas infinie (existence d'un stade stationnaire).

Pour le cas du cèdre à Tikjda, une régression non linéaire intégrant la largeur du houppier (*CW* ou *EMh*) comme facteur expliqué et la circonférence (*C*) comme facteur explicatif a abouti à l'obtention d'un modèle polynomial (*CW* en m, *C* en cm) :

$$CW = -0,002C^2 + 0,248C + 0,012$$

Cette relation accepte aussi d'autres formes linéaires et de puissance avec des coefficients de détermination dépassant 0,96. La forme parabolique signifie qu'avec un large gradient de circonférence, la largeur des couronnes n'évolue pas de façon proportionnelle mais elle observe un palier (état stationnaire) pour les gros arbres. Cette limitation de l'élargissement latérale du houppier est compensée par une croissance verticale (augmentation de la longueur du houppier).

Une régression par la procédure “meilleures sous-ensembles“ en introduisant d’autres prédicteurs pouvant améliorer la qualité du modèle est réalisée. Il s’agit de la surface terrière (G), de l’excentricité (e), du coefficient d’extension (CE) et de la longueur du houppier (lh).

La figure 5.5 montre que l’introduction des quatre prédicteurs permet l’obtention d’un modèle très significatif ( $R^2_{aj}=96,9$ ).

Le Cp de Mallows aide à effectuer le choix entre plusieurs modèles de régression concurrents. Il compare la précision et le biais du modèle complet aux modèles ayant les meilleurs sous-ensembles de prédicteurs. Il permet de trouver un juste équilibre concernant le nombre de prédicteurs figurant dans le modèle. Un modèle possédant trop de prédicteurs peut s’avérer relativement imprécis, tandis qu’un modèle possédant trop peu de prédicteurs peut générer des estimations biaisées. Une valeur de Cp de Mallows trop proche du nombre de prédicteurs plus la constante indique que le modèle est relativement précis et non biaisé concernant l’estimation des véritables coefficients de régression et la prévision des futures réponses.

Une valeur de Cp de Mallows est plus faible avec l’intégration des quatre prédicteurs. Le coefficient élevé de la surface terrière signifie que ce paramètre constitue un bon prédicteur de la largeur du houppier, ce résultat corrobore avec le modèle déjà établi puisque la circonférence et la surface terrière sont redondantes. Le signe positif interprète une corrélation positive, donc, l’augmentation de la surface terrière est suivie par un élargissement de la couronne. Une influence positive mais faible est notée pour la longueur du houppier (lh).

Il apparait que l’excentricité et l’asymétrie du houppier provoquent une diminution de la largeur du houppier (coefficients négatifs), ce qui mène à conclure que la largeur des couronnes est tributaire de l’espace disponible donc de la capacité du houppier à s’étendre sans se tordre (perte de la symétrie).

<b>Régression sur les meilleurs sous-ensembles : cw en fonction de G; e; CE; lh</b>							
Réponse : cw							
Vars	R carré	R carré (ajust)	Cp de Mallows	S	G	e	CE lh
1	81,9	80,2	62,1	0,99870	X		
1	81,5	79,8	63,6	1,0093			X
2	94,2	93,1	15,6	0,59020	X	X	
2	93,4	92,1	19,0	0,63284	X		X
3	97,1	96,2	6,2	0,43807	X	X	X
3	96,8	95,7	7,5	0,46293	X	X	X
4	98,0	96,9	5,0	0,39278	X	X	X
<b>Analyse de régression : cw en fonction de G; e; CE; lh</b>							
L'équation de régression est							
$cw = 5,84 + 29,0 G - 4,41 e - 1,50 CE + 0,605 lh$							

Fig. 5.5 : Modèle de régression obtenu :  $CW=f(G,e,CE,lh)$ .

### 5.5.2. Analyse de la forme du houppier

#### ❖ Critères morphologiques horizontaux

Les paramètres relatifs à la morphologie du houppier sont présentés dans le tableau 5.1 et la figure 5.6.

Tableau 5.1: Résultats des paramètres morphologiques des couronnes.

Cir (cm)	CW(m)	Cw <sub>min</sub>	$\bar{R}$ (m)	A	e	CE
8,45	0,62	0,41	0,24	1,29	0,75	1,29
13,21	0,89	0,69	0,27	1,64	0,63	1,64
28,33	2,13	1,53	0,98	1,08	0,69	1,08
37,12	2,76	1,99	1,08	1,27	0,69	1,27
55,36	3,86	3,33	1,72	1,12	0,50	1,12
68,17	4,43	4,15	2,05	1,08	0,34	1,08
75,46	4,78	4,25	2,16	1,10	0,45	1,10
82,59	5,2	4,67	2,47	1,05	0,43	1,05
90,3	5,64	4,81	2,52	1,11	0,52	1,11
112,84	6	4,91	2,61	1,14	0,57	1,14
125,63	6,94	5,23	2,86	1,21	0,65	1,21
138,22	7,02	5,41	2,88	1,21	0,63	1,21
148,37	7,25	4,55	2,23	1,62	0,77	1,62

*CW* : crown width : largeur maximale du houppier (=2p) ; *R* : rayon moyen de la projection de la couronne ; *A* : asymétrie de la couronne ; *e* : l'excentricité ; *CE* : coefficient d'extension maximale.

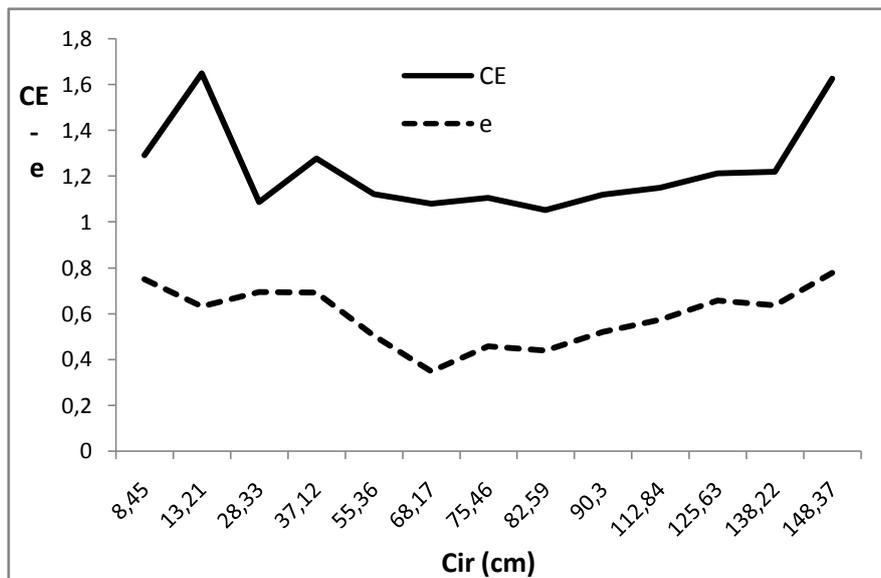


Fig.5.6 : Evolution avec la circonférence de l'excentricité et du coefficient d'extension du houppier.

Le parallélisme qui caractérise les deux courbes (Fig.5.6) indique que les deux critères morphologiques (CE et e) ont le même comportement et évoluent de la même allure avec la circonférence.

Globalement, l'excentricité des sujets échantillonnés est relativement faible mais elle est plus importante pour les circonférences extrêmes (petites et grosses). Le rapprochement des arbres et les compétitions qui s'opèrent au cours du stade juvénile (fourré et gaulis) imposent une réorientation des branches qui fait perdre aux couronnes leurs symétries. Avec l'âge, la mortalité des vieilles branches, qui pourrait résulter d'un manque photosynthétique, cause une distorsion du houppier, ce qui explique les valeurs élevées de l'excentricité avec les grosses circonférences.

### ❖ **Autres critères morphologiques**

La forme du houppier est appréciée par la mesure d'autres critères. L'analyse est axée sur les sept stades de développement de la futaie où une moyenne et un coefficient de variation sont calculés, ces derniers étant sans valeur statistique en peuplements irréguliers, ils ne seront pas donc interprétés pour la totalité de la cédraie. La description succincte (moyenne et coefficient de variation) des placettes et les données récoltées sont affichées dans le tableau 5.2.

La hauteur de la base du houppier (Hb) interprète le degré de descente des branches et l'élagage naturel qui s'opère dans les peuplements relativement denses. Ce paramètre augmente avec l'âge, mais pour la vieille futaie (VF), caractérisée par une densité faible (640 tiges/ha), le houppier est considéré très bas (6,84m). Contrairement aux bouquets représentant la futaie adulte (FA) où le houppier est très haut (8,38m) en raison d'un élagage important.

Il est remarqué que pour la jeune futaie (JF), même si le peuplement est très dense (3850 tiges/ha), le houppier a descendu jusqu'à 3,73m (Tab.5.2) (Annexe 2, M). On peut attribuer ce cas à la difficulté du cèdre à s'élaguer naturellement du fait de la lenteur du phénomène de pourrissement provoquant la chute des branches. Un feuillage clair facilement pénétrable par la lumière ralentit ce processus. Il se trouve aussi que l'agrandissement des houppiers profitant d'une densité pas assez élevée (1050 tiges/ha) a limité l'accès à la lumière des branches les plus basses. Ce critère lié à l'extension latérale des houppiers (EMh) en réponse à l'espace disponible sera discuté dans les paragraphes suivants. A noter enfin que cette cédraie n'as jamais fait l'objet d'un élagage artificiel.

La distance séparant Hb et Hm est faible et ne dépasse pas dans tous les cas 65cm, mais elle tend à augmenter légèrement avec l'âge. Cela pourrait avoir un impact sur la forme théorique choisie du houppier pour les jeunes sujets qu'on peut assimiler à un seul cône.

L'extension du houppier est régie par deux paramètres mesurés (EMh et Lh) et un autre estimé (volume des houppiers). Les résultats affichés dans le tableau 5.2 montrent que la part de hauteur totale occupée par le houppier est maximale pour les jeunes arbres. Une diminution progressive est observée avec l'âge sauf pour le stade "futaie adulte" où le houppier est réduit

en hauteur. Pour la vieille futaie, la présence de branches basses a augmenté la proportion du houppier. L'élancement important des arbres (25,95m) a fait que le houppier occupe une gamme de hauteur très étendue (19,67m) (Annexe 2, P).

Ce paramètre (%Lh/Ht) seul ne permet pas d'avoir une idée précise sur la réponse du houppier aux variations de la densité, sur les possibilités d'accès à la lumière et sur l'efficacité de la photosynthèse, d'autres éléments d'information seront apportés par l'analyse de l'extension latérale maximale du houppier, de la quantité de lumière transmise par celui-ci et par les volumes et surfaces calculés.

Quant au rapport CW/D, la comparaison avec les résultats de Francis (1988) sur sept essences américaines (chênes, frênes et ormes), montre que le cèdre est plus efficace en accumulant plus de diamètre par unité de surface de couronne.

Tableau 5.2: Analyse descriptive des propriétés des placettes échantillonnées.

Paramètres mesurés	Placettes (stade de développement de la futaie). " $\bar{X}$ [CV] "						
	F	G	BP	HP	JF	FA	VF
<b>d (tiges/ha)</b>	77100	11800	7560	2270	3810	1050	640
<b>P(%)</b>	18	42	32	20	35	15	24
<b>Exposition</b>	N	NO	NO	O	N	NE	E
<b>Hb (m)</b>	0,14 [0,28]	0,93 [0,15]	2,21 [0,27]	3,07 [0,11]	3,73 [0,12]	8,38 [0,09]	6,28 [0,13]
<b>Hm(m)</b>	0,22 [0,18]	1,15 [0,26]	2,40 [0,14]	3,26 [0,11]	3,96 [0,13]	9,01 [0,09]	6,84 [0,12]
<b>Ht</b>	1,76 [0,11]	6,48 [0,22]	8,63 [0,13]	11,70 [0,07]	12,74 [0,12]	12,29 [0,11]	25,95 [0,13]
<b>EMh=CW(m)*</b>	0,85 [0,22]	2,64 [0,17]	3,91 [0,20]	4,67 [0,11]	5,44 [0,15]	6,22 [0,27]	6,75 [0,31]
<b>Lh(m)</b>	1,61 [0,10]	5,55 [0,23]	6,42 [0,16]	8,63 [0,09]	9,01 [0,17]	3,90 [0,36]	19,67 [0,16]
<b>%Lh/Ht</b>	91,47	85,64	74,39	73,76	70,72	31,73	75,79
<b>Cir. (cm)</b>	10,99 [0,11]	36,87 [0,31]	58,10 [0,06]	72,56 [0,08]	89,3 [0,22]	109,38 [0,06]	126,52 [0,06]
<b>Ray. Tr. (I)</b> <b>(lux)</b>	92483 [0,16]	54122 [0,20]	20466 [0,08]	13411 [0,14]	11636 [0,24]	10544 [0,21]	10711 [0,20]
<b>T (I/I<sub>0</sub>)</b>	0,91	0,54	0,19	0,13	0,11	0,11	0,12
<b>Sh (m<sup>2</sup>)</b>	0,56	5,47	12,01	17,11	23,23	30,37	35,76
<b>Vh (m<sup>3</sup>)</b>	0,30	10,02	25,42	48,75	69,07	39,08	232,16

\* déterminé à l'aide d'un modèle  $EMh=CW=f(C)$ , décrit au § 5.5.1 ; Sh : surface de projection du houppier moyen ; Vh : volume du houppier moyen.

En ce qui concerne la lumière mesurée sous le couvert, le coefficient de variation est très faible, il varie de 0,08 à 0,24. Ces résultats renseignent sur l'homogénéité des mesures effectuées dans chaque placette découlant de la stratégie d'échantillonnage qui a exclu l'effet lisière et celui des trouées (Annexe 2, O). A part la placette "Fourré" dont la forme petite des houppiers ne permet pas de filtrer le rayonnement incident (Annexe 2, N), les valeurs de la lumière transmise ne varient pas grandement (de 10544 à 54122 lux). Toutes placettes confondues, le feuillage du cèdre laisse passer en moyenne environ 29% du rayonnement incident.

Pour chaque stade de développement et pour toute la gamme de densité, les quantités de lumière transmises ne sont pas très hétérogènes. On peut penser à une compensation par l'extension latérale du houppier en réponse à l'espace disponible. La lumière est influencée par le chevauchement et l'entrelacement des secteurs des couronnes (Annexe 2, Q). Ces deux phénomènes surviennent dans le cas d'une forte structuration verticale (Annexe 2, R), qui se caractérise par :

- Une surface cumulée des couronnes projetées qui dépasse la surface au sol considérée ;
- Longueur élevée du houppier et une variabilité de la hauteur de l'extension horizontale maximale du houppier (Hm).

Considérant l'arbre moyen, le calcul du rapport entre la surface des houppiers projetés (Sh) et la surface de chaque placette montre qu'excepté les stades futaie adulte (FA) et vieille futaie (VF), un chevauchement (Stc/ha) relativement important est noté pour toutes les placettes, la surface cumulée des houppiers atteint au stade bas-perchis (BP) neuf fois la surface de la placette (Fig.5.7).

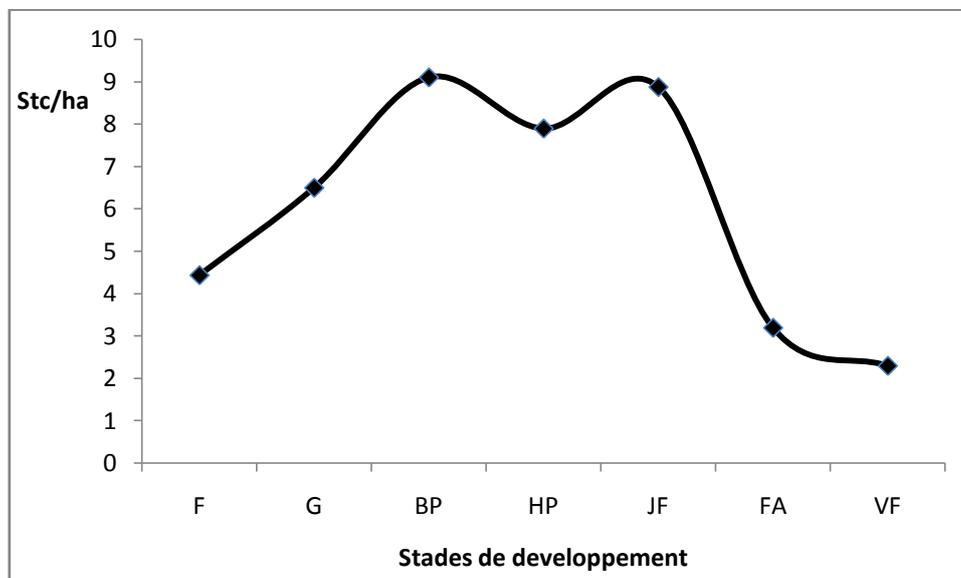


Fig. 5.7: Rapport de la surface totale des couronnes (Stc) sur la surface unitaire (1ha).

### 5.5.3. Estimation de l'indice foliaire (LAI : *leaf area index*)

Comme il a été signalé en méthodologie, une régression linéaire est établie entre “ $-\ln(T)$ ” et “ $L_h$ ” sur 16 placettes. Les résultats sont affichés dans la figure 5.8.

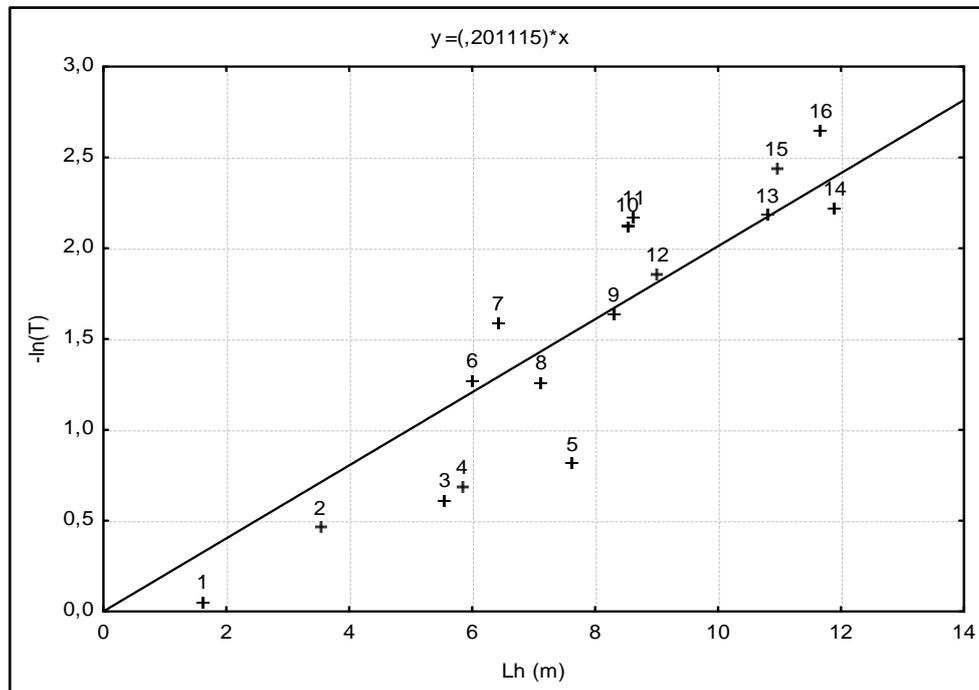


Fig. 5.8: Procédure d'estimation du LAD (*leaf area density*).

La régression obtenue est hautement significative ( $R^2=0,79$ ). Le LAD estimé égale à  $0,402 \text{ (m}^2/\text{m}^3)$ . Partant du principe que le LAD est une variable stable à l'intérieur de l'espèce, l'indice foliaire (LAI) moyen est, donc, calculé en considérant le volume de la couronne moyenne pour chaque stade de développement de la futaie de cèdre. En effet, le LAI (*leaf area index*) représente la surface foliaire totale en  $\text{m}^2$  par unité de surface du sol en  $\text{m}^2$ . Le LAD (*leaf area density*) représente la surface foliaire totale en  $\text{m}^2$  par  $\text{m}^3$  de volume contenant des feuilles. Les résultats présentés dans la figure 5.9 montrent qu'une évolution conséquente du LAI avec le stade de développement est constatée où il passe de 0,012 à l'état fourré à 9,33 au stade vieille futaie. L'indice foliaire maximum serait atteint lorsque le couvert se ferme, contrairement aux peuplements à couvert clairs où l'indice foliaire est faible. Il est parfaitement établi que l'indice foliaire est très influencé par le degré d'ouverture des peuplements (Soudani et *al.*, 2002).

Bréda (1999) note que l'indice foliaire (LAI) dépend de l'architecture du couvert, de l'inclinaison des feuilles, de leurs agrégations et de leurs distributions verticales. C'est ainsi que les forts indices foliaires de certains peuplements de résineux sont possibles grâce aux effets d'agrégation des aiguilles qui permettent une pénétration de la lumière profondément dans le couvert. Par conséquent, l'indice foliaire des résineux est plus élevé par rapport à celui des feuillus.

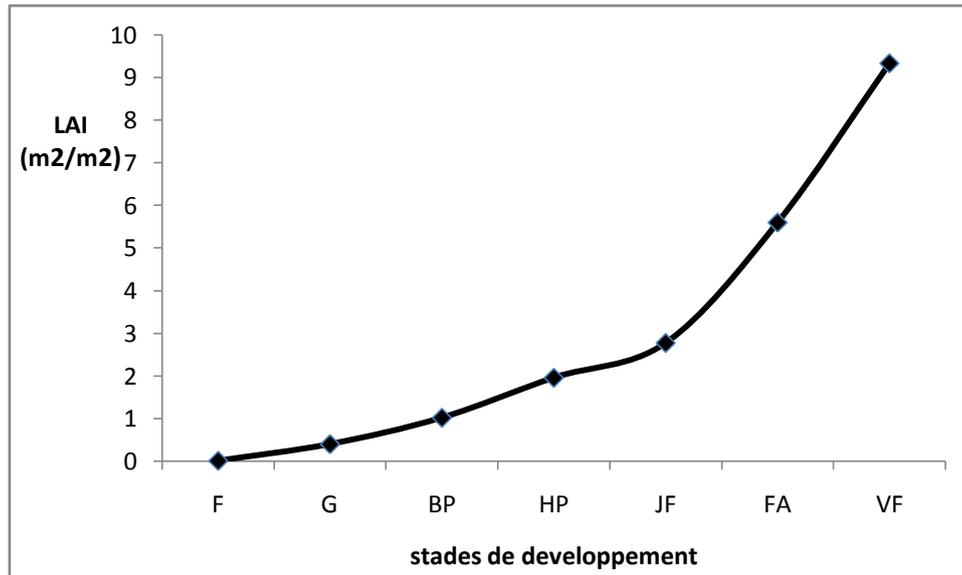


Fig.5.9 : Evolution du LAI avec le stade de développement.

Quant à l'influence des opérations sylvicoles notamment les éclaircies, peu d'études se sont intéressées à quantifier la dynamique de l'indice foliaire au cours de la phase de retour à un couvert fermé. Il semble que 4 à 6 saisons de végétation soient souvent suffisantes pour revenir aux valeurs précédant l'éclaircie. Cette dynamique dépend de l'essence, de l'âge du peuplement, et des conditions stationnelles, et peut être largement modulée par les conditions climatiques des années consécutives à l'intervention.

Sur *Quercus petraea*, Bréda et Granier (1996) remarquent que l'indice foliaire augmente linéairement avec la transpiration et la croissance des pousses, d'où son rôle en tant que variable fonctionnelle de structure du couvert, qui représente la surface d'évaporation. Le LAI intègre également l'interception des précipitations, et comme la surface des feuilles du couvert influe aussi sur le rayonnement traversant la canopée, il prend en compte dans une certaine mesure la transpiration du sous-étage et de la strate herbacée ainsi que l'évaporation du sol.

L'effet principal d'une éclaircie est la diminution brutale du LAI du peuplement. Cela a pour conséquences une diminution de l'interception des précipitations et une réduction de la transpiration à l'échelle du peuplement (Aussenac, 2000). Cependant, la transpiration individuelle augmente suite à l'éclaircie par l'augmentation de l'exposition à la lumière du houppier et de la disponibilité en eau. Globalement, l'éclaircie provoque une meilleure disponibilité en eau pour le peuplement et diminue l'amplitude et la durée du stress hydrique (Bréda et al., 1995). Cela améliore, au moins dans le court terme (5 ans environ) la résistance des arbres à la sécheresse (Misson et al., 2003 in Sghaier et Ammari, 2012).

L'évaluation du LAI par la mesure de la transmittance et du coefficient d'extinction (k) dans différentes situations de stress hydrique permet d'apprécier les capacités

d'adaptation des couronnes dans le but de réduire les effets de la sécheresse (Cutini, 1996). Le coefficient d'extinction dépend de la forme et de la disposition des feuilles et de l'architecture des branches. En générale, particulièrement dans de jeunes arbres, il peut être observé que l'adaptation de l'architecture des branches dépend du niveau de lumière disponible. L'angle d'inclinaison des branches est plus grand quand elles se développent sous l'ombre, le passage à un environnement plus lumineux s'accompagne, une année après, d'une modification rapide de l'architecture des branches (Aussenac, 2000). Au dessus de la couronne où le rayonnement total et le rayonnement utile à la photosynthèse sont au maximum, les feuilles sont dressées et leur angle d'inclinaison par rapport à l'horizon est élevé. Des études (citées par Aussenac, 2000) ont montré que l'angle d'inclinaison des feuilles en relation avec l'épaisseur de la couronne de *Fagus sylvatica* et de *Quercus petraea* suit la loi d'extinction de la lumière de Beer-Lambert. Le hêtre s'adapte mieux aux manques de lumière que le chêne. Ce type de tropisme peut être également observé pour les conifères, notamment le cèdre de l'Atlas.

## Conclusion

Dans la cédraie de Tikjda, la description des houppiers des différents stades de développement de la futaie montre l'influence de la densité sur la hauteur de la base du houppier. Cet effet est bien apparent sauf pour les cas où le cèdre de l'Atlas trouve des difficultés à s'élaguer naturellement. Les résultats relatifs à la longueur du houppier montrent que la part de hauteur totale occupée par le houppier diminue progressivement avec l'âge. Les besoins croissants en photosynthèse seraient assurés par l'épaississement latéral de la couronne.

Quant à l'extension maximale du houppier, une relation polynomiale très forte a pu être ajustée avec la circonférence, celle-ci représente donc le meilleur descripteur de la largeur du houppier. Les résultats issus de l'intégration d'autres paramètres à la régression permettent de conclure que la surface terrière explique de façon plus efficace l'élargissement des couronnes. Par contre, l'asymétrie des couronnes, quantifiée par l'excentricité et le coefficient d'extension, est corrélée négativement.

Les variations relativement faibles des mesures de lumière sous le couvert indiquent que les différences de l'espace disponible seraient compensées par l'extension des couronnes. Ce phénomène est étroitement lié au degré de chevauchement et d'entrelacement des houppiers. Celui-ci est maximal pour les stades perchis et jeune futaie.

La densité foliaire (LAD) estimée est de  $0,402 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . L'indice foliaire (LAI) qui en découle marque une évolution sensible avec l'âge où il passe de  $0,012 \text{ m}^2/\text{m}^2$  au stade fourré à  $9,33 \text{ m}^2/\text{m}^2$  pour la vieille futaie.

## Chapitre VI

# Le rapport aubier-duramen et la biomasse foliaire

### Introduction

Dans ce chapitre, la duraminisation a été abordée non pas du point de vue chimique mais plutôt biométrique puisque les mesures de surface et de largeur d'aubier et de duramen ont été réalisées. Il s'intéresse à étudier, d'une part, les relations entre le rapport aubier – duramen et la biomasse foliaire par le biais de la théorie du *pipe model* et d'autre part, l'influence des propriétés stationnelles (sol, topographie et climat) sur les quantités respectives de ces deux types de bois.

Après une présentation succincte des principes théoriques relatifs à la structure du matériau "bois" et une brève revue bibliographique concernant, d'un côté, la formation du bois parfait et les différences anatomiques et fonctionnelles entre l'aubier et le duramen, et de l'autre, l'influence des facteurs environnementaux et sylvicoles sur la duraminisation. Le plan de rédaction de ce chapitre s'articule sur deux parties : la première, présentée sous forme d'article publié, traite de l'influence du milieu sur le processus de duraminisation et l'évolution de celui-ci avec l'âge. L'effet du bioclimat a été abordé en intégrant d'autres échantillons prélevés dans les cédraies du Belezma et de Theniet EL Had, en plus des mesures réalisées au Djurdjura. L'objectif de la deuxième partie est de quantifier la corrélation pouvant exister entre la biomasse foliaire et les quantités de bois fonctionnel (l'aubier) où seront utilisés les volumes et les surfaces des houppiers estimés dans le chapitre 5. Elle est appliquée seulement pour la cédraie naturelle de Tikjda (Djurdjura).

## 6.1. Macrostructure du matériau “bois”

Une coupe transversale du tronc d'un arbre est présentée dans la figure 6.1. Dans certains cas, la partie adjacente à l'écorce (l'aubier) a une couleur plus claire que la partie interne (duramen ou bois parfait) alors que pour de nombreuses essences, cette distinction de couleur entre l'aubier et le duramen n'existe pas. Du point de vue chimique, la mort des cellules formées intérieurement et la formation du bois parfait sont accompagnées de la sécrétion de phénols oxydés qui sont souvent à l'origine de la pigmentation du bois. Pour des arbres où le bois parfait et l'aubier ont la même couleur, la mort de ces cellules n'est pas accompagnée d'une pigmentation. Les matériaux sécrétés sont nommés les extractifs. Ils sont toxiques et augmentent la durabilité du bois. La transformation de l'aubier en bois de cœur entraîne des modifications chimiques (dépôt de substances phénoliques, disparition de l'amidon) et physiques (formation de thylles dans les vaisseaux des angiospermes et blocage des punctuations aréolées chez les gymnospermes) qui conditionnent souvent leurs possibilités d'emploi (Polge, 1982).



Fig. 6.1 : Section transversale d'un tronc d'arbre.

## 6.2. L'aubier et le duramen

L'International Association of Wood Anatomy (I.A.W.A.) définit le duramen (bois parfait ou bois de cœur) comme suit : “Dans l'arbre vivant, couches internes du bois qui ne contiennent plus de cellules vivantes et dans lesquelles les matières de réserve (par exemple, l'amidon) ont disparu ou ont été transformées en substances du bois parfait. Généralement plus coloré que l'aubier bien qu'il n'en soit pas toujours différencié (présence de bois intermédiaire).

L'aubier est défini comme la zone périphérique du tronc dans laquelle les cellules de parenchyme sont vivantes. Il est de couleur claire généralement. Ziegler (1968) distingue l'aubier conducteur assurant la conduction de la sève brute et l'aubier de stockage.

La conduction de la sève brute n'a souvent lieu que dans les couches les plus externes de l'aubier (Ghazil, 2010). Il existe aussi du bois intermédiaire représentant les couches les plus internes de l'aubier qui forment la transition entre ce dernier et le duramen.

Le bois parfait se distingue parfois de l'aubier par un certain nombre de caractères venant s'ajouter à ceux repris dans la définition. Ce sont :

- La présence de thyllés dans les vaisseaux ;
- Les ponctuations bloquées ;
- Une humidité généralement plus faible ;
- Une teneur en gaz plus élevée ;
- La disparition du noyau dans les cellules parenchymateuses.

La présence de bois parfait peut influencer l'utilisation du bois en affectant favorablement :

- Sa couleur ;
- Sa stabilité dimensionnelle ;
- Sa durabilité.

En affectant défavorablement :

- Sa pénétration par les agents de protection ;
- Sa transformation en pâte à papier.

### **6.2.1. Différences cytologiques entre l'aubier et le duramen**

Le bois parfait ou duramen est constitué de cellules mortes aux membranes épaisses et dures où les éléments nutritifs ne circulent pas. Les cellules imprégnées de lignine rendent le bois plus résistant mécaniquement et face aux agents prédateurs (insectes, champignons...). Les cellules de l'aubier sont vivantes, actives et à membrane mince. La sève brute de l'arbre y circule et les matières nutritives s'y accumulent.

L'absence de cellules vivantes est la caractéristique du bois de cœur. Il paraît évident que les polyphénols du bois de cœur sont formés in-situ à la limite de l'aubier, à partir des hydrates de carbone stockés en cet endroit ou provenant d'une autre partie de l'arbre. En conséquence, la zone située entre l'aubier et le duramen apparaît comme une zone à métabolisme très actif, on y trouve des enzymes catalysant la biosynthèse des polyphénols. A partir du cambium, on obtient une modification de forme du noyau qui progressivement prend une forme plus arrondie, les mitochondries diminuent et les graisses se transforment de plus en plus en acide gras.

Du point de vue de l'activité enzymatique, il est remarqué dans la zone intermédiaire une augmentation de l'activité des peroxydases. Il est intéressant de noter que chez le peuplier, qui a tendance à former du bois mûr (faux duramen) et une diminution de l'activité des peroxydases du cambium jusqu'au centre de l'arbre. Il semble que l'activation de ces enzymes soit liée surtout à la polymérisation des monomères des polyphénols

### 6.2.2. Théorie de la formation du bois parfait et physiologie de la duraminisation

Les processus conduisant à la formation et à l'extension du duramen n'ont jamais été réellement explicités jusqu'à présent. Dans les paragraphes suivants, il sera question de l'évolution historique des connaissances relatives aux processus de formation du duramen en présentant les théories et hypothèses émises par un certains nombres d'auteurs.

Aux premiers travaux sur l'anatomie du bois, (Priestley, 1932) pensait que le duramen est issu d'une accumulation d'air dans un tissu cellulaire devenu clos ou de la dévitalisation du parenchyme par des micro-organismes (Chattaway, 1952). Par la suite, Frey-Wyssling et Bosshard (1959), en approfondissant plus la question, considèrent que ce phénomène commence par une diminution de la quantité d'oxygène qui va de pair avec la croissance de l'arbre, et cela à une certaine distance du cambium. Cette diminution de l'oxygène disponible s'accompagne d'une diminution de l'activité respiratoire des cellules, cette dernière cesse à un moment donné au niveau d'une zone de transition. Les grains d'amidon eux-mêmes disparaissent rapidement au niveau de cette zone. Le système enzymatique en serait affecté de telle sorte que l'oxygène résiduel participerait à l'oxydation des phénols qui diffusent radialement. L'oxydation et la polymérisation des phénols donnent naissance aux pigments caractéristiques du duramen. Ces composés organiques se déposent soit dans les membranes, soit dans la cavité des cellules. Rudman (1966), pour sa part, considère la transformation de l'aubier en bois de cœur comme résultant d'un phénomène naturel de vieillissement, puis de mortalité sous l'effet d'une accumulation de polyphénols atteignant un seuil de toxicité.

Cependant, Bamber (1976) a émis l'hypothèse, étayée par un certain nombre d'éléments de preuve, que la mort des cellules de parenchyme est la conséquence, et non la cause, de la formation du bois de cœur. Celle-ci résulterait d'un processus de croissance secondaire, analogue à la chute des feuilles ou à la maturation des fruits, déclenché par une substance hormonale circulant de façon centripète dans les rayons et atteignant son seuil d'efficacité à la limite du bois de cœur, où ne pouvant plus avancer, elle s'accumulerait puis diffuserait dans un plan tangentiel. Pour justifier sa façon de voir, il note que certains processus physiologiques sont relativement intenses dans la zone de transition comme la respiration ou même le développement cellulaire, avec la formation des thylls ou parfois l'épaississement des membranes (canaux résinifères radiaux ou rayons médullaires). Observant qu'il existe le plus souvent des corrélations étroites entre le diamètre des arbres et la largeur de leur aubier, il en déduit que la duraminisation est un processus régulateur destiné à limiter la surface relative de celui-ci au strict niveau nécessaire à la conduction de la sève et à l'approvisionnement des cellules vivantes en matières minérales et en hydrates de carbone, la transformation en bois de cœur des couches internes devenues inutiles dans cette optique compensent l'apparition de nouvelles couches du fait de la croissance cambiale.

Plus récemment, les différents travaux menés jusqu'alors chez des espèces comme le noyer ou le robinier (cités par Kokutse, 2002) ont montré que la synthèse des polyphénols caractéristiques du duramen, était régulée, à l'échelle cellulaire, par l'expression de certains gènes qui codent des enzymes impliquées dans la synthèse de ces polyphénols. Il n'est pas

exclu que des mouvements internes d'eau (aussi bien à l'échelle cellulaire qu'à l'échelle de l'arbre) ou de sucres puissent jouer un rôle dans la formation du duramen (Gachet, 2000). Hillis (1987) évoque le rôle éventuel de l'éthylène comme étant le déclencheur de la synthèse des polyphénols caractéristiques du duramen. L'éthylène est connu comme étant une réponse de l'arbre à des sollicitations mécaniques (Telewski, 1990).

Enfin, deux tendances se dégagent et deux hypothèses sont formulées pour expliquer le passage de l'aubier au duramen. La première s'appuie sur le fait que la duraminisation serait le résultat d'un vieillissement physiologique de l'arbre. Ce vieillissement serait dû à la mort des cellules de parenchyme. La disparition progressive de l'amidon, la désintégration progressive des nucléis, la réduction de l'activité mitochondriale et respiratoire sont autant de phénomènes qui témoignent de cela. Une autre hypothèse est adoptée selon laquelle le passage de l'aubier au duramen est activement contrôlé par l'arbre et par conséquent, la mort des cellules de parenchyme serait le résultat de la duraminisation et non la cause. Des observations faites au niveau de la zone de transition, située entre l'aubier et le duramen, révèlent une augmentation de l'activité physiologique.

### **6.2.3. Duraminisation et qualité du bois**

La formation du duramen est un aspect majeur de la qualité du bois. Elle améliore les propriétés mécaniques du bois, accroît sa durabilité et modifie sa couleur (Kokutse, 2002). De nombreuses utilisations de feuillus durs excluent les pièces comportant de l'aubier. Ce choix s'explique par l'altérabilité de la partie vivante de l'arbre en raison de la présence de matières nutritives de réserve et des facilités de communication entre cellules et, à l'inverse, par la relative résistance du duramen aux attaques des divers agents biologiques de dégradation, que lui confèrent l'absence de matières glucidiques assimilables, l'imprégnation de ses cellules par des substances aromatiques dont certaines exercent une action antifongique et l'existence d'obstacles physiques pour le passage entre éléments anatomiques ou à l'intérieur de ceux-ci.

Pour d'autres utilisations, notamment l'industrie papetière, la présence d'un aubier important ne constitue pas toujours un défaut, elle est au contraire recherchée d'une part, en raison de sa plus grande accessibilité aux liqueurs de cuisson, d'autre part, du fait des dépenses accrues de blanchiment qu'entraîne souvent la forte coloration du bois de cœur. Néanmoins, Il est important de noter qu'une fois que l'arbre a commencé à former de bois de cœur et dont la proportion de l'aubier devient moins que l'arbre devient plus âgé, par conséquent, la production de bois avec une faible proportion de duramen telle que préconisé pour les industries papetières est favorisée par une croissance rapide et une récolte précoce, alors que la production de bois avec un minimum d'aubier comme recherché pour le bois de construction est favorisée par une croissance lente et une exploitation tardive (Longuetaud, 2005).

#### 6.2.4. Influence des facteurs environnementaux et sylvicoles sur la duraminisation

Bien que sous contrôle génétique, il apparaît que les conditions environnementales et les pratiques sylvicoles interviennent au cours de la duraminisation. Les résultats repris de la littérature et exprimant d'une part l'effet des traitements sylvicoles notamment l'éclaircie, l'élagage ainsi que la vitesse de croissance, et d'autre part, l'effet des conditions environnementales telles que l'humidité ou la sécheresse et la fertilité du sol sont mentionnés dans la synthèse bibliographique présentée ci-dessous :

Concernant les facteurs stationnels, Polge (1964) a souligné que la proportion d'aubier est, du point de vue sylvicole, un excellent indicateur de la qualité de la station. D'après Bamber (1987), l'aubier serait plus large dans des conditions de milieu favorables, mais il a été suggéré que la formation du bois de cœur est encouragée par des conditions de disponibilité de l'eau pour le pin radiata. Concernant l'effet du cumul des précipitations, Climent et *al.* (1993) notent un effet positif sur la proportion de l'aubier de *Pinus canariensis*. L'effet du vent a été mis en évidence par la découverte d'un taux exceptionnellement élevé de l'éthylène dans la partie de bois duraminisée, celui-ci est connu comme étant une réponse de l'arbre à des sollicitations mécaniques (Telewski, 1990), il interviendrait de manière directe ou indirecte dans la propagation radiale du duramen (Gachet, 2000). Ces résultats ont été appuyés par l'existence d'un effet notable du vent sur l'élargissement directionnel du duramen, et ce pour améliorer l'efficacité du rôle de soutien assuré par les vaisseaux conducteurs.

Quant aux traitements sylvicoles, l'élargissement des couronnes résultant notamment des éclaircies devrait entraîner une augmentation de l'aubier (Jeffrey et *al.*, 2009). En concordance avec Mörling et Valinger (1999), il apparaît que les traitements culturaux qui favorisent la croissance rapide des arbres se traduiront dans les tiges par une plus grande proportion d'aubier alors que sur le duramen, l'effet de l'éclaircie même accompagnée d'une fertilisation est limité. En opposition avec ces résultats, Climent et *al.* (1993) trouvent que la densité du peuplement exprimée par le nombre de tiges à l'hectare se montre négativement corrélée avec les surfaces d'aubier et du duramen. Comparativement aux arbres dominés, la proportion d'aubier est plus large dans les arbres dominants (Sellin, 1993).

L'accélération de la duraminisation liée à l'élagage était particulièrement sensible pour trois cultivars hybrides de peuplier noir et de baumier (Polge, 1985). Sur un dispositif intégrant plusieurs intensités d'élagage sur le peuplier, l'auteur a montré aussi une différence faiblement notable sur le pourcentage du bois de cœur et celui d'aubier. Aux deux plus fort taux d'élagage correspondent les pourcentages de bois de cœur les plus élevés, et une tendance se dégage donc à un effet positif mais faible de l'élagage sur la duraminisation. Par contre, Bergström et *al.* (2004) soulignent un effet relativement plus important chez le *Pinus sylvestris*.

De Kort (1993) pour sa part, souligne que l'âge et la vitalité ont une influence significative sur la quantité d'aubier. Les arbres plus âgés ont une plus faible proportion

d'aubier par rapport aux jeunes arbres. En outre, les arbres non vitaux montrent une plus faible quantité d'aubier. Par exemple, Longuetaud (2005) a montré que dans des peuplements d'épicéas atteints par le déclin forestier, les arbres qui présentaient des pertes d'aiguilles importantes dans le houppier, avaient également des surfaces d'aubier beaucoup plus faibles.

### 6.3. Proportion d'aubier et surface foliaire

L'importance du houppier des arbres forestiers comme facteur explicatif de leur production a été étudiée depuis quelques années grâce au développement de modèles de fonctionnement et de croissance des arbres forestiers. Il est démontré que le pourcentage de l'aubier est fortement corrélé avec la surface du feuillage où des travaux ont fait apparaître que la masse photosynthétique d'un arbre, en équilibre avec son milieu, est fortement corrélée avec la section conductrice efficace du point de vue du flux transpiratoire (le bois d'aubier). Granier (1981) note qu'il s'agit d'un équilibre fonctionnel intéressant à deux niveaux :

- Biologique, car on peut penser que cet équilibre correspond à un optimum de fonctionnement physiologique. Du point de vue hydrique, le bois d'aubier est le lieu où se passe la totalité du flux transpiratoire, mais aussi où s'opèrent des phénomènes d'échanges réversibles d'eau (stockage et restitution).

- Dendrométrique, parce que la relation "masse foliaire - section de l'aubier" peut fournir un moyen rapide de connaître avec une bonne précision la masse foliaire d'un arbre en peuplement.

Cela implique que pour les arbres de taille de la tige semblable, le pourcentage d'aubier devrait être plus important pour ceux ayant de grandes couronnes. Il devrait alors être possible d'expliquer la variation de la proportion d'aubier en décrivant la taille de la couronne. De nombreux auteurs ont rapporté des résultats en s'appuyant sur ce modèle général (Waring *et al.*, 1982 ; Jeffrey et Lachenbruch, 2009), s'appuyant sur le fait que la fonction principale de l'aubier est d'alimenter le feuillage en eau et en éléments minéraux, ces auteurs ont confirmé pour plusieurs espèces que le pourcentage d'aubier est proportionnel à la surface foliaire. Selon Hazenberg et Yang (1991), une relation claire entre la proportion d'aubier et la taille de la couronne existe et la diminution du nombre de cernes duraminisés pour les vieux sujets est le résultat de ce phénomène. La transformation de l'aubier en duramen se fait continuellement indépendamment de la relation liant la largeur de l'aubier à la taille de la couronne.

Comme conséquence de ces affirmations, la diminution du volume du houppier entraîne des besoins moindres en circulation de sève, ce qui conforte l'hypothèse de Bamber (1976) selon laquelle la surface de l'aubier est limitée par des phénomènes régulateurs au strict minimum nécessaire pour assurer la circulation de la sève et l'approvisionnement des cellules en substances nutritives.

### 6.3.1. Application de la théorie du “*pipe model*”

La théorie du modèle tubulaire encore appelée le “*pipe model*” fut développée la première fois par Shinozaki et *al.* (1964). Elle explique que le tronc et les branches d’une plante peuvent être considérés comme un ensemble de tuyaux ; chacun supportant une certaine quantité bien définie de feuilles. Une unité de poids du feuillage de la couronne est alors alimentée par une surface transversale spécifique d’aubier conducteur. Ainsi la quantité de feuilles à un niveau horizontal donné chez une plante est directement proportionnelle à l’aire des organes non photosynthétiques (tronc et branches). Ce modèle est exprimé par l’équation suivante :

$$F(z) = LA(z)$$

$F(z)$  = poids des feuilles au dessus du niveau  $z$  ;

$A(z)$  = aire de la section des organes non photosynthétiques au niveau  $z$  ;

$L$  = une constante.

En application à cette théorie, plusieurs auteurs ont pu estimer la biomasse du feuillage sur différentes espèces des zones tempérées en se basant sur l’aire de surface de l’aubier conducteur (Marchand, 1983 ; Waring, 1982 ; Kokutse, 2002). Ces auteurs concluent qu’il existe une relation physiologique entre les dimensions de la cime et l’aire de section du xylème conducteur nécessaire à l’alimentation en eau du feuillage. L’accroissement en aire (et en volume) du tronc est fortement corrélé à la biomasse foliaire (Morataya et *al.*, 1999).

A partir de l’analyse du fonctionnement physiologique des branches et des paramètres foliaires (quantité de lumière interceptée, aire et poids des feuilles) de trois espèces différentes, Kosei et *al.* (2002) concluent que l’architecture des arbres n’est pas simplement un ensemble de tuyaux comme décrite par la théorie du modèle tubulaire. L’accroissement des troncs dépendrait fortement de la quantité de lumière interceptée et de la distribution des matières photosynthétisées par les jeunes pousses plutôt que du poids/aire des feuilles.

De ce fait, il nous a paru intéressant d’étudier les facteurs de variation de l’équilibre existant entre la proportion d’aubier et la masse foliaire, ainsi que ses conséquences écophysologiques et forestières. Cette relation est utilisée pour comprendre la réponse du cèdre de l’Atlas à différents facteurs sylvicoles et environnementaux.

### 6.3.2. Validation de la théorie du “*pipe model*” :

Les deux variables, surface et volume du houppier, sont utilisées dans le cadre d’une analyse sur les relations ‘‘aubier-paramètre foliaire’’ telles que décrites par la théorie du “*Pipe model*” et les implications sylviculturales qui en découlent. L’échantillon analysé pour cet objectif est récolté dans la cédraie naturelle de Tikjda (Djurdjura) où la surface de l’aubier de 23 arbres, tous âges confondus regroupant toutes les classes de diamètre, a été estimée sur des carottes prélevées à la tarière de Pressler. La surface et le volume des houppiers des arbres échantillons sont estimés sur la base des modèles établis, validés et présentés dans le chapitre

5. Les deux modèles linéaires, expliquant la surface et le volume du houppier en fonction de l'aire d'aubier, sont présentés dans la figure 6.2 et 6.3.

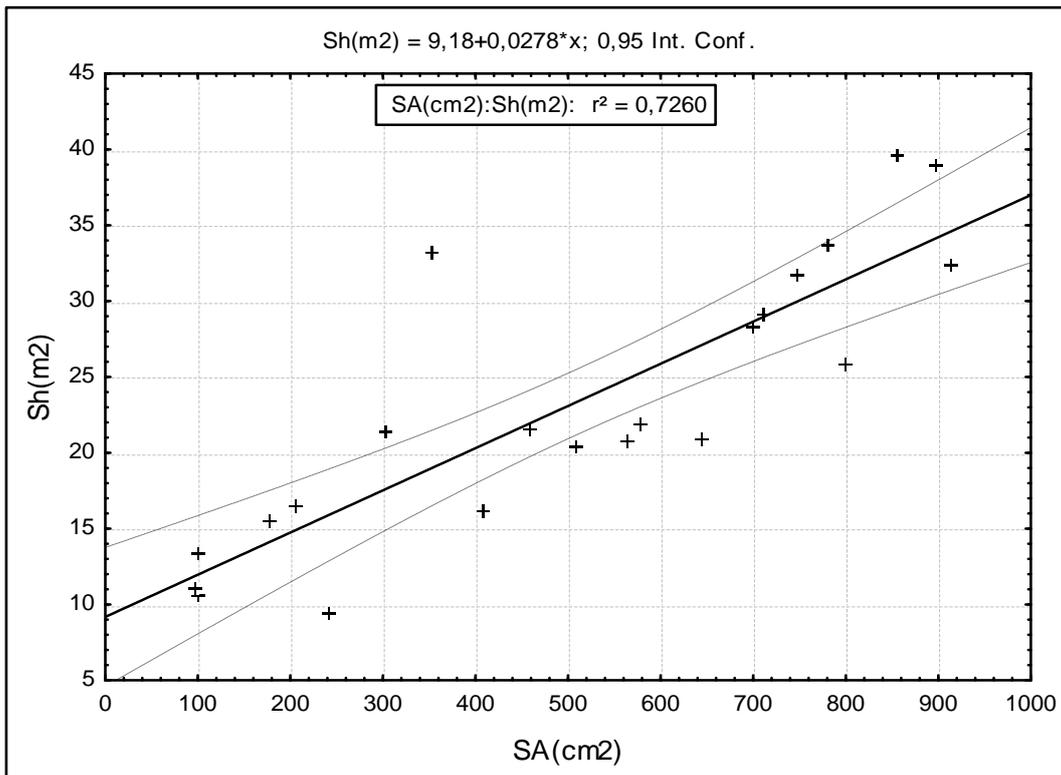


Fig.6.2 : Modèle de surface d'houppier "Sh (m²)" en fonction de l'aire d'aubier "SA (cm²)".

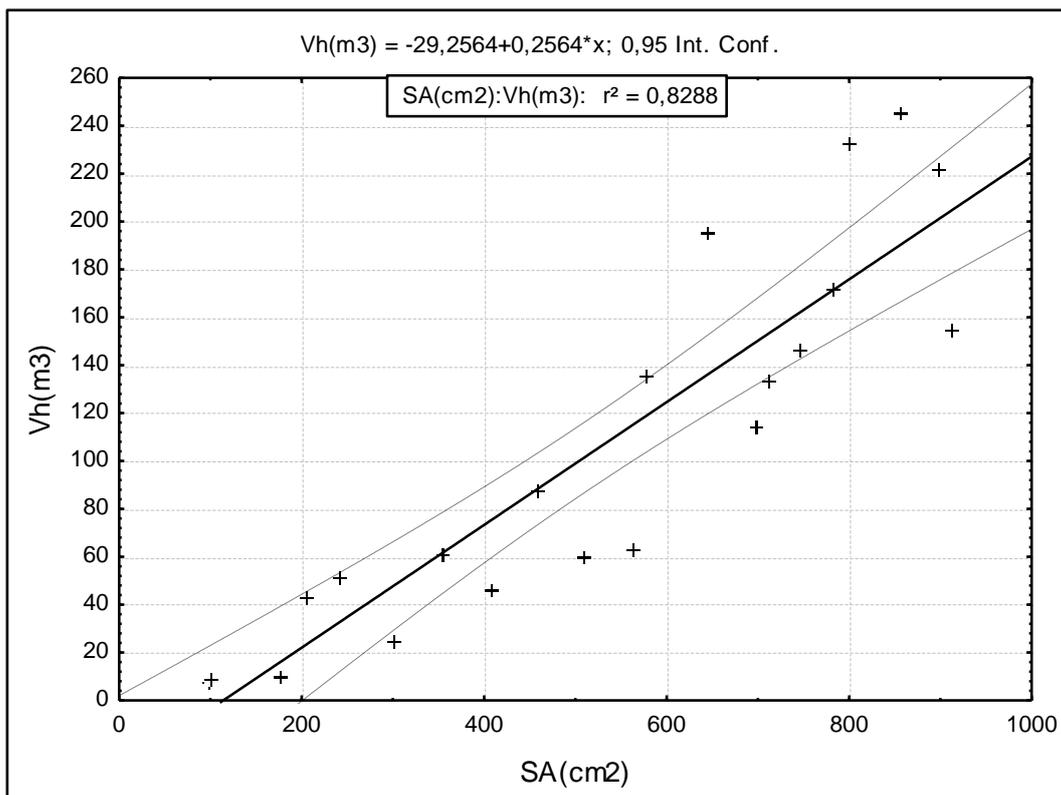


Fig.6.3 : Modèle de volume d'houppier "Vh (m³)" en fonction de l'aire d'aubier "SA (cm²)".

De la disposition du jeu des données, on peut confirmer que les modèles de régression non linéaire se sont avérés inadéquats pour prédire les deux paramètres foliaires choisis (Sh et Vh).

Les deux modèles linéaires obtenus expliquent, respectivement, 72% et 82% de la variabilité de la surface foliaire et du volume foliaire. Compte tenu de la qualité de son ajustement, le modèle utilisant le volume du houppier est le plus précis, l'emploi de ce dernier s'avère plus explicatif. Il intègre la distribution verticale du feuillage puisqu'il est calculé sur la base de la hauteur du houppier. Par contre, la surface de projection renseigne sur uniquement la grandeur horizontale du houppier, ce qui n'englobe pas la totalité des concepts expliqués par la théorie du modèle tubulaire (*pipe model*). Donc, avec le volume foliaire, cette théorie est parfaitement vérifiée. Les valeurs du ratio ( $Vh/SA = 0,25$  et  $Sh/SA = 0,027$ ) dont sa corrélation avec le statut social et la vigueur de l'arbre est clairement établie (Giroud, 2005), prouvent que l'aire d'aubier est fortement liée au volume du houppier, comparativement à sa surface.

Selon O'Hara et Valappil (1995), le tissu conducteur d'un arbre sous couvert forestier, en raison d'une demande plus faible en évapotranspiration, peut supporter une quantité plus élevée de feuillage qu'un arbre dominant de la même espèce. Par conséquent, un arbre sous couvert forestier devrait avoir des ratios plus élevés qu'un arbre dominant de la même espèce. Le ratio décroît avec l'âge et la hauteur totale de l'arbre en raison d'une diminution de la conductance hydraulique.

Par conséquent, cette relation n'est pas insensible aux conditions de croissance de l'arbre, elle se trouve modulée par le degré de compétition. Giroud (2005) a montré que l'indice de compétition est la seule variable significative à entrer dans le modèle linéaire utilisant la surface d'aubier comme estimateur principal des paramètres foliaires. Pour une surface d'aubier donnée, si la concurrence augmente alors la surface et le poids foliaires diminuent. En effet, plus la compétition autour d'un arbre est importante et plus le développement de la cime est limité. Plus la compétition est élevée et moins l'arbre produit de feuilles par unité de surface d'aubier. En effet, ce résultat confirme que, peu importe la surface d'aubier, le développement du houppier et de son feuillage est limité par la compétition environnante. En finalité, l'effet de la concurrence accrue, qui limite le développement optimal des houppiers, conduisait à des surfaces d'aubier plus faibles, donc, à des potentialités de production amoindries. Une biomasse foliaire conséquente et une large surface conductrice (aubier) devaient être de pertinents indicateurs d'une bonne croissance.

Le rôle principal des éclaircies est d'éviter l'effet réducteur de la compétition. Dans l'objectif d'étudier l'effet des éclaircies sur l'augmentation de la biomasse foliaire, donc, de l'accroissement annuel, Kokutse (2002) estime que l'application de la théorie du *pipe model* pourrait être améliorée en considérant l'accroissement de la largeur des cernes de l'année suivant l'opération au lieu du diamètre pour une estimation réaliste de l'effet d'une éclaircie.



## Évolution des proportions d'aubier et de duramen du cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica* Manetti, en Algérie.

Khellaf RABHI<sup>1</sup>, Mourad TAFER<sup>2</sup> & Mahand MESSAOUDENE<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université Hadj Lakhdar de Batna, Département d'Agronomie, 05 avenue Chahid Boukhloof, 05000 Batna, Algérie.

<sup>2</sup> Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira, Département d'Agronomie, Rue Drissi Yahia, Bouira 10000, Algérie.

<sup>3</sup> Institut Nationale de Recherche Forestière, Station Régionale de Tizi-Ouzou, BP 30 Yakouren 15365, Tizi Ouzou, Algérie.

### Résumé

Le travail est mené dans les cédraies du Belezma (Aurès), du Djurdjura (Kabylie) et de Theniet El Had (Oranie), contrastées du point de vue bioclimatique et altitudinal. Il s'inscrit dans le cadre global du projet sur le fonctionnement des cédraies algériennes. La problématique de ce travail est liée à l'absence de données sur le processus de duraminisation chez le cèdre de l'Atlas que nous considérons très utiles pour approfondir les connaissances sur la typologie des peuplements de cèdre. L'objectif est de mettre en évidence, dans un premier temps, l'évolution spatio-temporelle de la duraminisation. Sur l'ensemble des trois cédraies, 485 rondelles et carottes de bois ont été analysées.

Les résultats montrent la faible variation des proportions du duramen d'une station à l'autre au sein d'une même cédraie. Globalement, l'âge affecte positivement la formation du duramen et négativement la proportion l'aubier. L'initiation de la duraminisation apparaît plus précoce dans les cédraies de Theniet El Had et Djurdjura (14 à 17ans) et tardive dans les Aurès (20 à 30 ans). Dans cette dernière localité, le cèdre se singularise par une faible proportion d'aubier, variant de 44,65% à 49,88%. Dans tous les cas, la cédraie du Djurdjura, située dans le bioclimat le plus humide, se discrimine des deux autres cédraies par ses faibles proportions de duramen et fortes proportion d'aubier, respectivement 44,37% et 55,62%. Le classement établi pour les proportions maximales d'aubier met en premier rang la cédraie de Tala Guilef dont la proportion est de 78,23% et en dernier la cédraie du Belezma avec un taux moyen de 67,97%. Il se dégage de ce fait une tendance à l'évolution des proportions d'aubier en fonction du gradient bioclimatique en allant du per-humide au semi-aride. Aussi, ce travail met en évidence la très faible proportion de l'aubier chez les arbres dépérissants dont la valeur moyenne est de 45,88%.

**Mots clés :** Algérie, aubier, duramen, âge, cèdre de l'Atlas.

## **Abstract:**

### **Evolution of the proportion of Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) sapwood and heartwood in Algeria.**

The work is carried out in the cedar forests of Belezma (Aures), Djurdjura (Kabylia) and Thaniet El Had (Orania), contrasting from bioclimate and elevation. It is part of project on the functioning of Algerian cedar forests. The aim is to highlight the spatio-temporal evolution of the heartwood and sapwood. On all three cedar forests, 485 washers or wood cores were analyzed.

The results show little change in proportions of heartwood in station to another within the same cedar forest. Overall, age affects positively the formation of heartwood and negatively sapwood. The initiation to duraminisation appears earlier in the Thaniet El Had and Djurdjura cedar forests (14 to 17 years) and late in the Aures (20-30 years). In adverse environments, the process occurs late and is distinguished by a small proportion of sapwood. In all cases, the Djurdjura cedar forest located in the wettest bioclimate is discriminated from the other by its low proportions of heartwood and high of sapwood. The ranking for the highest proportions of sapwood puts in the first rank the Tala Guilef (Djurdjura) cedar forest and in the last Belezma (Aures) cedar forest. It emerges from this a trend in the evolution of the sapwood based on bioclimatic gradient going from hyper-humid to semi-arid. Also, this work highlights the very low proportion of sapwood in declining trees.

**Keywords:** Algeria, sapwood, heartwood, age, Atlas cedar.

## **Introduction**

La transformation de l'aubier en bois de cœur s'accompagne de modifications chimiques et physiques affectant la qualité de bois et conditionnant souvent ses possibilités d'emploi. Ce processus général peut être rattaché au phénomène naturel de vieillissement, d'accumulation d'air dans les tissus cellulaires devenus clos, puis de la dévitalisation du parenchyme par des micro-organismes ou de mortalité sous l'effet d'une accumulation de polyphénols atteignant un seuil de toxicité (POLGE, 1982). TAYLOR et *al.* (2002) estiment que la formation du duramen s'accompagne d'un changement de l'activité enzymatique, de la formation de produits d'extraction et de la mort des cellules de parenchyme, dont résulte la transformation de l'aubier en duramen.

Il existe le plus souvent une corrélation étroite entre le diamètre des arbres et la largeur de leur aubier, ce dont il peut être déduit que la duraminisation est un processus régulateur destiné à limiter la surface relative de l'aubier pour les besoins de conduction de la sève brute (BAMBER, 1976). La connaissance de l'évolution spatio-temporelle de l'aubier permet d'appréhender la vitalité et la capacité de stockage en eau des arbres (LONGUETAUD, 2005). Par exemple, les épicéas présentent des surfaces d'aubier beaucoup plus faibles lorsqu'ils sont soumis à une défoliation (LONGUETAUD, 2005). GRANIER (1981), JEFFREY et LACHENBRUCH

(2009) ont montré que la largeur d'aubier chez de nombreuses espèces était proportionnelle à la surface foliaire ou bien à la masse foliaire. En sylviculture, l'aubier est considéré comme un excellent indicateur de la qualité de la station, de la vigueur de la végétation et du patrimoine héréditaire (POLGE, 1964). À ce titre, la densité par hectare des arbres d'une forêt est négativement corrélée avec les proportions respectives du duramen et de l'aubier (JEFFREY et LACHENBRUCH, 2009). S'agissant enfin de l'influence des conditions environnementales, l'aubier s'avère être lié davantage aux précipitations annuelles, contrairement au duramen (CLIMENT *et al.*, 1993). De l'avis de ces mêmes auteurs, les proportions de ces deux types de bois sont dépendantes de l'état du fonctionnement physiologique des arbres en relation avec les conditions stationnelles.

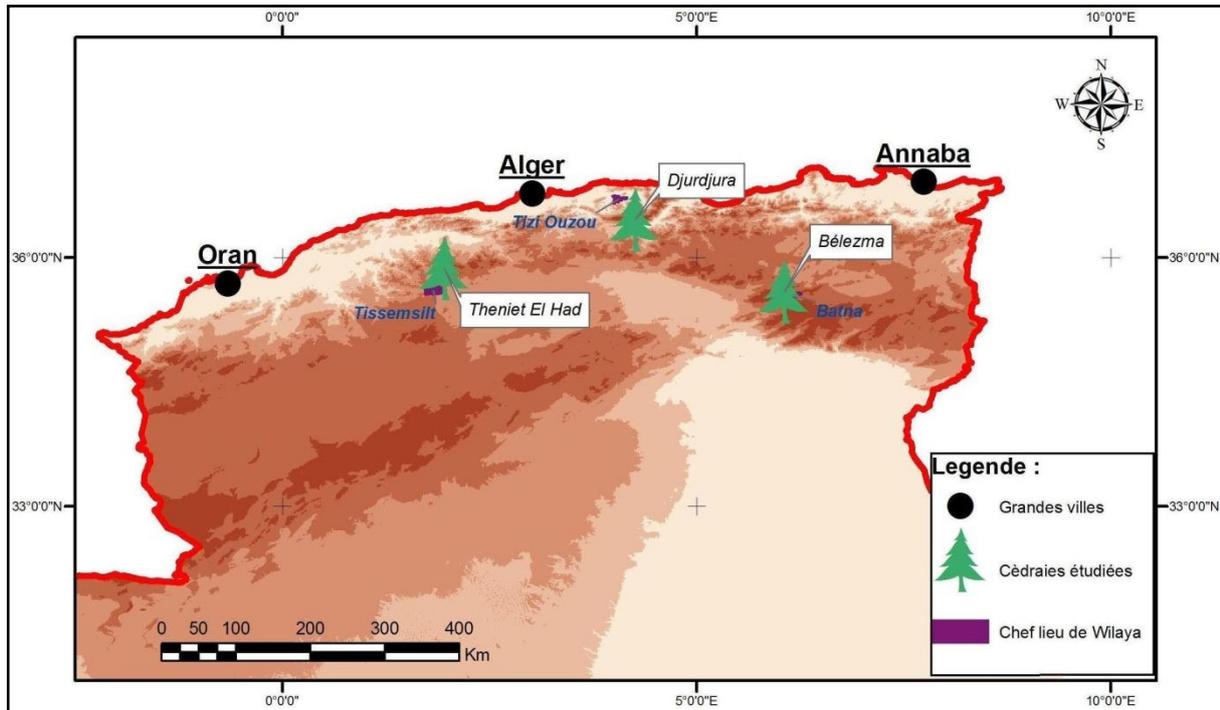
Dans cette étude, le fonctionnement spatio-temporel de l'aubier et du duramen du cèdre de l'Atlas, *Cedrus atlantica* Manetti, a été investigué dans trois cédraies algériennes contrastées du point de vue bioclimatique, édaphique et topographique : Theniet El Had (Tissemsilt), Djurdjura (Tizi-Ouzou et Bouira) et Belezma (Batna). Ce travail s'inscrit dans le contexte global d'un programme de recherche sur le fonctionnement éco-physiologique du cèdre, en relation avec l'âge et les divers descripteurs du milieu.

## Matériel et méthodes

Le matériel végétal étudié a été prélevé dans les cédraies du Belezma, du Djurdjura et de Theniet El Had (figure 1).

La cédraie de Belezma se situe dans la partie orientale de l'Algérie, près de la ville de Batna, et fait partie du grand massif montagneux des Aurès et du Parc National éponyme. Son confinement dans la zone méridionale de hautes montagnes continentales, sise à la limite des grandes influences méditerranéennes et sahariennes, détermine sa particularité. Son altitude varie de 1 300 à 2 180 m, et la cédraie pure et mixte (cèdre et chêne vert) couvre une superficie de 5 680 hectares. Du point de vue pédologique, ABDESSEMED (1981) relève la présence de sols bruns calcaires et de rendzines dolomitiques. Les deux zones de Boumerzoug et Touguert se caractérisent par des sols bruns calcaires faiblement profonds et squelettiques. Globalement, le Belezma est confiné dans le bioclimat semi-aride à hiver froid.

La cédraie du Parc National du Djurdjura chevauche sur les départements de Tizi-Ouzou et de Bouira. C'est une zone de montagnes très escarpée, constituée de plusieurs chaînes calcaires composées de terrains sédimentaires fortement plissés et fracturés. Les sols sont de deux types, calcimagnésiques peu évolués et bruns forestiers acides. Le Djurdjura renferme deux cédraies bien venantes culminant à 1 450 m d'altitude : Tikjda en exposition sud et Tala Guilef en exposition nord. Ces deux cédraies n'ont pas été soumises au dépérissement ayant affecté celles du Belezma et Theniet El Had. Cette zone est située dans l'une des régions les plus arrosées et neigeuses d'Algérie, où la tranche pluviométrique annuelle est de l'ordre 1 200 à 1 500 mm/an. Les deux cédraies sont respectivement dans les bioclimats perhumide et humide supérieur à hivers frais (DERRIDJ, 1990).



**Figure1** : Situation géographique des trois cédraies étudiées en Algérie.

La cédraie de Theniet El Had (TEH) est située sur le versant sud de l'Atlas tellien et distante d'environ 50 km du chef-lieu du département de Tissemsilt. Elle représente l'unique cédraie occidentale d'Algérie. Les peuplements de cèdre de l'Atlas apparaissent à partir de 862 m d'altitude, pour atteindre le point culminant de 1 787 m. Les sols sont peu évolués, d'apport colluvial, non carbonatés, peu profonds, jalonnés souvent par la roche mère et entrecoupés d'escarpements rocheux. Cette cédraie appartient à l'étage bioclimatique subhumide à hiver froid, où la saison sèche s'étale du mois de mai jusqu'au mois de septembre. Les précipitations annuelles sont irrégulières et s'élèvent en moyenne à 792 mm/an (DGF, 2006).

Dans le Belezma, deux zones sont concernées par l'échantillonnage, le Djebel Boumerzoug et le Djebel Touguert. Selon quelques critères de milieu (la profondeur du sol, la pente, l'altitude et l'exposition), trois stations ont été décrites à Boumerzoug (B1, B2 et B3) et deux à Touguert (T1 et T2). Au Djurdjura, les sondages ont été réalisés à Tikjda (Tik) et à Tala Guilef (TG). À Theniet El Had (TEH), seulement une zone a été choisie. Dans la perspective d'appréhender l'impact de l'effet de l'état sanitaire des arbres sur la duraminisation, une centaine d'arbres sains (Sa) et dépourvus (Dp) ont été sondés dans la cédraie du Belezma. Les stations ont été décrites en détail suivant 7 critères : le nombre d'arbres (N) ; l'âge moyen ; le diamètre moyen ; la pente (p) ; l'altitude ; la profondeur du sol (P. sol) ; le bioclimat (tableau I).

Dans cette étude, la pente moyenne et la profondeur du sol ont été estimées pour chaque station. Ainsi, la pente a été classée faible si  $p < 12\%$ , moyenne pour  $12\% < p < 25\%$ , et forte si  $p > 25\%$ . La profondeur du sol a été subdivisée en trois niveaux : faible (1), moyen (2) et élevé (3).

En raison de l'importance du nombre d'échantillons et du statut de protection du cèdre de l'Atlas, une méthode non destructive a été appliquée, basée sur des prélèvements de carottes de 5 mm de diamètre assurés à l'aide d'une tarière de Presler. Par contre, sur les souches issues des coupes d'assainissement, des rondelles ont été prélevées. Contrairement à d'autres espèces où la ligne de séparation du duramen et de l'aubier est difficile à circonscrire en raison de la présence d'une zone de transition, chez le cèdre de l'Atlas, elle est plus facile à distinguer. De fait, l'approche de DE KORT (1993), consistant à délimiter l'aubier et le duramen visuellement, a été mise en œuvre.

Après ponçage, polissage et préparation des carottes et des rondelles, les paramètres mesurés ont été les suivants :

- AD : âge du duramen (nombre de cernes) ;
- AA : âge de l'aubier (nombre de cernes) ;
- AT : âge total ;
- SD : surface du duramen (cm<sup>2</sup>) ;
- SA : surface de l'aubier (cm<sup>2</sup>) ;
- RT : Rayon total sous-écorce de la carotte ou de la souche (cm) ;
- %SD : proportion en surface de duramen ;
- %SA : proportion en surface d'aubier.

Les proportions surfaciques du duramen et de l'aubier ont été exprimées en pourcentage de la surface totale sous écorce. L'évolution de la proportion de l'aubier avec l'âge a été modélisée selon des régressions linéaires de forme générale :

%SA = a AT + b, où a et b sont des constantes à estimer.

Trois corrélations ont été étudiées :

- surface du duramen – surface terrière (SD-G) ;
- surface d'aubier – surface terrière (SA-G) ;
- proportion de la surface d'aubier – croissance moyenne (%SA-Cr.moy).

La détermination de l'âge à partir duquel le premier cerne se duramine a été assurée à l'aide de régressions faisant intervenir le nombre de cernes du duramen (AD) comme facteur expliqué, et l'âge total comme facteur explicatif. Le point d'intersection des deux axes représente l'âge d'initiation de la duraminisation. D'après la répartition et la tendance affichée par le nuage de points, la forme linéaire de forme générale [ $y = a.x + b$ ] a été retenue. Des modèles polynomiaux d'ordre 2 de forme [ $y = a.x^2 + b.x + c$ ] peuvent aussi être utilisés. Mais bien qu'ils aient montré un bon ajustement pour plusieurs exemples traités dans la littérature (LONGUETAUD, 2005), ils ne permettent pas toujours d'interpréter l'intersection de la courbe avec l'axe des abscisses comme étant l'âge d'initiation du duramen, l'ajustement aux données conduisant parfois à un âge d'initiation négatif.

Dans les régressions  $AD = f(AT)$ , la pente de chaque modèle linéaire, estimée en nombre de cernes duraminisés annuellement, représente l'expansion du duramen ou la fraction de l'aubier qui se transforme en duramen annuellement. La variation de la vitesse d'expansion du duramen, suivant l'âge de l'arbre, est étudiée par l'estimation de la vitesse de duraminisation

(mm/an) par intervalle de 20, 30 et 40 ans choisis en fonction de la disponibilité des échantillons.

Le traitement des données a été axé sur des analyses descriptives, des corrélations ainsi que des régressions réalisées avec le logiciel Statistica.

**Tableau I.** Description des stations échantillonnées dans les trois cédraies.

	Belezma					Djurdjura	Theniet El Had	État Sanitaire		
	Djebel Boumerzoug			Djebel Touguert						
Stations	B1	B2	B3	T1	T2	Tik	TG	TEH	Sa	Dp
Nombre d'arbres (N)	70	120	67	64	103	53	78	30	35	65
Age moyen	115,37	126,67	140,07	111,52	103,41	65,81	74,30	106,76	78,42	96,56
Diamètre moyen	17,08	20,90	26,86	35,22	24,12	35,20	31,62	37,88	25,94	24,58
Pente (p)	faible	moyenne	forte	faible	forte	forte	forte	moyenne	moyenne	forte
Altitude	1 400	1 400	1 470	1 400	1 550	1 450	1 450	1 050	1 400	1 470
Profondeur du sol	1	1	1	2	1	3	3	2	1	1
Bioclimat	Semi-aride					H	PH	SH	Semi-aride	

PH : Per-humide ; H : Humide ; SH : Subhumide ; La pente a été classée faible si  $p < 12\%$ , moyenne pour  $12\% < p < 25\%$ , et forte si  $p > 25\%$ .

## Résultats et discussion

### *Proportion d'aubier et du duramen*

Les proportions des deux types de bois affichent des valeurs proches, les différences ne dépassant pas 6 %. À l'intérieur de la même cédraie, les proportions du duramen (%SD) varient faiblement d'une station à l'autre. Elles oscillent de 50,11 % à 55,34 % au Belezma (Aurès), de 43,47 % à 45,27 % au Djurdjura, et atteignent 48,43 % à Theniet El Had. Le groupe d'arbres dépérissants et la station T1 présentent des proportions relativement plus élevées (%SD = 54,11 % et 55,34 %), mais la cédraie du Djurdjura détient les plus faibles proportions (%SD = 43,47 % et 45,27 %) (Tableau II, figures 2a, 2b et 2c).

Contrairement au duramen, les proportions d'aubier enregistrées dans les deux cédraies du Djurdjura sont les plus élevées (%SA = 54,72 et 56,52) ; vient ensuite celle de Theniet El Had (%SA=51,56), puis celles du Belezma (%SA = 51,13 et 45,88). Ce classement par rapport aux proportions maximales de l'aubier, bois fonctionnel, semble caractériser davantage les cédraies situées dans le bioclimat très humide, ce qui est le cas de celle de Tala Guiléf, située

dans le per-humide et exposée au nord. Il apparaît donc une tendance d'évolution de l'aubier en fonction d'un gradient bioclimatique allant du per-humide au semi-aride, voire un effet régional sur la quantité d'aubier. De fait, la cédraie du Djurdjura semble présenter les conditions de croissance les plus favorables pour la formation d'un épais aubier et être plus fertile (BAMBER, 1987 ; PINTO *et al.*, 2004). Dans ce sens, POLGE (1964) note que la proportion d'aubier est un bon indicateur de la fertilité de la station, tandis que CLIMENT *et al.* (1993) considèrent qu'elle est beaucoup plus liée aux précipitations annuelles.

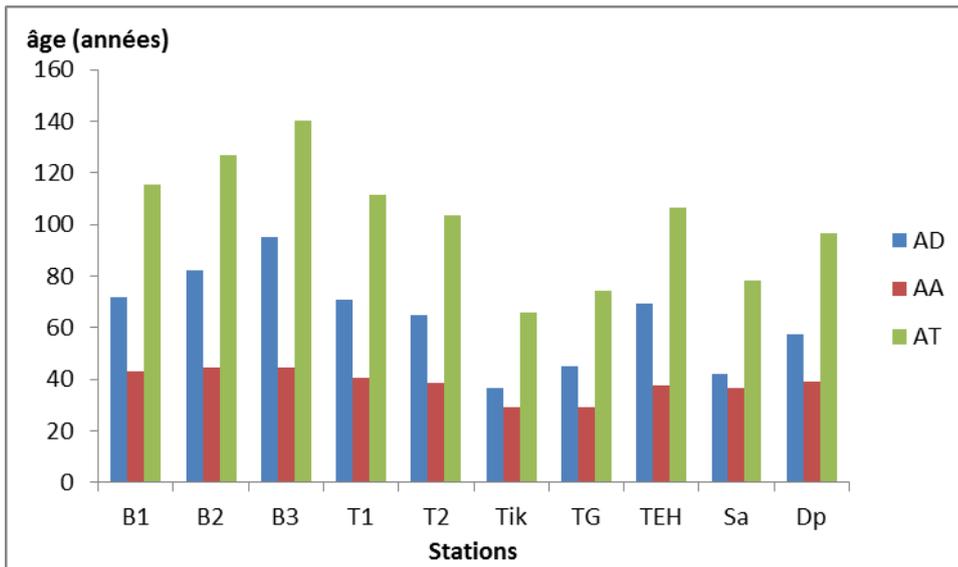
**Tableau II.** Présentation des résultats des mesures effectuées dans les trois cédraies.

Stations	Belezma					Djurdjura		Theniet El Had	Belezma	
	Djebel Boumerzoug			Djebel Touguert						
	B1	B2	B3	T1	T2	Tik	TG	TEH	Sa	Dp
AD	72,08	82,28	95,36	70,80	64,98	36,81	44,95	69,20	41,98	57,46
AA	43,28	44,39	44,71	40,71	38,43	29,00	29,34	37,52	36,44	39,10
AT	115,37	126,67	140,07	111,52	103,41	65,81	74,30	106,76	78,42	96,56
SD	139,77	233,91	368,81	675,96	299,67	453,70	354,32	549,54	263,59	290,34
SA	119,66	192,24	293,41	434,76	247,10	560,02	449,96	600,10	270,41	214,59
ST	259,43	426,16	662,23	1110,71	546,76	1013,73	804,28	1149,64	534,01	504,94
%SD	51,07	50,51	51,41	55,34	50,11	45,27	43,47	48,43	48,86	54,11
%SA	48,92	49,48	48,58	44,65	49,88	54,72	56,52	51,56	51,13	45,88

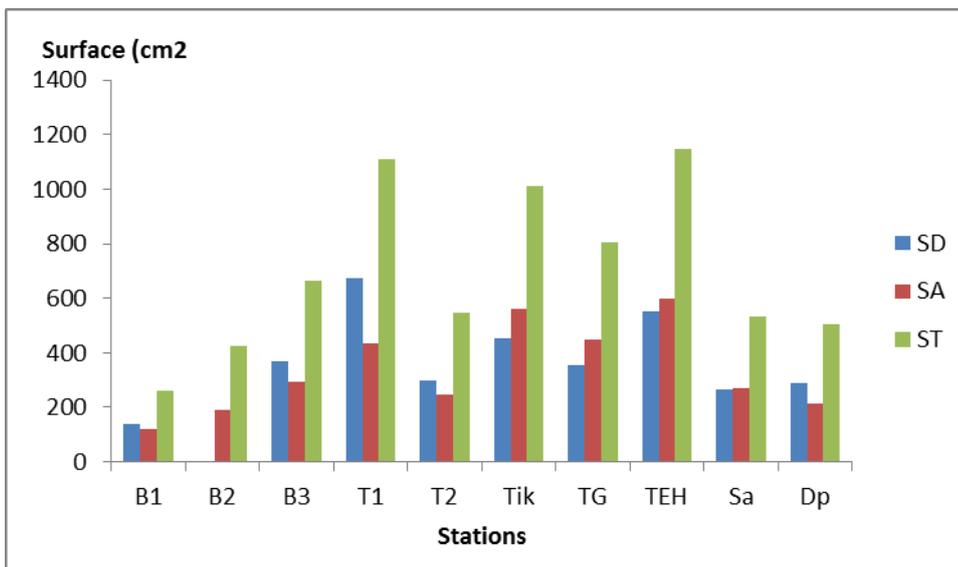
Bien qu'il soit démontré que la proportion d'aubier diminue avec l'âge (DE KORT, 1993), les résultats obtenus ne peuvent être rattachés à ce facteur, d'autant plus que l'âge moyen de la cédraie de Tala Guilef (74 ans) est supérieur à celui de Tikjda (66 ans), alors que ceux de Theniet Had et Belezma sont très proches (106 et 119 ans).

Au Belezma, la comparaison entre les arbres sains (Sa) et dépérissants (Dp) montre que les cèdres sains ont un aubier plus épais, avec des valeurs de %A s'élevant respectivement à 51,13 % et 45,88 %. Le test de Student pour comparer les deux échantillons a révélé que la différence était significative au seuil alpha 0,05 ( $t = 2,4920$  ;  $P = 0,0134$ ). Ce résultat corrobore ceux d'auteurs notant que le mauvais état sanitaire des arbres réduit la proportion d'aubier. HAZENBERG et YANG (1991) et JEFFREY et LACHENBRUCH (2009) mettent en évidence une relation de cause à effet entre l'aubier d'une part et la taille des couronnes et la biomasse foliaire fonctionnelle d'autre part. DE KORT (1993) déduit que la vitalité des arbres est dépendante de leur état sanitaire, et que les plus faibles valeurs de l'aubier correspondent aux arbres les moins vitaux. Ainsi, le dépérissement observé dans la cédraie du Belezma, marqué par des pertes progressives de la biomasse foliaire et l'assèchement des branches, expliquerait cette tendance à la décroissance de l'aubier chez les arbres dépérissants (Dp).

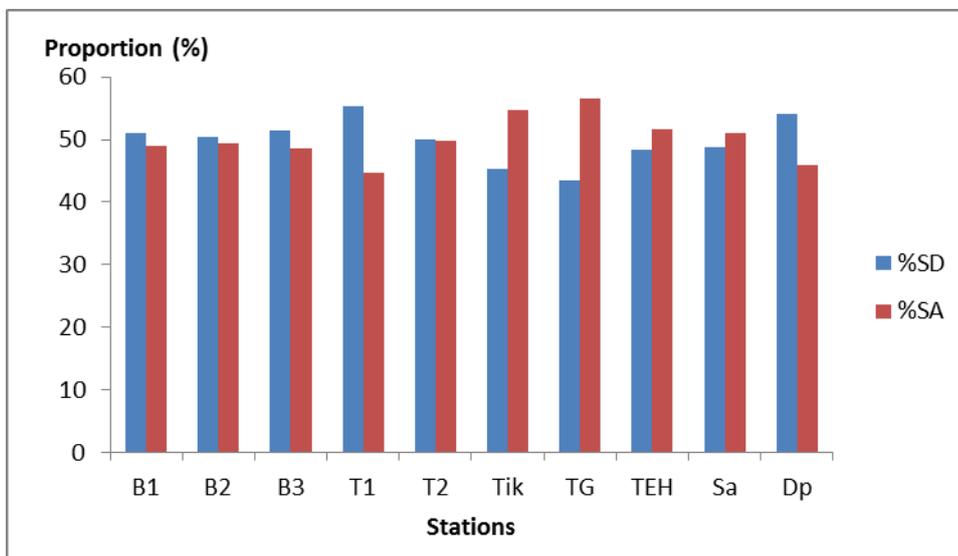
Dans tous les cas, les conditions topographiques (altitude et pentes) ne semblent pas influencer les proportions des deux types de bois (aubier et duramen). À ce stade de l'analyse et en s'appuyant sur le test de Student, les différences entre les stations du Belezma ne sont pas significatives au seuil  $\alpha = 0,05$ . Le même constat est noté pour l'influence éventuelle de la profondeur du sol.



**Fig.2a** : Présentation schématique des âges (total, du duramen et de l'aubier) des échantillons.



**Fig.2b** : Présentation schématique des surfaces (total, du duramen et de l'aubier) des échantillons.



**Fig.2c** : Présentation schématique des proportions en surface du duramen et de l'aubier.

### *Évolution de la proportion de l'aubier avec l'âge*

Pour toutes les stations, les modèles linéaires ajustés entre la proportion d'aubier et l'âge montrent que la proportion d'aubier maximale (SA% max) observée sur les jeunes sujets varie de 61,20 % (B2) à 91,90 % (Dp) (tableau III). Les coefficients négatifs affichés par tous les modèles renseignent sur la tendance baissière qui caractérise la proportion d'aubier avec l'âge. En effet, une baisse annuelle très élevée est notée pour les arbres dépérissants (Dp). Elle est de 0,487 % par an, alors que le rythme de diminution le plus faible est observé dans la station B2 (0,092 %/an). Dans la majorité des cédraies, les modèles linéaires déduits sont significatifs, à l'exception de ceux obtenus des stations B1, T2 et TEH.

On peut admettre que l'âge de l'arbre affecte positivement la proportion de duramen et négativement la proportion d'aubier. En effet, nous savons que les proportions d'aubier et de duramen dans un arbre dépendent de la vitesse de croissance et de celle de l'expansion du duramen. L'activité cambiale diminue avec le vieillissement de l'arbre, contrairement à la croissance du duramen, ce qui explique nos résultats. Dans la même optique, DE KORT (1993) montre que les plus vieux arbres du sapin baumier ont le taux le plus faible d'aubier, contrairement aux plus jeunes où la proportion d'aubier est élevée.

**Tableau III.** Les modèles de la proportion d'aubier en fonction de l'âge total : %SA = f(AT).

Stations	Modèles ajustés	R <sup>2</sup>	SA% max.	Diminution %A/an
<b>B2</b>	%SA=-0,092AT+61,20	0,32	61,20	0,092
<b>B3</b>	%SA=-0,124AT+65,66	0,23	65,66	0,124
<b>T1</b>	%SA=-0,300AT+77,06	0,25	77,06	0,300
<b>Tik</b>	%SA=-0,283AT+73,34	0,38	73,34	0,283
<b>TG</b>	%SA=-0,292AT+78,23	0,30	78,23	0,292
<b>Sa</b>	%SA=-0,178AT+66,27	0,43	66,27	0,178
<b>Dp</b>	%SA=-0,487AT+91,90	0,46	91,90	0,487

Prenant en compte l'effet de l'âge sur ce processus, la production de bois riche en duramen tel que recherché pour la construction est favorisée par une croissance lente et une exploitation tardive. Cependant, la production de bois avec une faible proportion de duramen, comme il est préconisé pour les industries papetières, est favorisée par une croissance rapide et une récolte précoce. Les traitements sylvicoles ayant comme objectif l'accélération de la croissance radiale contribueraient à cet objectif. De ce point de vue, JEFFREY et LACHENBRUCH (2009) remarquent que les arbres dominants montrent un pourcentage élevé d'aubier et que l'élargissement des couronnes résultant notamment des éclaircies s'accompagne d'une augmentation de la proportion d'aubier. POLGE (1985) observe que les arbres sévèrement élagués présentent une accélération de la duraminisation et un pourcentage plus élevé de bois de cœur. Ce résultat est expliqué par la théorie d'efficacité de la duraminisation de BAMBER (1976) puisque la diminution du volume du houppier par les élagages sévères entraîne des besoins moindres de circulation de sève, nécessitant donc des surfaces plus faibles d'aubier.

Des corrélations positives très fortes sont notées pour la relation rayon du duramen – rayon total (D-RT) (tableau IV). À part les arbres dépérissants (Dp), les corrélations positives observées entre la surface d'aubier (SA) et la surface terrière (G) sont hautement significatives, dépassent dans tous les cas 0,81 et atteignent 0,96 (tableau IV). Ce résultat indiquerait que les arbres ont besoin d'un taux particulier d'aubier pour assurer un parfait fonctionnement. Dans la mesure où la quantité d'aubier doit être continuellement accrue avec la croissance de la couronne, l'augmentation de la biomasse foliaire agirait aussi positivement sur la croissance. Le taux optimum d'aubier est maintenu par la formation du duramen, celle-ci agissant alors comme un mécanisme de régulation pour contrôler la quantité d'aubier. L'efficacité de cette régulation a été mise en évidence par BAMBER (1976). L'auteur met ce processus régulateur en relation directe avec les dépenses relatives à l'alimentation des cellules vivantes de l'aubier excédentaire que l'arbre reconvertit en matériaux inertes, dont résulte la formation de duramen. Les corrélations significatives observées convergent vers la théorie de BJÖRKLUND (1999) suggérant que le duramen est produit avec une fraction constante de l'accroissement annuel. Ces corrélations peuvent donc être attribuées au fait qu'une partie constante de l'accroissement annuel se transforme en duramen. Ces résultats sont confortés par les corrélations positives constatées entre la proportion en surface d'aubier (%SA) et la croissance moyenne en millimètre par an. À l'exception de la station TEH pour laquelle nous avons noté une absence de corrélation linéaire ( $r = 0,08$ ), les autres stations montrent des corrélations positives significatives (tableau IV), ce qui révèle que la croissance ralentit quand la proportion d'aubier diminue.

**Tableau IV.** Présentation des résultats des corrélations.

Paramètres	B1	B2	B3	T1	T2	TEH	Tik	TG	Sa	Dp
<b>D-RT</b>	0,95	0,98	0,98	0,98	0,97	0,68	0,85	0,81	0,84	0,90
<b>SA-G</b>	0,96	0,94	0,90	0,87	0,92	0,83	0,92	0,81	0,78	0,66
<b>%SA-Cr.moy.</b>	0,24	0,28	0,26	0,47	0,23	0,08	0,30	0,45	0,60	0,52

$r$  critique = 0,22 (valeur au-dessous de laquelle le coefficient de corrélation reste non significatif).

### *L'âge d'initiation de la duraminisation*

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau V et la figure 3. L'âge d'initiation de la duraminisation est plus précoce dans les cédraies de Theniet El Had et Tikjda où ce processus démarre approximativement dès l'âge de 14 ans. Au Djurdjura, un décalage de deux ans et demi s'observe entre les deux cédraies (Tikjda et Tala Guilef) où le démarrage est plus tardif à Tala Guilef (environ 17 ans). Au Belezma, ce processus intervient à des âges compris entre 25 et 30 ans à Djebel Boumerzoug alors qu'il est moins tardif à Djebel Touguert (20 à 24 ans) (tableau V). À ce stade d'analyse, l'effet de la station sur l'âge d'initiation de la duraminisation apparaît bien.

**Tableau V.** Les modèles de l'âge du duramen en fonction de l'âge total :  $AD = f(AT)$ .

	Stations	Relations ajustés	$r^2$	X : y=0	Tx.dur. mm/an
Belezma (Aurès)	B1	$AD = 0.917AT - 23.21$	0.83	25.31	0.49
	B2	$AD = 0.818 AT - 21.43$	0.95	26.19	0.53
	B3	$AD = 0.868 AT - 26.03$	0.94	29.98	0.30
	T1	$AD = 0.796 AT - 16.17$	0.94	20.31	1.19
	T2	$AD = 0.814 AT - 19.22$	0.89	23.61	0.83
Djurdjura	Tik	$AD = 0.713 AT - 10.14$	0.68	14.22	1.82
	TG	$AD = 0.687 AT - 11.47$	0.93	16.69	1.43
Theniet El Had	TEH	$AD = 0.754 AT - 10.66$	0.77	14.13	1.40
Belezma	Sa	$AD = 0.735 AT - 12.73$	0.91	17.32	1.29
	Dp	$AD = 0.909 AT - 30.35$	0.86	30.65	0.94

Dans tous les cas, un gradient de démarrage de la duraminisation se dessine et semble prendre en compte la vitalité des peuplements ainsi que la position bioclimatique des cédraies. Au Belezma, la comparaison des données de Touguert (exposition nord) et ceux de Boumerzoug soumis aux influences sahariennes (exposition sud) permet de conclure que les arbres évoluant dans des conditions de croissance difficiles tendent à retarder le démarrage de ce processus. Ce dernier démarre à un âge moyen d'environ 31 ans. La duraminisation est en outre plus précoce au sein des cédraies du Djurdjura évoluant dans le per-humide, et plutôt tardive dans les cédraies méridionales comme celle du Belezma, en zone semi-aride. DE KORT (1993) et BJÖRKLUND (1999) concluent que chez la plupart des arbres forestiers, dans des conditions environnementales favorables, la duraminisation tend à démarrer à des âges très jeunes. Cependant, son initiation peut être différente en fonction de l'essence, du contraste du milieu et de la provenance. Par comparaison, elle se manifeste à 17 ans pour l'épicéa commun (LONGUETAUD, 2005), 41 ans pour le bouleau (GIRAUD, 2005) et 9 à 38 ans pour les pins (HAZENBERG et YANG, 1991; BJÖRKLUND, 1999; PINTO *et al.*, 2004). Citant plusieurs travaux, BJÖRKLUND (1999) confirme que l'âge d'initiation varie également au sein d'une même essence ; chez le pin sylvestre par exemple, il est de 30-40 ans en Finlande et en Allemagne (KUHN, 1918 ; LAPPI-SEPPALA, 1952), mais s'abaisse à 25 ans en Suède (FRIES et ERICSSON, 1998).

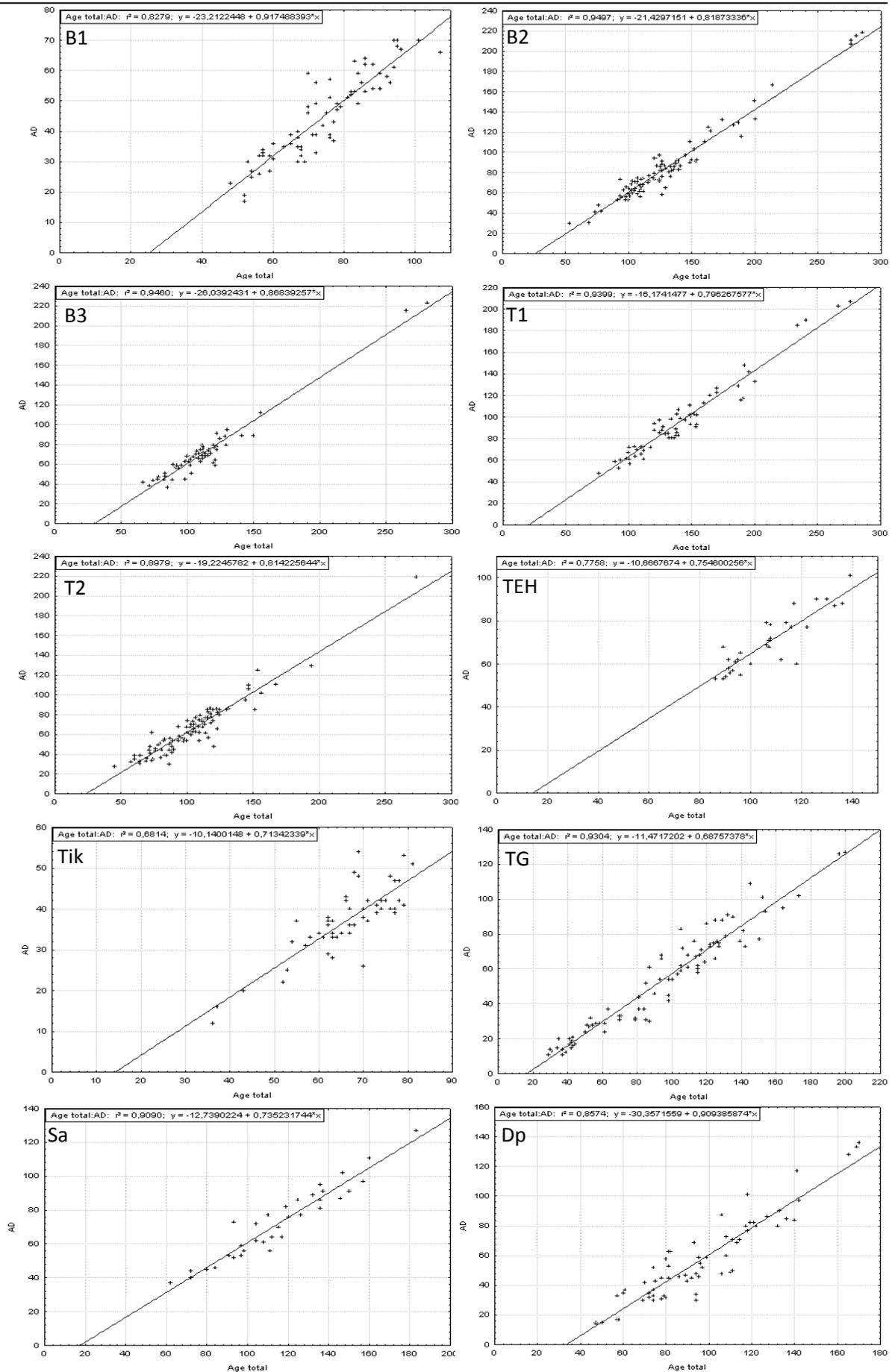


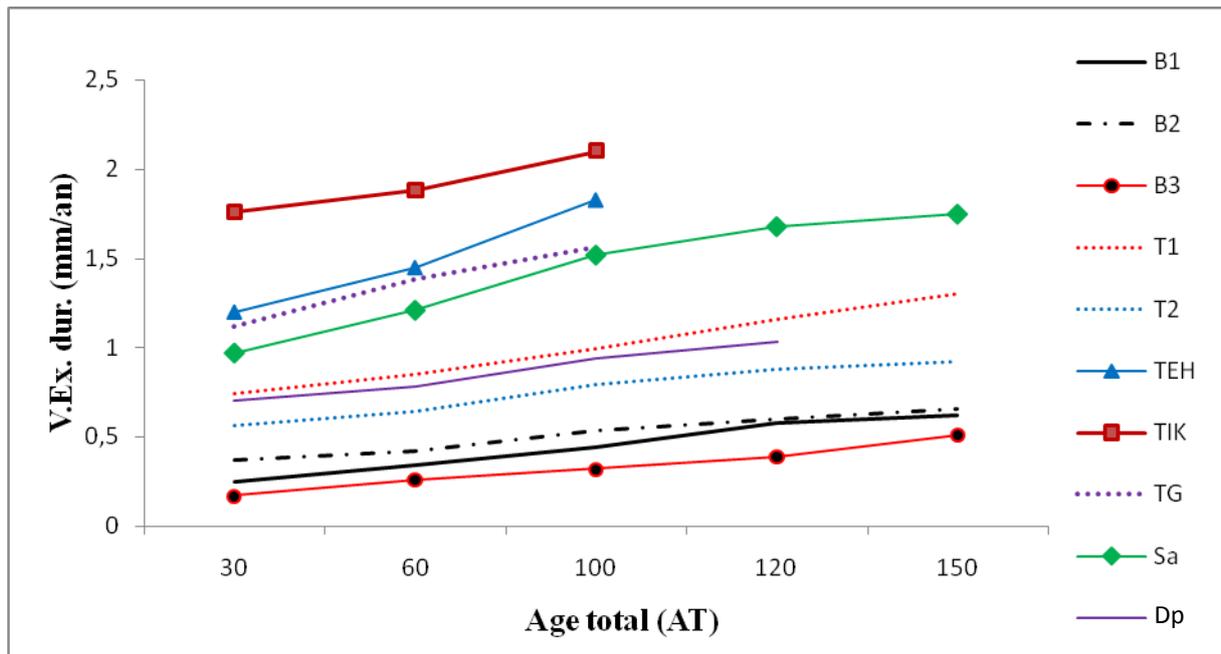
Figure 3 : Les modèles de l'âge du duramen (AD) en fonction de l'âge total (AT) :  $AD = f(AT)$ .

### ***L'expansion du duramen***

Les résultats relatifs à la vitesse d'expansion du duramen, représentée par la pente de chaque modèle linéaire et estimée en nombre de cernes duraminisés par année, ne diffèrent pas grandement ; ils varient de 0,687 (TG) à 0,917 cernes /an (B1) (tableau V). Pour prendre en compte le rythme de croissance radiale qui diffère *a priori* d'une cédraie à une autre, la vitesse de duraminisation transformée en millimètre de rayon duraminisé par année montre que globalement, les taux obtenus sont d'autant plus élevés que les arbres évoluent dans des conditions favorables. Ainsi, la cédraie de Tikjda se singularise et montre un rythme de duraminisation annuel plus important (1,82 mm/an) qu'à Tala Guilef et Theniet El Had. Le plus faible rythme de duraminisation est observé au niveau des stations du Belezma et du groupe d'arbres dépérissants. BAMBER (1987) suggère que la formation de duramen pour *Pinus radiata* est encouragée par des conditions hydriques favorables. Cette vitesse est comprise entre 0,5 à 1 cerne/année chez le genre *Pinus* (HAZENBERG et YANG, 1991 ; BJÖRKLUND, 1999 ; PINTO *et al.*, 2004). Pour expliquer cette tendance à l'expansion du duramen, ces auteurs ont développé des modèles de régression reliant l'âge à la quantité de duramen.

Dans cette étude, les résultats montrent que la tendance à l'évolution est plus ou moins similaire entre les stations (figure 4). Les courbes présentent le même profil, ce qui signifie que le contraste écologique qui caractérise les dix échantillons n'affecte pas cette évolution. À l'exception du groupe d'arbres dépérissants (Dp) sur lequel nous observons une relative stabilité avec l'âge, les autres montrent une augmentation de la vitesse de duraminisation. En revanche, le groupe d'arbres sains (Sa) suit une certaine linéarité où le rythme d'augmentation est faible. Chez le sapin baumier, le duramen augmente à un taux moyen de 0,81 cerne/an de 10 à 90 ans, puis progresse ensuite pour atteindre un cerne par an. Cette augmentation avec l'âge est expliquée par les besoins de soutien mécanique de plus en plus élevés de l'arbre (HAZENBERG et YANG, 1991).

La diminution de l'accroissement annuel de la croissance radiale, observée chez le cèdre sur de longues chronologies par plusieurs auteurs (MESSAOUDENE *et al.*, 2004 ; SARMOUM, 2008 ; ALILECHE, 2011), laisse penser que le taux de duraminisation augmenterait avec une amplitude beaucoup plus importante s'il était exprimé en cernes/an. Cette constatation est confortée par les résultats de POLGE (1982), qui a mis en évidence que pour les arbres fortement concurrencés, soumis à des compétitions très accrues, l'aubier, aussi mince soit-il, se maintient sur une période de temps relativement longue. Dans notre cas, la formation de cernes minces dans l'aubier résulterait du vieillissement des arbres.



**Figure 4.** Évolution du taux de duraminisation du cèdre (mm/an) en fonction de l'âge.

## Conclusion

Dans ce travail, le processus de duraminisation du bois de cèdre de l'Atlas d'Algérie a été étudié à l'échelle de trois cédraies contrastées du point de vue des conditions de milieu, notamment bioclimatique. Globalement, l'effet station apparaît influencer les taux du duramen et d'aubier, mais l'évolution temporelle de la vitesse d'expansion du duramen n'est pas dépendante des conditions de milieu. Par contre, la part d'aubier transformée annuellement en duramen est étroitement liée aux conditions climatiques ; les taux de duraminisation les plus élevés caractérisent les cédraies situées dans les bioclimats per-humide et humide (Tikjda et Tala Guilef dans le Djurdjura). Quelle que soit la cédraie, en situation défavorable, l'arbre a tendance à contenir davantage de duramen, et donc une proportion faible d'aubier. L'état sanitaire de l'arbre, plus particulièrement l'état de son houppier, exerce un effet prépondérant sur la proportion d'aubier ; les arbres dépérissants présentent des proportions d'aubier très faibles.

L'âge d'initiation de la duraminisation est d'autant plus précoce que les arbres évoluent dans des conditions de plus en plus favorables ; il est de fait tardif dans les cédraies relevant de zones semi-arides. La vitesse d'expansion du duramen augmente quant à elle avec l'âge. Les modèles linéaires décroissants ajustés attestent que la proportion d'aubier montre une tendance inverse, en diminuant avec l'âge.

La formation d'une forte proportion d'aubier chez le cèdre de l'Atlas, associé à un rythme rapide de la croissance radiale, permettrait l'obtention de bois à usage de papeterie, alors qu'une croissance lente et une exploitation tardive seraient plus favorables à la formation du duramen, utile à l'industrie de bois d'œuvre. Les quantités de ces deux types de bois peuvent

être modulées en fonction des usages par des pratiques sylvicoles ; l'accélération de la croissance radiale résultant des éclaircies favoriserait la formation d'aubier.

En perspective, il est envisagé ultérieurement de s'intéresser à l'établissement de liaison entre la proportion d'aubier et la biomasse foliaire de chaque arbre pour vérifier l'application de la théorie du *pipe model*, théorie selon laquelle le tronc et les branches d'une plante peuvent être considérés comme un ensemble de tuyaux dont chacun supporte une certaine quantité bien définie de feuilles. Par ailleurs, dans le contexte de l'évaluation de la qualité du bois de cèdre, notamment sa durabilité naturelle, l'étude de la dynamique spatio-temporelle des polyphénols dans le duramen et de l'aubier est envisagée de manière à caractériser typologiquement ces deux types de bois.

## Références bibliographiques

ABDESSEMED K., 1981. Le cèdre de l'Atlas dans les massifs de l'Aurès et du Belezma. Étude phytosociologique. Problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse de Docteur-Ingénieur, Faculté St-Jérôme, Université Aix, Marseille III, 199 p.

ALILECHE A., 2011. Étude du dépérissement du cèdre de l'Atlas dans les cédraies des Aurès (Belezma et Chélia). Mémoire de Magister, USTHB, Algérie, 151 p.

BAMBER R. K., 1976. Heartwood, its Function and Formation. Wood Science and Technology, vol. 10: 1-8.

BAMBER R. K., 1987. Sapwood and Heartwood. Forestry Commission of New South Wales, Technical Publication N°2, Wood Technology and Forest Research Division, Australia, p. 1-8.

BJÖRKLUND L., 1999. Identifying heartwood-rich stands or stems of *Pinus sylvestris* by using inventory data. *Silva Fennica*, 33(2): 119-129.

CLIMENT J., GIL L., PARDOS J., 1993. Heartwood and sapwood development and its relationship to growth and environment in *Pinus canariensis* Chr. Sm ex DC. *Forest Ecology and Management*, 59: 165-174.

DE KORT I., 1993. Relationships between sapwood amount, latewood percentage, moisture content and crown vitality of Douglas fir, *Pseudotsuga menziesii*. *IAWA Journal*, vol. 14 (4): 413-427.

DERRIDJ A., 1990. Étude des populations de *Cedrus atlantica* M. en Algérie. Thèse, Université Paul Sabatier, Toulouse, 288 p.

DGF, 2006. Atlas des parcs nationaux. Direction générale des forêts, Algérie, 96 p.

GRANIER A., 1981. Étude des relations entre la section du bois d'aubier et la masse foliaire chez le Douglas (*Pseudotsuga menziensis* Mirb. Franco). Ann. For. Sci. 38 (4) : 503-512.

HAZENBERG G. YANG K. C., 1991. Sapwood/ heartwood width relationships with tree age in balsam fir. IAWA Journal Bulletin n.s., vol. 12 (1): 95-99.

JEFFREY D. D., LACHENBRUCH B., 2009. Heartwood/sapwood variation of western redcedar as influenced by cultural treatments and position in tree. Forest Ecology and Management, 258: 2026-2032.

LONGUETAUD F., 2005. Détection et analyse non destructive de caractéristiques internes de billons d'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) par tomographie à rayons X. Thèse, ENGREF, Nancy, 124 p.

MESSAOUDÈNE M., LOUKKAS A., JANIN G., TAFERE M., DILEM A., GONÇALEZ J., 2004. Propriétés physiques du bois d'éclaircie des cèdres (*Cedrus atlantica*), contenant du bois de compression, provenant de l'Atlas du Djurdjura (Algérie). Annals Forest Sciences, (61): 589-595.

PINTO I., PEREIRA H., USENIUS A., 2004. Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait) stems. Trees, vol. 18: 284-294.

POLGE H., 1964. Délimitation de l'aubier et du bois de cœur par analyse densitométrique de clichés radiographiques. Annals Forest Sciences, 21 (4) : 605-623.

POLGE H., 1982. Influence de la compétition et de la disponibilité en eau sur l'importance de l'aubier du douglas. Annals Forest Sciences, 39 (4) : 379-398.

POLGE H., 1985. Influence de l'élagage sur la duraminisation, la production de bois de tension et quelques autres propriétés du bois de peuplier I 214. Annals Forest Sciences, 42 (3) : 283-296.

SARMOUM M., 2008. Impact du climat sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti). Diagnostic dendroécologique et climatique de la cédraie de Theniet El Had. Mémoire de Magister, USTHB (Alger), 98 p.

TAYLOR A. M, GARTNER B. L., MORRELL J. J., 2002. Heartwood Formation and Natural Durability A Review. Wood and Fiber Science, 34 (4): 587-611.



# Chapitre VII

## Modélisation de la croissance en hauteur et en diamètre

### Introduction

La modélisation en foresterie 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 croissance et ses différentes interactions avec le milieu et les traitements sylvicoles appliquées. Le choix de variables dendrométriques pour lesquelles la recherche de relation pratique, explicite et simple d'emploi obéit aux connaissances théoriques ou empiriques relatives au tempérament des arbres en intégrant la cinétique de croissance et l'écophysiologie. A cet effet, l'étude de la dynamique des peuplements forestiers nécessite une meilleure compréhension à la fois de la croissance en diamètre et de celle en hauteur.

Les relations allométriques expliquant l'évolution de la hauteur en fonction de la circonférence (ou du diamètre), appelées aussi courbes des hauteurs, recèlent plusieurs avantages. En outre le pouvoir d'élargir l'échantillon du jeu de données une fois une relation est ajustée sur un sous ensemble même restreint, ce type de courbe peut renseigner sur l'effet de la fertilité de la station (Arney, 1984 ; Deleuze et *al.*, 1996 ; Rabhi et Messaoudène, 2013). Par ailleurs, l'effet de la densité peut aussi être apprécié par un modèle de hauteur en fonction de la circonférence à condition que celui-ci soit bien paramétré (Dhôte et De Hercé, 1994). 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. La difficulté de modéliser l'évolution de la hauteur en fonction de la circonférence ou du diamètre réside dans le choix

de la forme géométrique pouvant mieux expliquer la croissance simultanée de ces grandeurs et l'interprétation stationnelle et sylvicole que le modélisateur peut attribuer aux paramètres du modèle.

L'objectif de ce chapitre est de comparer plusieurs formes de modèle en utilisant trois approches de modélisation (empirique, théorique et potentiel-réducteur).

### 7.1. Données éligibles à la modélisation

La majorité des modèles de croissance ou de rendement en foresterie sont strictement paramétriques. Que ce soient de peuplement, individuels ou basés sur les processus éco-physiologiques, les paramètres doivent être estimés à partir des données récoltées sur terrain. L'utilité du modèle calibré est limitée par la précision avec laquelle les paramètres du modèle sont estimés. Il est donc crucial de s'assurer que le modèle choisi est bien adapté aux données recueillies. À ce sujet, Rennolls (1997) mentionne comment ses considérations peuvent-elles être influencées par la conception de la récolte des données. Il est admis que les données peu fiables ou biaisées ne peuvent pas être utilisées comme une base de l'estimation de la croissance, les modèles issus seront conformes à la réalité que dans le cas où les données sont exemptes de tout biais (Adlard, 1995). La taille et la structure de l'échantillon ont aussi un impact majeur sur l'adéquation globale du modèle finalisé. La construction d'un modèle passe par plusieurs étapes :

- Les données échantillonnées sont généralement supposées représentatives de la population dont elles sont tirées (principe de l'inférence statistique) ;
- La sélection d'une famille de modèles suffisamment flexibles pour représenter les tendances et les relations dans les données ;
- Les modèles construits en foresterie sont, dans la plus part des cas, basés sur le principe de la régression, le modèle est conduit de manière conditionnelle aux jeux de données sélectionnés ;
- Un critère d'ajustement de modèle est choisi, souvent la somme des carrés des résidus (SCR), le SCR pondéré ou le “-2 Log (maximum de vraisemblance) “. Le choix dépend du modèle d'erreur sélectionné. Des tests graphiques sont aussi utilisés (normalité des résidus et répartition des résidus en fonction des valeurs prévues par le modèle) ;
- Un modèle particulier est ajusté aux données en minimisant le critère d'ajustement et prenant en compte les paramètres de la famille de modèles choisie au début ;
- Afin d'éviter des ajustements avec des modèles complexes, la procédure de validation est adoptée, dans laquelle un sous-ensemble du jeu de données (souvent sélectionné

aléatoirement) est retenu. La performance de prédiction du meilleur ajustement est ainsi évaluée.

## **7.2. Différentes approches de la modélisation**

### **7.2.1. Approche empirique**

L'approche empirique de la modélisation vise à la fois à chercher les variables les plus significatives et à ajuster des équations de régression qui correspondent le mieux possible à la structure des données. Cette approche néglige donc les mécanismes biologiques qui déterminent l'allure et la spécification du modèle ainsi que la forme des variables. Par sa nature, elle donne lieu à des inconvénients et à des limites. Cependant, l'application de cette approche, même pour des raisons théoriques, s'impose chaque fois que la connaissance de la dynamique du système et de ses composantes n'est pas assez approfondie. Il en résulte forcément des approximations (Heshmatol Vaezin, 2006). Par exemple, anciennement, les processus biologiques sont, par nature, non linéaires, cependant, à défaut de la connaissance de ces processus, une grande partie des études sur la croissance des arbres est effectuée en faisant appel à une relation linéaire simple. L'approche empirique est aussi appelée approche descriptive dans le sens où elle essaie de proposer des modèles qui décrivent bien la croissance sans essayer d'intégrer explicitement des connaissances sur les mécanismes biologiques (Pavé et Schmidt-Lainé, 2004). Cette approche est encore appelée modélisation dendrométrique. Cette méthode correspond à la recherche d'une tendance qui peut être en parfaite adéquation avec le nuage de point généré par le jeu de données.

### **7.2.2. Approche théorique**

L'approche théorique de la modélisation se base sur les connaissances et les considérations biologiques. Contrairement à l'approche empirique, la modélisation des phénomènes biologiques correspond aux mécanismes biologiques découverts. La validité et la possibilité de généralisation sont évidemment les avantages les plus importants de ce type de modèle (Heshmatol Vaezin, 2006). Cependant, l'inconvénient majeur de cette approche réside dans la faiblesse de la connaissance qu'on a de certains mécanismes biologiques (Dhôte, 1987). Par ailleurs, cette approche conduit souvent à des modèles assez complexes et donc peu pratiques. L'approche théorique est aussi appelée l'approche fonctionnelle, dans le sens où elle intègre au moins certains mécanismes de fonctionnement biologiques les plus importants (Bouchon, 1995). Les différents modèles classiques de croissance comme ceux de Chapman-Richards, Lundqvist-Matern, Schnute...etc. sont des exemples de cette approche. Il s'agit des modèles de forme sigmoïde qui s'ajustent en général aux données de croissance.

La croissance en hauteur et en circonférence est un phénomène complexe où leur sensibilité vis-à-vis de la fertilité de la station et/ou de la densité est différente. S'il est admis que la croissance en diamètre est négativement influencée par la densité, la hauteur, par contre est favorisée dans les peuplements hyperdenses. A ce sujet, Lanner (1985) note que la croissance en hauteur reste insensible à l'espacement pour le cas des peuplements

moyennement denses. Dans ce cas, la croissance en hauteur et en diamètre est le résultat de l'imbrication de plusieurs phénomènes notamment de concurrence (accès aux ressources hydriques et minérales, accès à la lumière et extension des houppiers) dont la modélisation et la simplification sous forme d'équations mathématiques s'avèrent très difficiles. Donc, du fait que la concurrence n'est pas très bien connue, les modèles déjà établis ont eu recours à l'approche empirique pour la modélisation de la concurrence qui s'exerce au niveau de l'arbre.

### 7.2.3. Approche “potentiel – réducteur”

C'est l'une des approches semi-empiriques qui a été largement utilisée pour la modélisation de la croissance en hauteur et en diamètre. L'avantage essentiel de cette approche réside dans sa simplicité et son interprétation biologique. L'accroissement observé se décrit donc comme une fonction d'accroissement potentiel (POT), modulé par un réducteur (RED) qui rend compte de l'intensité de la concurrence exercée sur l'arbre. Dans notre cas, la fonction de croissance potentielle reflète la fertilité de la station et la densité (la concurrence) est supposée comme étant le facteur réducteur de la croissance. Elle est exprimée par le modèle suivant :

$$\frac{dx}{dt} = POT(x, \text{fertilité}) * RED(\text{densité}, \text{concurrence}, \text{statut social} \dots)$$

Par le biais de cette approche, Heshmatol Vaezin (2006) a tenté une simplification du processus qui régit l'élancement et le grossissement en relation avec la fertilité de la station et la concurrence. A la différence d'accroissement potentiel qui obéit à certaines lois théoriques (modèles sigmoïdes et hyperboliques), la fonction de réducteur se construit le plus souvent de façon empirique. Il n'existe pas un consensus sur cette fonction. Cependant, la forme mathématique du réducteur dépend de la manière dont la densité, le statut social et leur interaction affectent les accroissements en hauteur et en diamètre de l'arbre. Ainsi, la forme mathématique du réducteur dépend des éléments suivants :

- Effet de la densité sur l'accroissement en diamètre ;
- Effet de la densité sur l'accroissement en hauteur ;
- Effet du statut social sur les accroissements en diamètre et en hauteur ;
- Effet de l'interaction entre la densité et le statut social sur les accroissements en diamètre et en hauteur.

### 7.3. Influence de la densité sur la croissance en hauteur et en diamètre

La croissance en hauteur des arbres est généralement peu sensible à la densité, par conséquent, la hauteur moyenne des cent plus gros arbres à l'hectare est très souvent caractéristique de la productivité de la station pour l'essence considérée (Ottorini, 1978). Lanner (1985) note aussi l'insensibilité de la croissance en hauteur à l'espacement, ceci est expliqué par la différence du comportement vis-à-vis de l'espacement qui existe entre les

bourgeons apicaux responsables de l'élancement des arbres et le méristème cambial étroitement lié au grossissement.

En opposition à ces résultats, Heshmatol Vaezin (2006) citant the *Hard Wood Sylviculture Cooperative* (HWSC, USA) souligne que la densité constitue une variable explicative importante de l'accroissement en hauteur moyenne et même en hauteur dominante alors que cette dernière est considérée depuis longtemps comme invariante dans un large intervalle de densité. La course souvent enclenchée par les arbres en situation de concurrence pour accéder à la lumière semble expliquer la croissance en hauteur constatée pour les peuplements hyperdenses.

En effet, la littérature met en évidence l'existence de deux seuils de densité suivant l'âge, l'essence et les conditions environnementales de croissance (Masson, 2000 ; Vila *et al.*, 2001 ; Meredieu *et al.*, 2002). À l'intérieur de ces deux limites de densité minimale et maximale, la densité influence positivement la croissance en hauteur. Au dessous de la limite minimale, la croissance en hauteur ne diffère pas grandement avec celles des arbres isolés. Au-delà du seuil maximal, l'accroissement en hauteur diminue ou reste constant, puisque à ce stade, la concurrence commence à s'exercer pour les autres ressources que la lumière. Selon les besoins lumineux de chaque espèce, l'arbre croît préférentiellement en hauteur jusqu'à un niveau appelé "point de libération" où ce besoin est satisfait et le facteur lumière n'est plus limitant. La différence de hauteur entre les arbres de la même espèce et de même diamètre s'explique, en grande partie, par leurs situations concurrentielles pour la lumière. De ce fait, pour les mêmes besoins, la hauteur correspondant au point de libération est d'autant plus élevée que la densité du peuplement augmente. Par rapport au stade de développement, l'effet positif de la densité sur l'accroissement en hauteur s'avère faible et même non significatif pour les peuplements âgés par rapport à ceux plus jeunes.

Quant à l'effet de la densité sur la croissance en diamètre, il est noté que l'augmentation de la densité se traduit par la baisse des ressources disponibles pour que les arbres grossissent. Czudek (1998) affirme que la densité explique la moitié de la variation de l'accroissement en diamètre. La relation entre la densité et l'accroissement en diamètre est donc décroissante mais en raison des capacités d'adaptation des arbres soumis à la concurrence, cette relation est rarement linéaire puisque la diminution de la croissance en diamètre au début de la concurrence est plus importante et à mesure que l'arbre croît, la baisse du grossissement est de plus en plus faible.

En plus de leur rôle sélectif, les éclaircies sont censées provoquer un gain sur la croissance en diamètre. Il existe une nuance entre l'effet de la diminution de la densité mis en évidence, notamment, par la loi d'auto-éclaircie et l'éclaircie en tant que pratique sylvicole malgré que dans les deux cas, la finalité est de réduire le nombre de tiges à l'hectare. En effet, l'augmentation du diamètre moyen pour les peuplements qui ont subi une éclaircie est le résultat de l'enlèvement des tiges de faible diamètre. Le dispositif recommandé dans pareils cas est celui qui permet d'éliminer cet effet statistique et de ne laisser que l'effet biologique des éclaircies.

## 7.4. Présentation des résultats des trois approches

### 7.4.1. Approche empirique (adéquation à la tendance du jeu de données)

Cette partie consiste à chercher une forme de modèle montrant une meilleure adéquation avec la tendance affichée par le nuage de point.

Les formes géométriques souvent utilisées pour construire des modèles hauteur - circonférence sont les paraboles obtenues par des fonctions polynomiales d'ordre 2 et rarement supérieur à l'ordre 3 (Pardé et Bouchon, 1988). Ces modèles sont faciles à paramétrer mais la difficulté réside dans l'attribution de sens biologique aux paramètres en outre d'une robustesse discutable, puisque la prédiction des hauteurs associées aux circonférences importantes est parfois contradictoire. L'adéquation est réalisée par des modèles polynomiaux d'ordre 2 dont la forme générale est la suivante :

$$H(C) = aC^2 + bC + d$$

$a$ ,  $b$  et  $d$  sont des constantes réelles, les valeurs de celles-ci déterminent la forme de la parabole. Si " $a$ " est négatif, la parabole est dite concave et la fonction admet un maximum au point de nullité de sa dérivée primaire. Le point maximum est localisé dans l'abscisse  $C = \frac{-b}{2a}$  et dans l'ordonnée  $H(\frac{-b}{2a})$ . Ce point représente le point critique de la fonction polynomiale.

La droite horizontale (équation ci-dessous) passe par le point maximum de la fonction :

$$H = \frac{-b^2+4ac}{4a}$$

La prise en compte de l'effet de la fertilité comme facteur favorisant la croissance globale ainsi que la densité en tant que facteur ralentissant la croissance en diamètre et accélérant celle en hauteur est envisagée par la forme polynomiale. La fonction s'apparente à une droite donnant la hauteur potentielle atteinte par le peuplement en question. Cela est considéré comme étant l'effet direct de la fertilité de la station.

#### 7.4.1.1. Application à l'étude de la croissance des reboisements de cèdre

##### A. Les reboisements du Djurdjura

##### A.1. Plantation du col de Tirourda

Les résultats des ajustements sont présentés dans la figure 7.1 et les modèles obtenus dans le tableau 7.1.

La comparaison des valeurs de hauteur dominante pour chaque classe de fertilité et les valeurs maximales obtenues à partir des fonctions polynomiales pour les mêmes classes de fertilité montre que les deux estimations sont proches. Les couples hauteur dominante – maximum de la fonction observent une superposition presque parfaite : [9.03 - 10.77], [12.14 - 12.48], [14.08 - 14.58]. Ce constat mène à penser que le fait que la croissance en hauteur se stabilise plus vite dans le temps que la croissance en circonférence, les modèles expliquant l'évolution de ces deux paramètres dendrométriques admettent une asymptote horizontale. Dans le cas de

la forme hyperbolique, cette asymptote est estimée par un paramètre du modèle où elle représente la hauteur dominante. Dans ce sens, une analogie pourra être faite avec la forme parabolique où la droite horizontale passant par le point maximal s'apparente à cette asymptote.

En finalité, le modèle polynomiale fournit une estimation fiable de la productivité des peuplements équiennes (du moins pour un âge relativement jeune). Les courbes ont tendance à se déplacer en haut au fur et à mesure que les peuplements évoluent dans des conditions de plus en plus favorables. Cette démarche pourrait être discutable avec le vieillissement des peuplements puisque les hauteurs maximales ne se positionnent pas dans la tranche des circonférences maximales surtout en situation de densité élevée où les arbres s'élancent d'avantage en perdant en grossissement. Dans ces cas, les formes hyperboliques seront les plus adaptées et la différence entre les deux modes d'estimation sera perceptible.

Tableau 7.1: Présentation des modèles obtenus au col de Tirourda

Fertilité	Modèles obtenus	R <sup>2</sup>	F'(c)=0	droite horizontale
Faible	$H = 0.0011C^2 + 0.2054C + 1.185$	0.37	C = 93.36	H = 10.77
Moyenne	$H = 0.0014C^2 + 0.2654C - 0.085$	0.48	C = 74.78	H = 12.48
Bonne	$H = 0.0011C^2 + 0.2285C + 2.413$	0.36	C = 103.86	H = 14.58

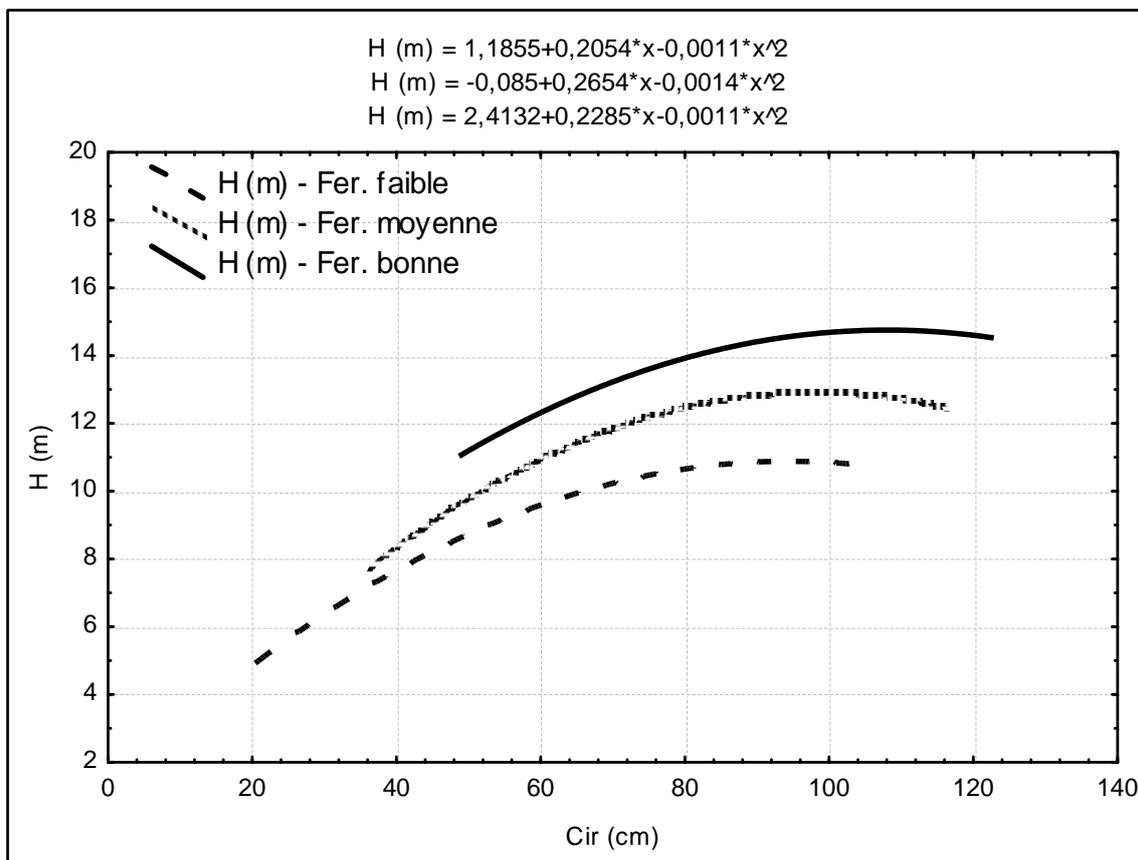


Fig.7.1 : Modèles polynomiaux ajustés pour les trois types de fertilité.

## A.2. Plantations du col de Chellata et Tizi Oujaâboub

Deux modèles, hauteur – circonférence, de forme polynomiale sont ajustés aux jeux de données (Fig.7.2) :

**Col de Chellata :**  $H(C) = -0.0028C^2 + 0.2392C + 0.0899$  ( $R^2=0,74$ ).

**Tizi Oujaâboub :**  $H(C) = -0.001C^2 + 0.161C + 5.7842$  ( $R^2=0,35$ ).

Une large différence de croissance en hauteur des deux reboisements est montrée par les deux modèles polynomiaux ajustés. A 22 ans, le reboisement de Chellata atteint une hauteur moyenne maximale égale à 5,19m, la hauteur dominante à cet âge est de 5,02m. Cependant, pour Tizi Oujaâboub, à 25 ans, les hauteurs dominante et moyenne maximale sont respectivement de 11,58 et 12,26m. Donc, en trois ans, la croissance en hauteur a doublé à Tizi Oujaâboub, cette différence est attribuée aux conditions stationnelles défavorables décrites au col de Chellata (chapitre 3, § 312). Dans ces deux cas, le maximum de la fonction polynomiale se révèle un bon indicateur de la fertilité de la station.

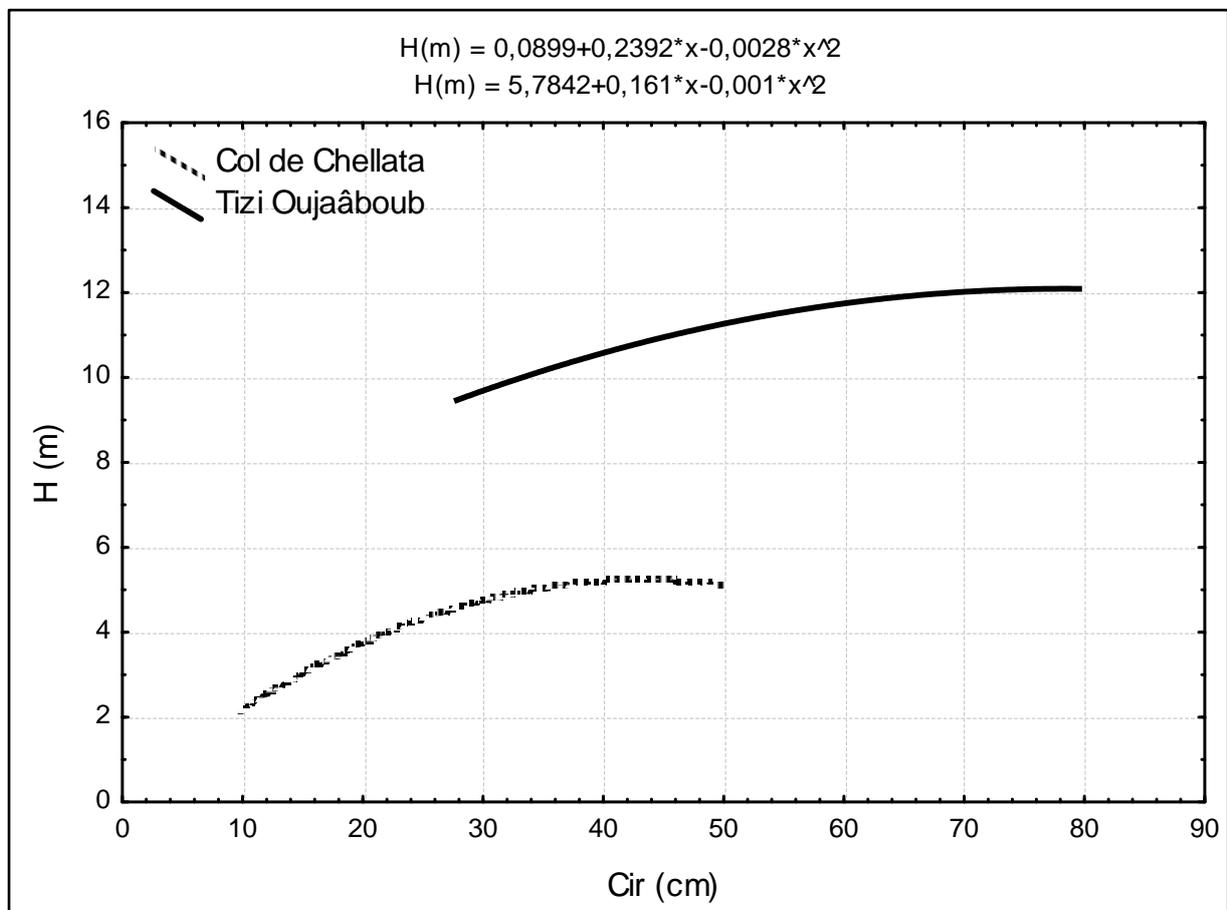


Fig.7.2 : Modèles polynomiaux ajustés pour les plantations du col de Chellata et de Tizi Oujaâboub.

**B. Reboisements de l'Atlas blidéen (Parc National de Chréa)**

Quatre modèles polynomiaux ont été ajustés pour chacune des plantations de Chréa (1998, 1970, 1958 et 1935). Du fait de l'appartenance de ces plantations à la même zone géographique et subissant les même facteurs stationnels, il est envisagé d'étudier l'évolution des modèles avec l'âge. Les modèles obtenus sont présentés dans le tableau 7.2 et la figure 7.3.

Tableau 7.2: Présentation des modèles obtenus dans l'Atlas blidéen.

Plantations	Modèles ajustés	R <sup>2</sup>	F'(C)=0	Droite horizontale	Hdom
1998	$H(C) = -0,002C^2 + 0,226C + 0,472$	0,67	C=51,47	H=6,29	5,95
1970	$H(C) = -0,001C^2 + 0,206C + 4,368$	0,41	C=103	H=14,97	13,04
1958	$H(C) = -0,001C^2 + 0,370C - 1,565$	0,22	C=102,77	H=17,45	15,98
1935	$H(C) = -0,001C^2 + 0,314C + 3,983$	0,40	C=120,76	H=22,94	22,70

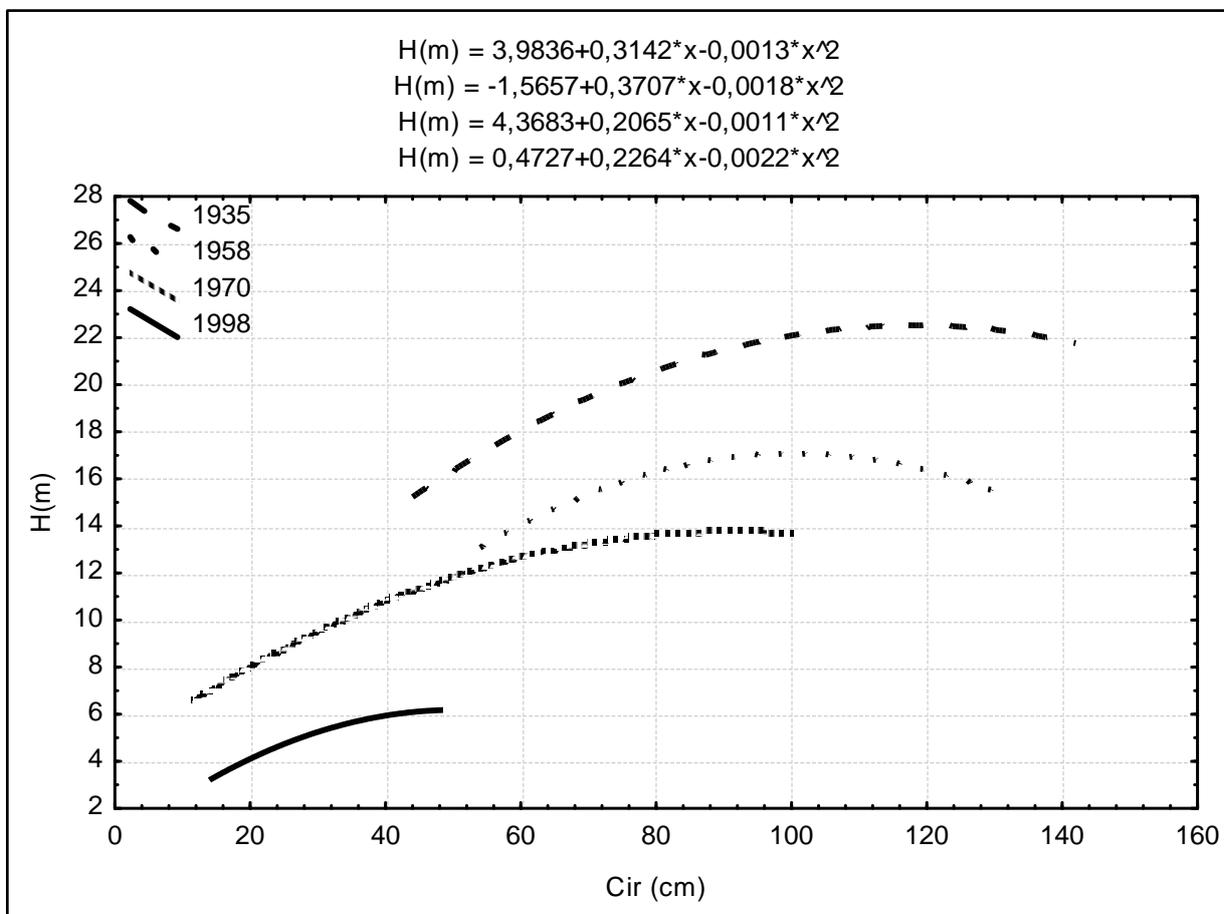


Fig.7.3 : Présentation des modèles polynomiaux ajustés pour les quatre plantations de Chréa.

Pour chaque plantation, la comparaison de la hauteur maximale (ordonnée du point critique) avec la hauteur dominante montre, qu'à part le reboisement de 1935 où les deux valeurs affichées sont presque égales (Tab. 7.2), celles des hauteurs maximales sont légèrement supérieures à celles dominantes dont la différence, en moyenne, est de l'ordre de 1,24m. Du fait de la non signification de la différence, on peut admettre que pour les quatre plantations étudiées, le point critique est un bon estimateur de la hauteur dominante à un âge donné.

En comparant la position de chaque point critique, la figure 7.3 montre une évolution croissante de l'abscisse (circonférence) et de l'ordonnée (hauteur) avec l'âge. A 15 ans (plantation de 1998), la hauteur maximale est de 6,29m coïncidant avec une circonférence de 51,47cm. À 78 ans (plantation de 1935), la hauteur maximale est 22,94m avec une circonférence de 120,76cm. Il apparaît que les deux grandeurs dendrométriques n'évoluent pas avec le même rythme puisque l'écart des hauteurs est beaucoup plus marqué que celui des circonférences.

Néanmoins, la comparaison des deux plantations de 1970 et 1958 fait exception puisque en 12 ans de temps de croissance, la hauteur maximale a progressé de 2,48m alors que les circonférences correspondantes restent pratiquement constantes. La raison qui pourrait expliquer ce résultat est que la plantation de 1970 est réalisée dans une zone très favorable du point de vue édaphique avec un sol profond et un microrelief favorisant l'emmagasinement de l'eau. On peut penser aussi à la densité très élevée qui caractérise la plantation de 1958 (1300 tiges/ha), ce qui a favorisé la croissance en hauteur et a ralenti celle en diamètre.

#### **7.4.1.2. Modèle parabolique et effet de la densité**

En peuplements réguliers, les individus dominés ou en difficulté de croissance concernent les faibles circonférences observées au démarrage de la courbe de régression. Connaissant l'effet de la densité sur la croissance simultanée en hauteur et en circonférence, la pente du modèle linéaire ajusté à l'origine de la relation  $H=f(c)$  renseigne sur un éventuel effet de la densité. Celle-ci est d'autant plus élevée que la hauteur est favorisée au détriment du diamètre. Cette situation serait observée dans les peuplements denses.

La forme parabolique des modèles polynomiaux ne peut pas prendre en compte l'effet de la densité supposée très accentuée sur les individus de faible diamètre et de hauteur moins élevée (arbres dominés). L'influence de la densité sur la croissance simultanée en hauteur et en diamètre, déjà évoquée, débouche sur la recherche d'un modèle linéaire ajusté au démarrage de la régression, le rythme de croissance des deux variables dendrométriques est modulé par la densité. A travers ces modèles, l'influence de la densité sur le déplacement horizontal et vertical du point critique est abordée dans cette partie.

L'ajustement d'un modèle linéaire sur le jeu de données inférieur au point de courbure de la parabole est difficile à réaliser en raison de la reconfiguration du nuage de point qui fournit des estimations moins précises, le choix est porté sur l'établissement d'une tangente au début de la parabole. Donc, la méthode consiste à fixer les paramètres stationnels et de

prendre un gradient de densité aussi large que possible. Elle est appliquée seulement pour la plantation du col de Tirourda. La description des échantillons pris en considération et les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 7.3 et la figure 7.4.

Tableau. 7.3 : Modèles obtenus pour trois cas de densité.

	<b>d. (tiges/ha)</b>	<b>Hmax</b>	<b>C<sub>0</sub></b>	<b>Droite de régression au démarrage</b>
<b>Pl. 11</b>	964 (faible)	11,58	90,27	$H=0,120C+7,79$
<b>Pl. 7</b>	1523 (moyenne)	10,98	87	$H=0,146C+6,11$
<b>Pl. 4</b>	2247 (forte)	11,74	82,20	$H=0,171C+7,37$

*d* : densité ; *Hmax* : hauteur correspondant au point critique ; *C<sub>0</sub>* : circonférence correspondant à *Hmax*.

La figure 7.4 montre un déplacement vertical du point critique des trois courbes. Graphiquement, ce résultat confirme la proportionnalité qui existe entre la densité et la hauteur totale des arbres. De même pour la circonférence où il affiche un déplacement horizontal inversement proportionnel à la densité.

L'évolution de la hauteur maximale suivant les trois situations de densité (faible, moyenne et forte) (Tab. 7.3) ne montre pas une différence flagrante entre les trois cas étudiés. La hauteur la plus importante est affichée par le peuplement hyperdense (Pl. 4) mais la différence apparaît insignifiante (24cm) par rapport à la différence très large de densité qui les caractérise (un écart de 1283 tiges/ha entre les placettes 11 et 4). Quant aux circonférences, la valeur la plus élevée est constatée dans la placette la moins dense (90,27cm : Pl. 11) contrairement à celle plus dense (Pl. 4) qui affiche 82,20cm. Les différences sont statistiquement non significatives (test de Student non significatif à  $\alpha=0,05$ ).

Même si les modèles linéaires ajustés se rapprochent du parallélisme, les pentes affichées par les trois modèles linéaires montrent une légère augmentation avec la densité, ce qui prouve qu'à l'intérieur du peuplement hyperdense, le rythme de croissance en hauteur est plus élevé que celui en diamètre.

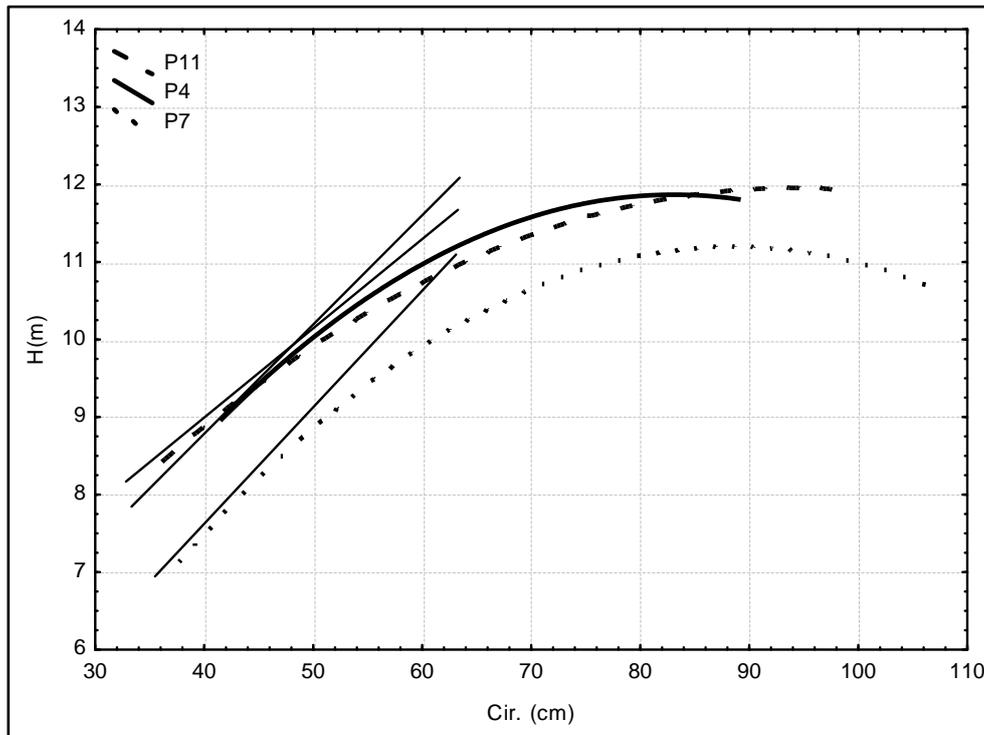


Fig. 7.4 : Ajustement de modèles polynomiaux pour trois peuplements de densité différente.

Les résultats peu catégoriques obtenus soulignent, dans le cas du reboisement du col de Tirourda, une insensibilité de la croissance en hauteur et en diamètre du cèdre de l'Atlas à une densité considérée très élevée à cet âge (34ans) et avoisinant 2200 tiges/ha. On peut supposer que du fait de son caractère d'espèce de demi-ombre manifesté surtout au stade juvénile (Courbet et *al.*, 2012), le cèdre de l'Atlas n'accélère pas sa croissance en hauteur pour éviter le couvert en situation de forte densité. Bien qu'au Djurdjura, l'eau ne constitue pas un facteur limitant, la forte densité peut jouer un rôle favorable en créant un microclimat évitant ainsi l'évaporation excessive nuisible surtout pour les jeunes sujets.

#### 7.4.2. Modèles utilisés dans l'approche théorique

Pour pallier quelques imperfections observées de l'utilisation de la forme polynomiale, plusieurs formes plus élaborées ont été construites. Plusieurs modèles ont été décrits et comparés par Huang et Titus (1992), Huang et *al.* (2000), Lopez-Sanchez et *al.* (2003) et Tamesgen et Gadow (2004). Il est noté l'absence totale de forme linéaire dans les modèles étudiés. Bien que cette non-linéarité puisse être désirable afin d'assurer un comportement logique du modèle, elle rend l'analyse beaucoup plus complexe.

Ces auteurs ont présenté l'historique de l'évolution des modèles de hauteur en fonction de la circonférence. La qualité de l'ajustement et le comportement de ces modèles ont été testés sur plusieurs essences et dans plusieurs régions contrastées du point de vue écologique. Dans l'ensemble, les modèles ont affiché une bonne adéquation malgré que les formes les plus simples, notamment, logarithmique et de puissance s'adaptent mal aux vieux peuplements. L'inconvénient de ces modèles réside dans la difficulté d'attribuer à leur

paramètres respectifs un sens écologique lié au climat ou à la fertilité de la station et/ ou un sens sylvicole lié à l'âge et à la densité des peuplements.

Les plus utilisés sont ceux de forme hyperbolique, notamment celui de Dhôte et de Hercé (1994) légèrement modifié par Deleuze et *al.* (1996) et l'adaptation du modèle de croissance microbienne de Schnute aux peuplements de pin maritime en Espagne (Castedo Dorado et *al.*, 2005). Ces deux formes hyperboliques sont utilisées aussi bien pour les peuplements réguliers que pour ceux d'allure jardinée. Le manque de jeu de données qui associent les petites hauteurs aux petites circonférences constitue la seule difficulté d'ajustement de ces modèles. La forme logarithmique établie par Fortin et *al.* (2009) est testée pour les nuages de point qui n'acceptent pas une asymptote horizontale, notamment pour les jeunes peuplements.

➤ **Modèle hyperbolique de Dhôte et De Hercé (1994) (hauteur – circonférence)**

L'expression du modèle est la suivante :

$$H = \frac{\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 4U_2U_4(U_1 - U_3).C}}{2U_4} + U_3 \quad \text{où } \alpha = U_1 - U_3 + U_2$$

La forme modifiée et simplifiée par Deleuze et *al.* (1996) est la suivante :

$$H(C) = \frac{U_1 + U_2C - \sqrt{(U_1 + U_2C)^2 - 4U_1U_2U_3C}}{2U_3} + 1.3$$

$U_1$  : fixe l'ordonnée de l'asymptote horizontale de l'hyperbole quand la circonférence tend vers l'infini (circonférences maximales). Il exprime la hauteur potentiellement atteinte par les arbres, de ce fait, ce paramètre est étroitement lié à la hauteur dominante. Donc à la fertilité de la station.

$U_2$  : la pente de la tangente à l'origine. Le rapport de variation de la hauteur et de la circonférence ( $\Delta H/\Delta \text{Cir}$ ). Il permet d'apprécier l'évolution simultanée de l'élancement et du grossissement donc l'effet de la densité sur la croissance en hauteur et en circonférence.

$U_3$  : l'ordonnée à l'origine, démarrage de la courbe.

$U_4$  : le paramètre de forme. Il évalue la courbure de l'hyperbole, lorsque "U4" se rapproche de 1, la courbe s'écrase sur l'asymptote.

La signification graphique des paramètres de ce modèle est présentée dans la figure 7.5.

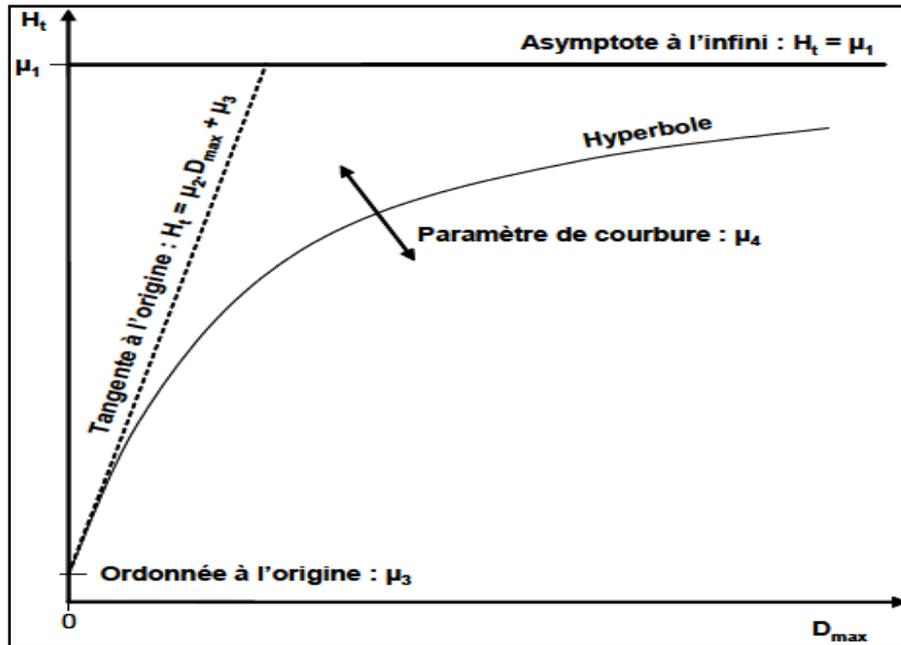


Fig.7.5 : Explication graphique du modèle hyperbolique.

➤ **Modèle de croissance de Schnute (hauteur – diamètre)**

L'expression de ce modèle est la suivante :

$$H = \left[ h_1^{b_0} + (h_2^{b_0} - h_1^{b_0}) \cdot \frac{1 - \exp[-b_1(D - d_1)]}{1 - \exp[-b_1(d_2 - d_1)]} \right]^{\frac{1}{b_0}}$$

Où :

- h : hauteur totale de l'arbre ;
- d : diamètre de l'arbre à 1,30m ;
- d<sub>1</sub> : diamètre minimal (du plus petit arbre) ;
- d<sub>2</sub> : diamètre maximal (du plus gros arbre) ;
- h<sub>1</sub> : hauteur correspondant à d<sub>1</sub> ;
- h<sub>2</sub> : hauteur correspondant à d<sub>2</sub> ;
- b<sub>0</sub> : accélération progressive du taux de croissance ;
- b<sub>1</sub> : accélération constante du taux de croissance.

➤ **Modèle de Fortin et al. (2009) (hauteur – diamètre)**

$$H = 1,3 + A \cdot \ln(D + 1) + B[\ln(D + 1)]^2$$

Le paramétrage des trois modèles décrits ci-dessus est entrepris en utilisant la régression non linéaire personnalisée et l'algorithme de Levenberg-Marquardt pour la fonction de perte. Pour comparer l'efficacité de ces modèles aussi bien sur les peuplements réguliers que naturels, des jeux de données hauteur – circonférence ont été récoltés sur les trois plantations du Djurdjura (col de Tirourda, col de Chellata et Tizi Oujeâboub) et sur la cédraie naturelle de Tikjda. Comme il est procédé dans l'approche empirique, l'interprétation biologique de chaque paramètre explique l'effet de la fertilité et de la densité des peuplements.

#### 7.4.2.1. Résultats du paramétrage des modèles

L'estimation des paramètres des modèles est présentée dans le tableau 7.4

Tableau. 7.4 : Résultats du paramétrage des trois modèles pris en compte.

		Effet de la fertilité			Effet de la densité			Plantations du Djurdjura			Céd. Nat Tikjda
		Faib.	Moy.	Bon.	Faib.	Moy.	élevée	Tir.t	Chell.	Tizi O.	
<b>Dhôte et De Hercé (1994)**</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0.36	0.43	0.33	0.32	0.57	0.34	0.50	0.76	A.N.S	0.91
	<b>U1</b>	13.95	14.96	17.38	14.01	13.21	12.46	16.24	6.02		20.62
	<b>U2</b>	1.04	1.30	1.64	1.54	1.61	1.63	1.93	0.15		0.77
	<b>U3</b>	3.96	1.98	6.48	5.44	6.76	7.23	2.26	0.21		2.71
	<b>U4</b>	0.94	0.14	0.99	0.81	0.92	0.87	0.97	0.46		0.33
<b>Modèle de Schnute*</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0.34	0.40	0.31	A.N.S	A.N.S	A.N.S	A.N.S	0.67	A.N.S	0.89
	<b>B<sub>0</sub></b>	0.005	0.04	0.07					0.03		0.075
	<b>B<sub>1</sub></b>	0.042	0.00	0.007					0.003		0.027
<b>Fortin et al. (2009)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	0.36	0.42	0.29	0.32	0.52	0.30	0.49	0.72	0.24	
	<b>A</b>	-0.23	-0.41	-23.87	0.48	-0.04	0.75	-2.25	-0.67	2.42	
	<b>B</b>	0.54	0,67	19.96	0.43	0.51	0.35	1.09	0.48	0.02	

*A.N.S : ajustement non significatif ; \* : les autres paramètres ont été fixés en se référant à la méthode proposée par Castedo Dorado et al. (2005) ; \*\* : la forme de Deleuze et al. (1996) pose une difficulté d'ajustement due éventuellement à la suppression du paramètre de l'ordonnée à l'origine.*

Les résultats présentés dans le tableau 7.4 confirment l'efficacité des modèles de forme concave, notamment les hyperboles pour modéliser la croissance en hauteur en fonction de la circonférence ou du diamètre. Nous procédons à la discussion de chaque modèle appliqué pour les peuplements en question. Les tracés de ces modèles sont présentés dans les figures 7.6, 7 et 8.

#### Modèle hyperbolique de Dhôte et De Hercé :

Le paramètre "U1" interprète la hauteur asymptotique atteinte pour les circonférences maximales. Le rapprochement établi entre ce paramètre et la hauteur dominante permet de l'utiliser pour estimer les potentialités de production des peuplements (Dhôte et De Hercé, 1994 ; Deleuze et al., 1996). Suivant les trois types de fertilité (faible, moyenne et bonne), U1 évolue respectivement de 13,95 ; 14,96 à 17,38m. Le paramétrage du modèle pour les

plantations du col de Tirourda (34 ans) et du col de Chellata (22 ans) montre une augmentation proportionnelle à l'âge des valeurs de "U1" (6,02 à 16,24 m).

Quant à l'effet de la densité, évalué par le paramètre "U2" qui exprime le rapport de l'accroissement en hauteur sur celui en circonférence ( $\Delta H/\Delta \text{Cir}$ ), il est plus élevé pour le peuplement dense, mais la différence n'apparaît pas flagrante (1,54 ; 1,61 et 1,63). Cela signifie que la vitesse d'élanement est plus grande comparée à celle du grosissement. En ce qui concerne l'âge, son influence se traduit par une augmentation régulière de la pente à l'origine (U2). La densité pousse les arbres à s'élaner et à ralentir leur croissance en diamètre pour accéder à la lumière et éviter le couvert. Deleuze et *al.* (1996) supposent que ce paramètre rend compte aussi de la différenciation sociale dans des peuplements où se joue une forte compétition pour la lumière. Pour le hêtre et le chêne, les auteurs notent que si la pente à l'origine n'évolue pas avec l'âge, la structuration sociale se traduit par l'existence d'une classe sociale en situation d'équilibre entre assimilation et maintenance, ce phénomène se manifeste par un ralentissement de la croissance en hauteur et en diamètre. Ces conclusions ne semblent pas être valides pour l'épicéa où cet état d'équilibre n'est pas atteint. La pente à l'origine augmente avec l'âge du peuplement. En effet les arbres les plus dominés utiliseront en quelque sorte leurs «dernières forces» (c'est à dire le peu d'énergie de leur assimilation) pour pousser un peu en hauteur et se rapprocher de la lumière.

Pour des valeurs élevées du paramètre de forme "U4" (rayon de la courbure), le tracé se confond à une ligne droite, ce qui altère sensiblement l'allure des courbes de croissance en hauteur. Dans la plus part des cas, la valeur de "U4" est comprise entre 0,818 et 0,990. En effet, les résultats de la littérature affirment qu'il observe une stabilité autour de 0,9 (Deleuze et *al.*, 1996). Ce paramètre de forme pourrait ainsi être lié à l'état d'avancement de la fermeture du couvert puisqu'il augmente avec l'âge. Cependant, la forme plus douce de l'hyperbole se traduit en pratique par une diminution plus rapide de la hauteur dominante, avec la densité, c'est-à-dire avec le décalage vers la gauche du nuage de points. Ce décalage modifiera inévitablement la courbure de l'hyperbole.

Donc, les deux paramètres, de forme et de la pente à l'origine, sont des indicateurs du niveau de compétition dans le peuplement et de l'arbitrage "croissance en hauteur-croissance en circonférence" qui en découle.

#### Modèle de croissance de Schnute :

De par le nombre élevé de paramètres à estimer par itération, il n'a pas été possible, pour le cas de ce modèle, d'obtenir des estimations significatives. Donc, nous avons procédé à la fixation des paramètres  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $h_1$ ,  $h_2$  en se référant à la méthode proposée par Castedo Dorado et *al.* (2005). D'une part, cette démarche est motivée par le fait que les quatre paramètres fixés découlent des deux séries de données (hauteurs et diamètres) utilisées pour le paramétrage de ce modèle, d'autre part, la réduction du nombre de paramètres à estimer permet de faciliter les estimations. Il apparaît des résultats obtenus que la complexité de ce modèle a induit une difficulté d'ajustement pour plusieurs échantillons. On a déduit que

l'accélération progressive du taux de croissance ( $b_0$ ) marque une augmentation avec la fertilité, mais l'accélération constante du taux de croissance ( $B_1$ ) ne semble pas suivre le gradient de fertilité choisi. Castedo Dorado et *al.* (2005), sur le pin maritime en Espagne a souligné une faible influence de la hauteur dominante sur le paramétrage de la forme de Schnute, par contre, un effet écorégional est mis en évidence.

#### Modèle logarithmique de Fortin et *al.* (2009)

Une forme logarithmique traduit une croissance continue, donc, elle est parfaitement adaptée aux peuplements jeunes où la croissance en hauteur n'a pas encore atteint la phase stationnaire. Les résultats montrent qu'aucun effet de la densité et de l'âge sur les deux paramètres (A et B) n'est décelable. C'est la fertilité, par contre, qui est mieux prise en compte par ce modèle, puisque le paramètre "A" diminue avec la fertilité et "B" observe une augmentation significative. Néanmoins, l'absence de gradient d'étendue plus large de l'âge et de la fertilité ne permet pas l'attribution de sens stationnel ou sylvicole aux paramètres.

#### Application des formes hyperboliques en forêt naturelle (Tikjda)

La présence de toutes les classes de circonférence dans cette forêt a provoqué une courbure aigue des deux modèles hyperboliques. L'intégration d'individus de grosse circonférence rend inutile l'application d'une forme logarithmique, puisque celle-ci a montré son efficacité particulièrement sur les jeunes peuplements.

Il apparaît que ces deux formes sont beaucoup plus efficaces pour les peuplements de structure irrégulière que pour ceux réguliers puisque les coefficients de détermination sont plus élevés. Ceci est dû à la présence de gros diamètres couplés à des hauteurs constituant le palier de la croissance, en plus des individus de petite dimension. Cette disposition des données est parfaitement favorable aux hyperboles testées. Toutefois, les interprétations stationnelles et sylvicoles déjà attribuées aux paramètres ne peuvent pas être élargies aux cas des peuplements naturels où l'âge et la hauteur dominante ne sont pas des descripteurs pertinents.

### **7.4.2.2. Qualité des ajustements et validation des modèles**

#### **A. Tests arithmétiques et graphiques utilisés**

La validation des modèles estimés est basée sur des analyses arithmétiques et graphiques des résidus. En se référant à Lopez-Sanchez et *al.* (2003) et Castedo-Dorado et *al.* (2005), nous avons opté pour les tests suivants :

1. Le coefficient de détermination ajusté ( $R^2_{aj}$ ) : il reflète la part de la variance totale expliquée par le modèle et prend en compte le nombre de paramètres estimés. A noter que le coefficient de détermination ( $R^2$ ) classique a été utilisé pour le choix préliminaire des formes géométriques des modèles.

$$R_{aj}^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \left( \frac{N-1}{N-p} \right); R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

2. Le biais ( $\bar{E}$ ) : il évalue l'écart du modèle par rapport aux valeurs observées.

$$\bar{E} = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{N}$$

La vérification de l'existence d'un biais consiste à ajuster une droite de forme :

$$Z_i = a \cdot \hat{Z}_i + b$$

Un test de F-Fisher est utilisé pour prouver que la pente de ce modèle linéaire (a) est égale à 1 et l'ordonnée à l'origine (b) égale à 0.

3. Le carré moyen résiduel (*mean square error*) "MSE" : C'est un indicateur des écarts entre les observations et les estimations du modèle. Le modèle est d'autant plus efficace que le MSE tend vers zéro. Donc il analyse la précision des estimations.

$$MSE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - p}$$

4. *Akaike information criterion* (AIC) : c'est un indice de sélection du meilleur modèle basé sur la minimisation de la distance de Kullback-Liebler. Les meilleurs modèles montrent des valeurs faibles d'AIC.

$$AIC = N \cdot \ln \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{N} + 2p$$

5. Analyse graphique des résidus : dans un premier temps, l'analyse consiste à vérifier la normalité des résidus, ensuite l'homogénéité de leur nuage de point par rapport à la droite représentative des résidus nuls en fonction des valeurs prédites. Pour une dispersion acceptable, le nuage de point forme une masse homogène autour de cette droite.
6. Analyse de la capacité de prédiction : par le calcul du critère de précision du modèle qui est exprimé comme suit :

$$REF_{aj}^2 = 1 - \frac{\sum (Z_i - \hat{Z}_i)^2}{\sum (Z_i - \bar{Z}_i)^2} \left( \frac{N-1}{N-p} \right)$$

Où  $Z_i$  et  $\bar{Z}_i$  sont respectivement les valeurs observée et moyenne de la hauteur,  $\hat{Z}_i$  est la valeur de hauteur prédite, N est le nombre total des données et p le nombre de paramètres estimés.

**B. Résultats des tests de validation:**

Les tests arithmétiques sont récapitulés dans le tableau 7.5.

Tableau 7.5: Tests de qualité et de validation des modèles établis.

	Modèles ajustés	$R^2_{aj}$	$\bar{E}$	MSE	AIC	Test de Fisher	
						F	p-value
<b>Dhôte et De Hercé</b>	Fer. F	0.373	0.00002	1.58	91.44	109.1	0.0000
	Fer. M	0.438	0.00002	1.56	117.05	191.7	0.0000
	Fer. B	0.342	0.00001	1.12	21.91	80.24	0.0000
	Den. F	0.345	0.00007	1.52	34.26	30.92	0.0000
	Den. M	0.633	-0.00007	0.70	-11.7	58.61	0.0000
	Den. E.	0.368	0.00001	9.02	12.77	23.09	0.0002
	Tir.	0.506	0.00001	2.44	543.06	19.17	0.0000
	Chell.	0.781	0.003	0.21	-192.7	403.05	0.0000
	Tik	0.924	0.00003	1.33	79.09	1981.7	0.0000
<b>Schnute</b>	Den. F	0.348	0.007	1.27	58.05	91.28	0.0000
	Den. M	0.413	0.002	1.54	159.54	128.63	0.0000
	Den. E.	0.311	-0.001	0.98	-30.97	71.25	0.0000
	Chell.	0.682	-0.0002	0.28	-158.1	264.63	0.0000
	Tik	0.901	0.00001	1.63	128.01	1620.3	0.0000
<b>Fortin et al.</b>	Fer. F	0.362	-0.0008	1.59	89.72	105.57	0.0000
	Fer. M	0.429	-0.001	1.48	77.34	139.58	0.0000
	Fer. B	0.310	-0.003	1.73	92.38	116.91	0.0000
	Den. F	0.322	-0.0004	1.56	31.05	29.79	0.0000
	Den. M	0.529	-0.001	0.75	-10.68	47.89	0.0000
	Den. E.	0.309	-0.0009	1.22	11.42	19.33	0.0000
	Tir.	0.510	-0.0002	2.46	543.99	169.44	0.0000
	Chell.	0.727	-0.002	0.24	-176.57	325.79	0.0000
	T.O.	0.206	-0.00015	7.06	5.33	16.50	0.0001

Le tableau 7.5 montre qu'à l'exemple des modèles "TO" et "Den.E" ajustés respectivement pour la plantation de Tizi Oujaâboub et la station de densité élevée, plusieurs autres modèles montrent des  $R^2_{aj}$  faibles mais significatifs au seuil  $\alpha=0,05$  ; ils sont compris entre 0,20 et 0,34. L'acceptabilité de ces modèles est confirmée par les autres tests effectués.

A noter que pour les trois formes utilisées, les deux modèles "Chell" et "Tik" se discriminent par leur haute qualité d'ajustement.

Pour tous les modèles, le biais est très faible et tend vers zéro, ce critère évalue globalement la pertinence des ajustements mais, dans ce cas, il est incapable de les classer puisque pour des valeurs extrêmes de  $R^2_{aj}$ , il donne les mêmes estimations. Toutefois, le test de Fisher affirme l'absence de biais dans la mesure où la probabilité (p-value) que la pente de la droite diffère de 1 et la constante ne soit pas nulle est pratiquement insignifiante (p-value  $\approx 0$ ).

A l'exception des modèles "DenE" et "TO", le carré moyen résiduel (MSE) ne varie pas grandement (0,24 à 2,46). Ce critère apparaît en concordance avec le  $R^2_{aj}$ , donc, les valeurs les plus faibles sont affichées par les meilleurs modèles. Le même constat est noté pour les valeurs de l'AIC mais celui-ci dépend de l'effectif du jeu de données, ce qui l'exclue de la démarche de comparaison entreprise.

En ce qui concerne les deux tests graphiques, l'examen des histogrammes des résidus montre que, pour quasiment tous les modèles, les résidus de part et d'autre la valeur nulle occupent la classe dominante. Les distributions s'apparentent à une courbe en cloche et s'ajuste aisément aux lois unimodales telles que la loi normale. Ceci renseigne sur une diminution régulière des fréquences des résidus positifs et négatifs. Cependant, pour toutes formes confondues, les modèles FerM, DenF et DenM affichent une légère augmentation des résidus positifs, preuve d'une qualité d'ajustement inférieure (Annexe 1, Fig. 1, 3, 5, 7, 9, 11,13 et 15).

Une disposition correcte et homogène du nuage autour de la droite de résidus nuls est observée pour tous les modèles. Il apparaît que, d'une part, ce critère est étroitement lié à l'effectif du jeu de données (par exemple le modèle Tir), et d'autre part, il ne montre pas une concordance avec les autres tests arithmétiques puisque les nuages des résidus des modèles Chell et Tik apparaissent déséquilibrés (Annexe 1, Fig. 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, et 16).

D'après ces résultats, il apparaît que les deux formes hyperboliques sont plus efficaces en peuplements naturels qu'en plantations. Les résultats issus du modèle de Dhôte et de Hercé sur la cédraie de Tikjda sont plus probants. La capacité de prédiction de ce modèle est évaluée en utilisant 1733 couples hauteur-circonférence, la précision est de 0,58 (capacité de prédiction acceptable).

### 7.4.2.3. Présentation graphique des modèles obtenus

La forme géométrique des modèles obtenus pour chaque échantillon est présentée graphiquement dans les figures (7.6, 7 et 8). L'apparition de quelques ordonnées négatives est due à la fusion de modèles issus de jeux de données d'effectifs différents. Ceci n'a aucune incidence sur la robustesse de ces modèles.

#### ➤ Forme hyperbolique de Dhôte et de Hercé

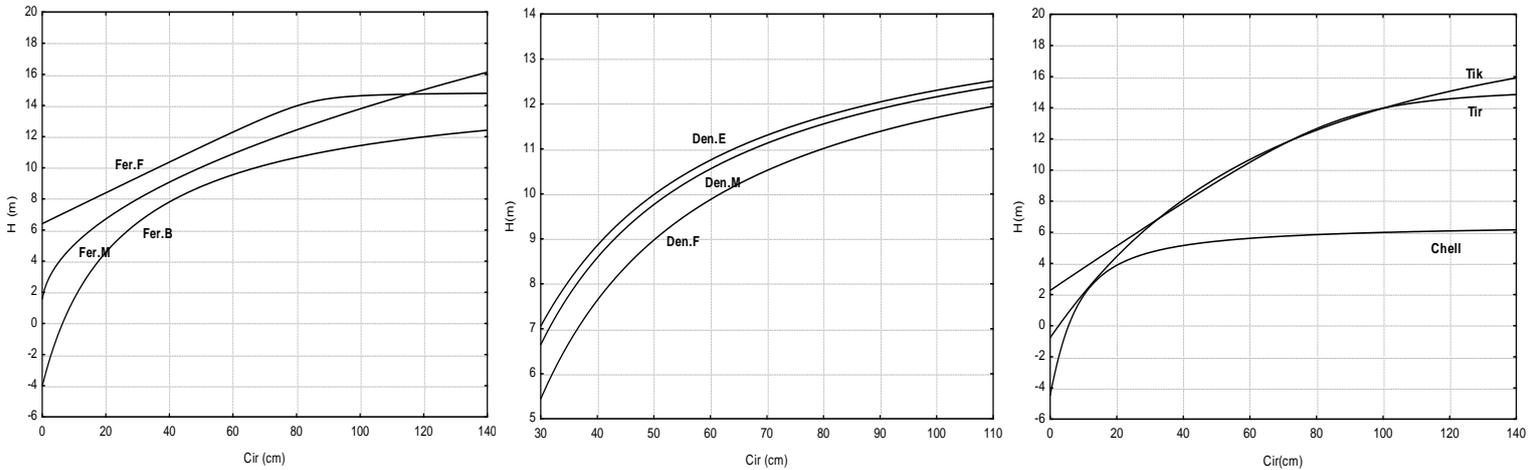


Fig.7.6 : Modèles issus de la forme hyperbolique de Dhôte et De Hercé.

#### ➤ Forme hyperbolique de Schnute

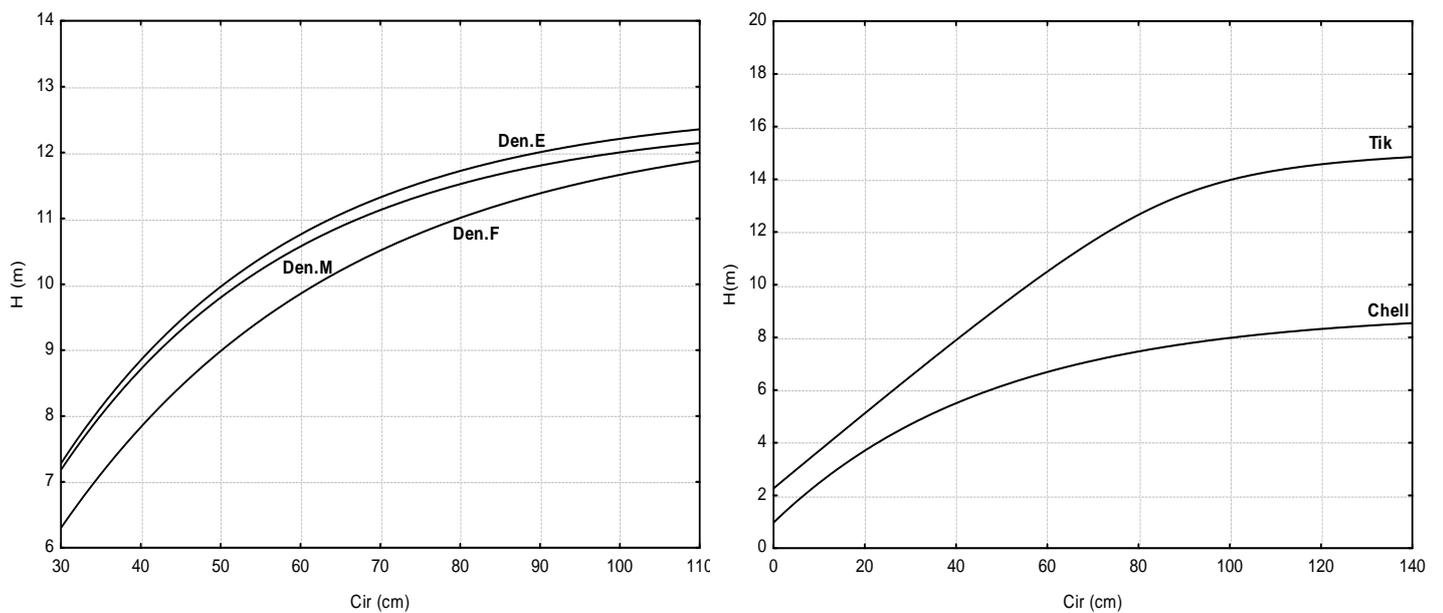


Fig.7.7 : Modèles issus de la forme hyperbolique de Schnute.

➤ **Modèles issus de la forme logarithmique de Fortin et al.**

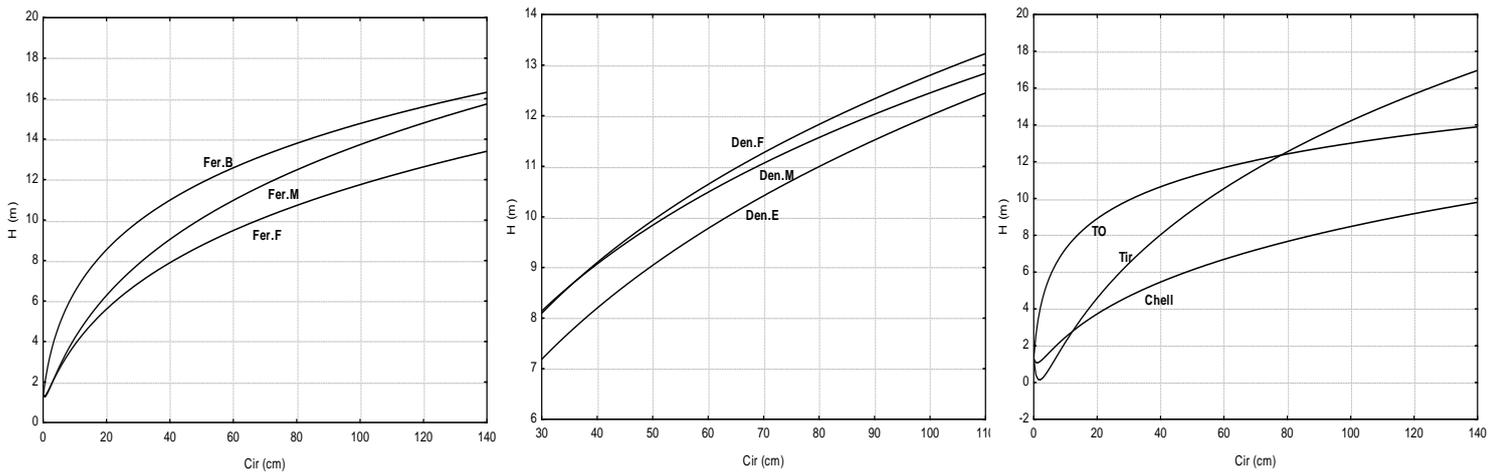


Fig.7.8 : Modèles issus de la forme logarithmique de Fortin et al.

### 7.4.3. Approche potentiel-réducteur et intégration de la concurrence

Cette approche ne peut pas être appliquée telle qu'elle est décrite ci-dessus du fait que le descripteur utilisé est l'âge des peuplements. Dans notre cas, ces données sont indisponibles puisque l'application du modèle de Maugé (1975) nécessite une multitude de peuplements réguliers répartis sur plusieurs catégories d'âge. En effet, la principale difficulté inhérente à cette approche est liée à la définition de la fonction POT. Ceci exige théoriquement l'observation de l'arbre en croissance libre, donc peu influencé par la concurrence. L'absence de stratification de la croissance en fonction du potentiel et du réducteur a mené à limiter cette partie à la modélisation séparée des facteurs constituant les réducteurs de la croissance. Nous nous intéressons, plus particulièrement, aux différents indices de compétition et leur liaison avec la croissance en hauteur et en circonférence. La fonction RED peut être assimilée à une contrainte à la croissance, elle rend compte de l'intensité de la compétition exercée sur l'arbre qui se présente sous les trois niveaux suivants :

- Compétition au niveau du peuplement ;
- Compétition au niveau de l'arbre, indépendamment des distances.

La compétition au niveau du peuplement montre l'intensité moyenne et générale de ce phénomène. Dans la littérature (Heshmatol Vaezin, 2006), elle est souvent mesurée en termes de densité du peuplement. Elle se définit par la mesure du matériel ligneux d'un peuplement forestier. Elle est exprimée souvent par certaines variables descriptives du peuplement telles que le nombre de tiges et la surface terrière par hectare ou certains indices de densité comme l'indice RDI, qui mesure le rapport entre le nombre de tiges observées et le nombre maximal de tiges pour le diamètre moyen du peuplement.

Les recherches sur la compétition dans le peuplement ont amené les auteurs à considérer également la compétition entre arbres. Cette notion consiste à introduire d'autres

effets que l'effet moyen. Les indices de compétition au niveau de l'arbre expliquent la concurrence entre arbres voisins pour les ressources disponibles par l'intermédiaire de leur localisation spatiale ou de leur dimension relative qui mesure la place qu'occupe l'arbre individuel dans la hiérarchie pour l'exploitation des ressources. Par exemple, le statut social.

L'intégration de la compétition à la modélisation de la croissance en hauteur et en circonférence a concerné un peuplement de structure régulière, à savoir la plantation du col de Tirourda (Djurdjura orientale). A noter que les données relatives aux dimensions du houppier issues des modèles établis dans le chapitre 5 (§ 552) seront utilisées dans cette partie. Dans la plantation du col de Tirourda, 24 placettes, d'espacements moyens différents, ont été individualisées. L'évolution des différentes expressions de la densité est étudiée selon un gradient croissant de l'espacement.

### 7.4.3.1. La densité et la compétition comme descripteurs de la croissance

#### A. Différentes expressions de la concurrence

##### A.1. La densité relative

La relation densité-production est l'un des principes fondamentaux de la modélisation de la croissance. Initialement, la densité était exprimée souvent par certaines variables descriptives du peuplement, telles que le nombre de tiges et la surface terrière par hectare. Aucune de ces deux variables n'est un indice idéal pour la densité car elles dépendent de l'âge et de la fertilité. La loi d'auto-éclaircie permet de définir un indice pertinent de densité pour les peuplements réguliers et mono-spécifiques. En foresterie, cette loi s'énonce comme suit : Pour une région et une espèce données, il existe une limite naturelle de croissance qui relie le nombre d'arbres et le diamètre moyen ( $D_g$ ) indépendamment de l'âge et de la station (Dhôte, 1999). L'équation suivante donne la forme mathématique de la loi d'auto-éclaircie.

$$N_{max} = \alpha D_g^{-\beta}$$

Avec :

$N_{max}$  : Nombre maximal de tiges que le peuplement peut comporter ;

$D_g$  : Diamètre de l'arbre de surface terrière moyenne ;

$\alpha$  et  $\beta$ : Paramètres du modèle.

La droite d'auto-éclaircie est de forme :

$$\text{Log } N = f(\text{Log } D_g)$$

Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  déterminent le niveau de la courbe d'auto-éclaircie et dépendent principalement de l'essence. Ils sont théoriquement plus élevés pour les espèces d'ombre que pour celles de lumière. A partir de cette loi, l'indice RDI (*Relative Density Index*) est défini en divisant le nombre de tiges du peuplement "N" (à un diamètre donné) par le nombre maximal

de tiges au même diamètre (Dhôte, 1999). Le RDI est défini comme le rapport entre le nombre de tiges observé et le nombre maximal de tige pour le diamètre quadratique moyen.

$$RDI = \left( \frac{N}{N_{max}} \right) = \frac{N}{\alpha} \cdot D_g^\beta$$

Donc, cet indice de densité prend une valeur comprise entre 0 et 1. Selon cet indice, dans chaque stade de développement, plus la densité du peuplement se rapproche de son nombre maximal, plus la concurrence pour toutes les ressources va augmenter. Selon Long (1985), la variation de l'indice de densité de 0 à 1 correspond à quatre phases différentes :

- Début de la concurrence ;
- Limite inférieure de l'occupation complète du terrain ;
- Limite inférieure de l'auto-éclaircie ;
- Densité maximale.

Pour les peuplements purs, les indices de densité correspondant à ces quatre phases sont respectivement, 0.25, 0.35, 0.6 et 1. Le paramètre  $\beta$  représente la pente de la droite d'auto-éclaircie. Plusieurs travaux cités par Heshmatol Vaezin (2006) montrent que le paramètre  $\beta$  prend une valeur moyenne de 1.605 et qui semble raisonnable pour toutes les essences.

## A.2. Indices indépendants des distances

Ceux-ci quantifient la concurrence globale du peuplement subie par l'arbre, abstraction faite de sa position par rapport à ses voisins. Dans les modèles d'arbre indépendant des distances, on caractérise le peuplement par la liste de ses arbres et la donnée de leurs dimensions, mais sans référence à leur localisation spatiale. Nous reprenons la synthèse de plusieurs indices de concurrence présentés par Ottorini (1978) et Rondeux (1993) :

### ▪ L'indice de statut social

Les indices qui prennent en compte la taille relative de l'individu au sein du peuplement sont appelés souvent le statut social, le rang social ou la position sociale de l'arbre. Le statut social mesure la place qu'occupe l'arbre individuel dans la hiérarchie pour l'exploitation des ressources. L'indice le plus utilisé est le *BAL* (*Basal area of larger trees*), il exprime la surface terrière cumulée de l'ensemble des voisins ayant le diamètre égal ou supérieur à l'arbre sujet ( $G_s$ ) :

$$BAL = \sum G_s$$

L'arbre est d'autant plus compétitif que la surface terrière de l'ensemble de ceux plus gros que lui est peu élevée.

Dhôte (1999) estime que, pour des surfaces réduites, la grosseur relative constitue un bon indicateur du rang social de l'arbre. Par le calcul d'un rapport entre la surface terrière  $g_i$  de

l'arbre et celle de l'arbre moyen  $\bar{g}$ , on peut déduire si l'arbre est compétitif. Donc, l'arbre "i" est d'autant plus vigoureux et compétitif que ce rapport est élevé.

Les surfaces terrières des arbres plus gros que l'arbre sujet ("Basal area of larger tree"; BAL), ont été très souvent utilisées comme l'indice de statut social applicable dans toutes structures forestières. Cependant, il semble que cet indice tient compte également de la densité du peuplement. Afin d'avoir un indice de statut social indépendant de la densité du peuplement et compris entre 0 et 1, il est normalisé par la surface terrière du peuplement et transformé comme suit :

$$RS = 1 - \frac{BAL}{G}$$

Avec :

*RS* : Rang social de l'arbre compris entre 0 et 1 ;

*BAL* : Surface terrière des arbres plus gros que l'arbre sujet ;

*G* : Surface terrière totale du peuplement.

▪ **Facteur de compétition des houppiers (CCF) :**

Krajicek et *al.* (1961) propose une mesure de densité axée sur la concurrence des houppiers. Le CCF (*crown competition factor*), valable aussi bien en peuplements équiennes qu'inéquiennes. Il part du principe que la surface occupée par un arbre en croissance libre est proportionnelle à la projection au sol de son houppier et qu'il existe une relation étroite, quel que soient l'âge et la station, entre le diamètre du houppier ( $d_{ho}$ , en m) et le diamètre à 1.30m ( $d$ , en m). Le principe se base sur une mise en place d'une relation de type :

$$d_{ho} = a_0 + a_1 d$$

et sur le calcul de la surface (supposée circulaire) maximale du houppier, MCA (*maximum crown area*), en  $m^2$ , qui correspond à :

$$MCA = \frac{[\pi(a_0 + a_1 d)^2]}{4}$$

Pour l'ensemble des  $N$  arbres constituant le peuplement occupant une surface totale  $S$  (en  $m^2$ ), le facteur de compétition des houppiers correspond, dans le cas d'un peuplement supposé fermé, au rapport exprimé en % entre la somme des MCA des arbres et la surface totale des projections des houppiers, assimilée à la surface totale du peuplement. Dans ces conditions, le facteur de compétition des houppiers s'écrit :

$$CCF = \frac{1}{S} \left[ \sum_{i=1}^N MCA_i \right] 100$$

$$CCF = \frac{25\pi}{S} \left[ Na_0 + 2a_0a_1 \sum_{i=1}^N d_i + a_1^2 \sum_{i=1}^N d_i^2 \right]$$

Il estime la surface disponible pour l'arbre moyen d'un peuplement en fonction de la surface maximale qu'il pourrait utiliser s'il se développait sans concurrence. Ce facteur est utile à considérer en vue de comparer les valeurs de différents paramètres de densité de peuplement, d'établir des relations entre la croissance des peuplements et leur densité ou de préciser l'importance des interventions sylvicoles telles que les éclaircies. Les arbres d'un peuplement qui se sont développés sans concurrence et qui ont atteint le stade de complète fermeture du couvert, sont caractérisés par un facteur de compétition approximativement égal à 100. La concurrence est d'autant plus accentuée que ce même facteur grandit au-delà de 100 (Ottorini, 1978).

- **Le quotient d'espace vital (TAR)**

Il est suggéré par Chisman et Schumacher (1940) au Etats-Unis, c'est une mesure indépendante de l'âge et de la station, et applicable aussi bien aux peuplements équiennes qu'inéquiennes. Il s'appuie sur la relation entre le diamètre à 1,30m et la surface projetée des couronnes d'arbres se développant en peuplements naturels "normaux", ceux appelés ainsi au Etats-Unis et au Canada qui se sont établis de façon naturelle, n'ont pas subi d'interventions sylvicoles et sont de densité maximum pour l'espèce considérée.

Pour chaque arbre  $y_i$  dont la surface projetée de la cime est désignée par  $(TA)_i$  et le diamètre à 1,30m par  $d_i$ , il est supposé que son espace de croissance peut être exprimé au moyen d'une relation de la forme :

$$(TA)_i \cong a_0 + a_1 d_i + a_2 d_i^2$$

S'il est mesuré les diamètres des  $N$  arbres sur une surface égale à l'unité de surface, il est admis aussi :

$$TAR = \sum_{i=1}^N (TA)_i \cong a_0 N + a_1 \sum_{i=1}^N d_i + a_2 \sum_{i=1}^N d_i^2 \approx 1$$

Les coefficients  $a_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$  peuvent être déterminés par la méthode des moindres carrés. En pratique, après détermination des coefficients, on peut calculer le TAR d'un peuplement quelconque différent d'un peuplement normal et dont le nombre d'individus à l'unité de surface, le diamètre moyen et la surface terrière moyenne seraient respectivement égaux à  $N$ ,  $d$  et  $g$ .

$$TAR = N \left( a_0 + a_1 d + a_2 \frac{4}{\pi} g \right)$$

- **Indice de densité de Reineke (IR)**

$$IR = N \cdot (25/D_g)^{-1,81}$$

- **Facteur d'espacement de Hart-Becking (IH)**

$$IH = 100. (a/h_{dom}) = \frac{10000}{h_{dom}} \sqrt{\frac{2}{N\sqrt{3}}}$$

- **Facteur d'espacement de Veen (IV)**

$$IV = \frac{N. h_{dom}^2}{10000} = 11547/IH^2$$

Ces trois derniers indices (IR, IH et IV) sont valables seulement pour les peuplements de structure régulière.

### 7.4.3.2. Interprétation et discussion des résultats

#### A. Evolution du degré de compétition avec l'espacement

L'évolution de tous les indices suivant un gradient de l'espacement moyen allant de 1,17 à 5,1m est présentée dans les figures 7.9 et 7.10. Le quotient d'espace vital (TAR) et le facteur de compétition des houppiers (CCF) montrent une dynamique similaire du fait qu'ils se basent sur la surface de projection des houppiers. Néanmoins, on peut observer que ces deux indices marquent une diminution brusque au début suivie d'une phase presque stationnaire signifiant que le TAR et le CCF sont faiblement sensibles à l'augmentation de l'espacement.

La même évolution est constatée pour la courbe de la densité relative (RDI), celle-ci est assimilée à une tendance exponentielle décroissante. Le RDI diminue sensiblement pour les espacements faibles (inferieurs à 2m), ensuite il observe un rythme moins accentué.

Une même allure de diminution est notée pour l'indice de densité (IR) et le facteur d'espacement de Veen (IV), mais ce dernier montre une évolution moins homogène comparée à celle de l'indice IR. La courbe du facteur d'espacement de Hart-Becking (IH) tend à augmenter avec l'espacement.

La courbe représentant le rang social (RS) en fonction de l'espacement (Fig.7.10) mérite une attention particulière. Il apparaît clairement qu'aucune tendance n'est observable, par conséquent, le statut social de l'arbre de surface terrière moyenne est indépendant de l'espacement, ce qui laisse penser qu'un indice dépendant des distances serait plus efficace puisque l'effet individuel est plus prépondérant et celui moyen ne peut pas renseigner sur une éventuelle interaction "compétition – espacement – croissance". Ceux-ci ne sont pas discutés dans ce travail, toutefois, nous avons jugé utile de donner brièvement ci-dessous un aperçu bibliographique.

Les indices dépendants des distances imposent de connaître la localisation respective de chaque arbre soumis à la concurrence individuelle de ces voisins. A ce titre, ces indices sont plus complexes, car ils doivent intégrer les effets de la compétition entre arbres, mais ils rendent mieux compte de la réaction de ceux-ci à des situations de croissance différentes et de répartition très irrégulière de l'espace vital.

L'analyse des relations d'allométrie "tige-houppier" ont conduit à introduire la notion d'espace vital (Ottorini, 1978). À partir de cette notion, de nombreux chercheurs ont proposé des indices de compétition empiriques tenant compte des dimensions relatives des arbres voisins, de leur distance et de leur orientation (Houllier et *al.*, 1991).

Pour des objectifs de gestion beaucoup plus pointus, le forestier cherche à particulariser les conditions dans lesquelles se trouvent un arbre donné d'un peuplement, du point de vue de la proximité et de l'importance des autres arbres susceptibles de le gêner dans sa croissance. Il était introduit une notion de densité locale qui a été formalisée par ce qui est convenu d'appeler "indice de concurrence". Le problème qui se pose lors de la conception d'un indice de concurrence est celui de pouvoir caractériser les conditions locales de croissance en peuplement de chaque arbre de façon synthétique. Il existe diverses expressions qui ont été utilisées en vue de caractériser, au moyen de valeurs numériques, les conditions locales de croissance d'un arbre au sein d'un peuplement (Rondeux, 1993).

Hegy (1974) cité par Rondeux (1993) propose une expression de l'indice de compétition d'application nettement plus simple, basé sur la prise en considération des diamètres de houppiers et des distances entre arbres. Pour un arbre donné  $j$ , elle s'écrit :

$$IC_j = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{(d_{ho})_i}{(d_{ho})_j} \cdot \frac{1}{L_{ij}} \right]$$

Où  $(d_{ho})_i$  : diamètre des houppiers de l'arbre compétiteur "i" et de l'arbre soumis à la compétition "j" (en pied).

$L_{ij}$  : distance entre l'arbre compétiteur "i" et celui soumis à la compétition  $j$  (en pied).

$n$  : nombre d'arbres interceptés par le relascope de Bitterlich ou par un prisme relascopique situé au centre de l'arbre soumis à la compétition.

Goreaud (2000) propose un indice de compétition très simple mais très classique, à savoir la somme des surfaces terrières des arbres voisins dans un disque de rayon  $R$ , notée "ngi(R)". Cet indice intègre donc à la fois le nombre de voisins et leur taille.

$$ng_i(R) = \sum_{dist(i,j) < R} G_i$$

Avec :

"R" : rayon de 6m ;

"G" : surface terrière des voisins.

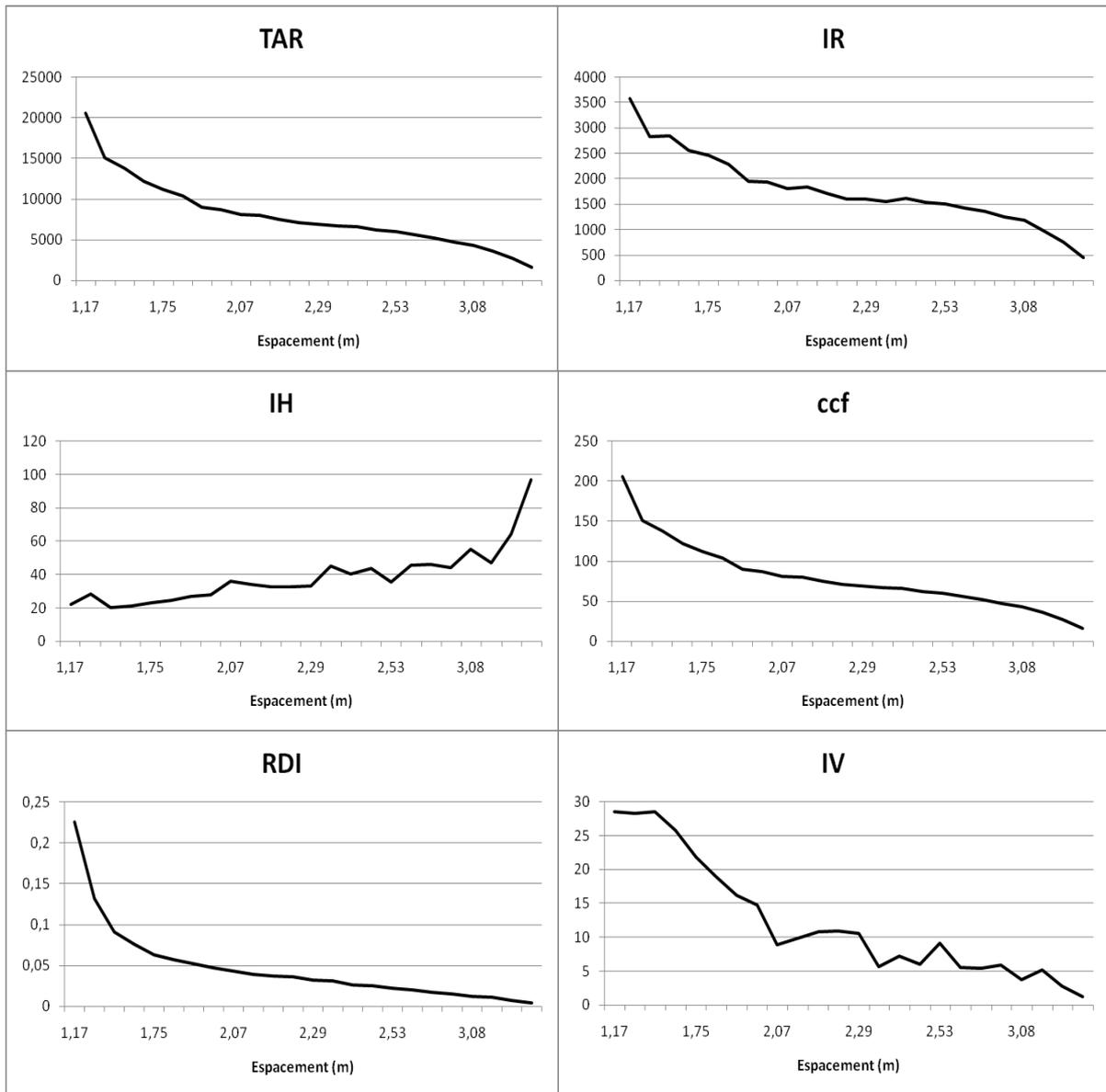


Fig.7.9 : Evolution des différentes expressions de la concurrence avec l'espacement.

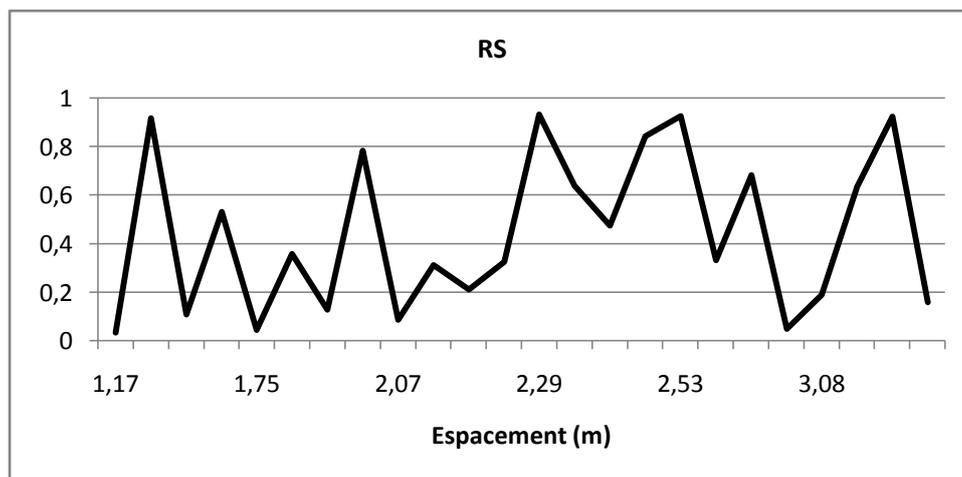


Fig.7.10 : Evolution avec l'espacement du rang social de l'arbre de surface terrière moyenne.

## **B. Influence de la compétition sur la croissance en hauteur et en diamètre**

La méthode consiste à introduire tous les descripteurs pouvant influencer sur la croissance en hauteur et en diamètre. Le choix des descripteurs les plus pertinents est basé sur la procédure des meilleurs sous-ensembles. L'élimination des régresseurs redondants est nécessaire pour optimiser les modèles de régression multiple établis. Le modèle le moins biaisé s'accompagne d'un  $R^2_{aj}$  élevé, d'une variance résiduelle (S) faible et du Cp de Mallows proche du nombre de paramètres explicatifs.

### Descripteurs de la croissance en hauteur

Les meilleurs sous-ensembles obtenus montrent que l'introduction de la hauteur dominante ( $H_d$ ) comme potentiel de croissance (fertilité de la station) n'as pas permis l'amélioration de la qualité de la régression. Cependant, l'intégration de tous les régresseurs n'as pas induit une importante perte de l'information (Fig.7.11).

Le premier modèle de régression obtenu est le suivant :

$$[Ht = 0,40 + 0,0138 IR + 0,0589 IH + 0,966 RS - 0,199 CCF]$$

Il montre que c'est le statut social (RS) qui a l'influence positive et prépondérante sur la croissance en hauteur. Le facteur de compétition des houppiers (CCF) joue le rôle de réducteur de l'élancement. L'intégration de la hauteur dominante ( $H_d$ ) a débouché sur le modèle suivant :

$$[Ht = - 2,44 + 0,170 Hd + 0,0135 IR + 0,0736 IH + 1,09 RS - 0,191 CCF]$$

Celui-ci permet de noter une légère influence positive de la hauteur dominante. Les effets, positif du RS et négatif du CCF, n'ont pas beaucoup évolués. Notons que comme le coefficient du CCF est négatif, il s'agit bien d'un effet de compétition. L'indice de compétition contribue beaucoup moins que l'effet taille (quantifié par le RS) à la prédiction de la croissance. Ce constat n'est pas étonnant, car la taille de l'arbre intègre sa croissance passée, qui rend déjà compte de ses conditions de croissance. L'arbre qui a subi une compétition ne pourra pas avoir un RS important, donc, les individus affranchis de la concurrence auront plus de chance de devenir des sujets dominants.

### Descripteurs de la croissance en diamètre

Les modèles de régression dont la réponse est le diamètre sont beaucoup plus efficaces (Fig.7.12). L'obtention de  $R^2_{aj}$  hautement significatif a permis de choisir directement le modèle complet avec cinq descripteurs. La régression obtenue est la suivante :

$$[D = 20,5 + 0,129 Hd + 0,00296 IR + 0,0702 IH + 0,087 RS - 0,0879 CCF]$$

L'effet positif le plus notable est celui de la hauteur dominante suivie du statut social. Il ressort un léger effet réducteur du CCF sur la croissance en diamètre.

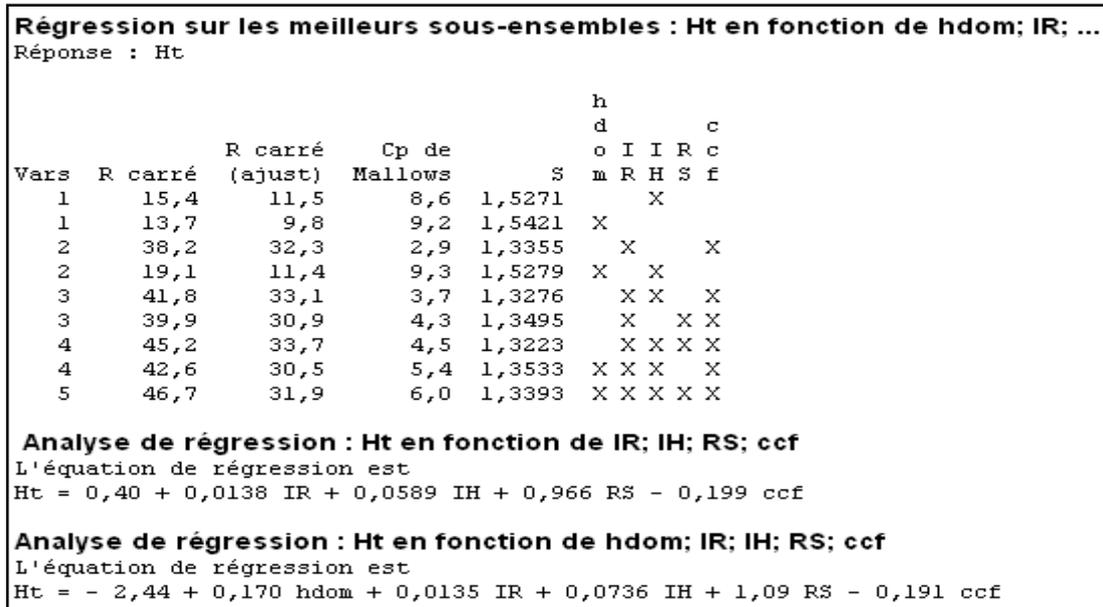


Fig.7.11 : Modèles de régression obtenus (Réponse : Ht).

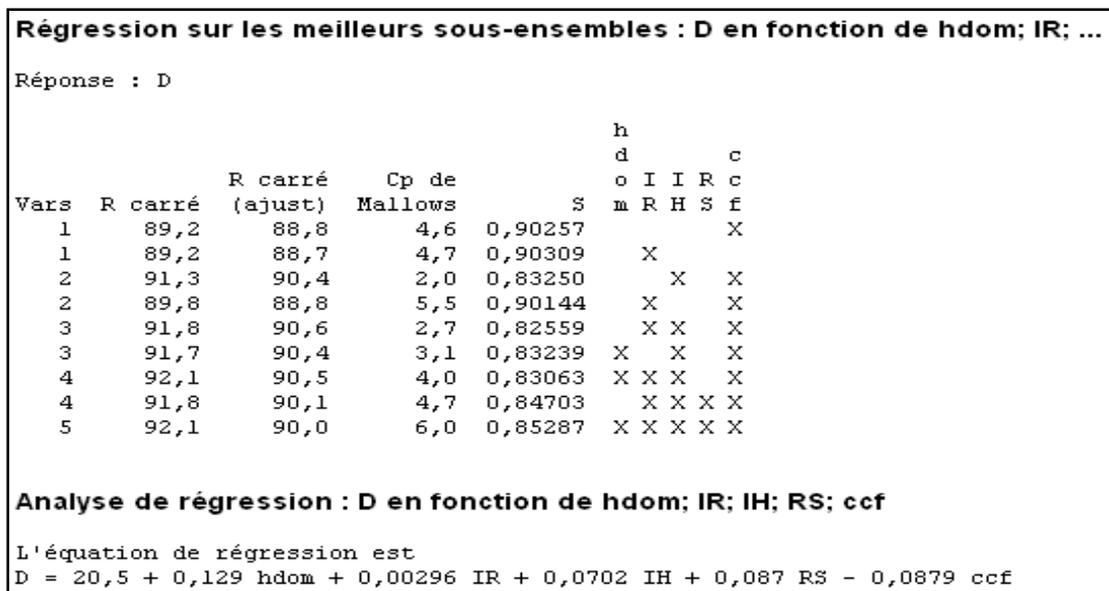


Fig.7.12 : Modèles de régression obtenus (Réponse : D).

## Conclusion

Cette partie a concerné l'application de trois approches de la modélisation de la croissance en hauteur en fonction de la circonférence sur plusieurs peuplements réguliers et irréguliers de cèdre de l'Atlas. L'objectif est de mettre en évidence l'effet de la fertilité de la station et de la compétition, à travers la densité et l'espacement, sur ces deux grandeurs dendrométriques régissant la croissance des arbres.

L'utilisation de la forme polynomiale qui débouche sur des modèles paraboliques a montré son efficacité pour le cas des plantations de cèdre où les facteurs, fertilité et âge, ont été bien pris en compte par cette forme. Cependant, l'effet de la densité, pourtant bien établi, sur l'élancement et le grossissement des arbres n'est pas clairement mis en évidence.

A l'exception du modèle de Schnute qui a montré des difficultés à s'ajuster aux nuages de points, les formes hyperbolique et logarithmique en sont en parfaite adéquation. Leur paramétrage a mis en exergue l'effet de la fertilité de la station à travers la croissance asymptotique en hauteur et celui de la densité par le rapport entre l'accroissement en hauteur et en diamètre.

L'intégration de diverses expressions de la compétition en tant que descripteurs dans des modèles de régression multiple a montré qu'à part le facteur de compétition des couronnes dont l'effet est notable, l'influence des autres indices utilisés n'est pas clairement démontrée. En outre le rôle réducteur de la compétition, l'influence positive de la qualité de la station est établie. Il s'avère que les indices indépendants des distances, qui permettent de quantifier seulement l'effet global de la compétition, ne rendent pas compte de la réalité des interactions compétition – croissance. L'utilisation d'indices dépendants des distances conduirait à l'obtention de résultats plus probants et à une application plus efficace de l'approche potentiel-réducteur.

---

## Conclusion générale et perspectives

Ce travail a été mené dans le Djurdjura où l'échantillonnage a concerné la cédraie naturelle de Tikjda et trois plantations artificielles d'âge différent. Pour une démarche de comparaison, les reboisements réalisés dans l'Atlas blidéen sont aussi inventoriés. Cette approche de comparaison est aussi adoptée pour comparer la duraminisation des cédraies humides à celles du semi-aride. L'objectif global de cette étude est d'appréhender les facteurs du milieu et sylviculturaux régissant le comportement du cèdre de l'Atlas en introduisant plusieurs aspects tels que la structure, la croissance radiale, en hauteur et en diamètre, le développement du houppier et la duraminisation.

L'analyse descriptive des reboisements a confirmé les potentialités productives déjà connues de cette essence. Cette affirmation découle du taux de réussite exceptionnel déduit des inventaires. Quelle que soit la plantation, le taux de réussite dépasse les 80%, l'accroissement radial atteint 5,58mm, le diamètre moyen avoisine 40cm et une hauteur dominante de 16m à 34 ans. Bien que les reboisements soient une réussite, les volumes reboisés initialement sont réduits de moitié eu égard au pacage. Il résulte que les stations les plus défavorables au cèdre sont celles à faible pente en présence de sol à hydromorphie temporaire.

Les modèles de structure obtenus appuient la pertinence du choix de la distribution théorique de Weibull. Celle-ci apparaît plus efficace en peuplements réguliers que pour ceux d'allure jardinée. Ces modèles constituent aussi une façon subtile d'approcher la croissance moyenne en diamètre. Toutefois, l'établissement d'un modèle de structure n'est pas une fin en soi, son intérêt pratique réside dans le cadre d'une table de production par catégories de grosseur.

L'utilisation de plusieurs attributs morphologiques des couronnes a permis l'obtention d'une description exhaustive des houppiers des cèdres analysés. Il apparaît des résultats que la hauteur du houppier diminue avec l'âge, celle de la base est étroitement liée à la densité, par contre, l'extension latérale augmente en situation de faible densité. Ce comportement du houppier est attribué à sa capacité à occuper l'espace disponible et optimiser ainsi sa fonction photosynthétique. Ce résultat corrobore avec les mesures faiblement dispersées de la lumière sous le couvert qui varie faiblement avec le stade de développement de la futaie. Les régressions effectuées ont montré que la surface terrière et le diamètre sont les meilleurs descripteurs de la largeur du houppier. Ainsi, les actions de sylviculture visant à offrir aux couronnes plus d'espace, voire une biomasse foliaire importante, auront comme corolaire l'accroissement en diamètre et/ou en surface terrière. Cette relation est confortée par le fait que les valeurs de l'indice foliaire augmentent exponentiellement avec l'âge.

L'étude du phénomène de duraminisation a montré l'influence de la station sur les taux d'aubier et de duramen. En conditions défavorables, la quantité du bois fonctionnel est faible. Dans des conditions optimales de croissance, voire dans le bioclimat humide, la duraminisation démarre précocement, elle est plutôt tardive dans les cédraies confinées dans le semi-aride. L'état sanitaire de l'arbre, particulièrement de son houppier, est en étroite relation avec la proportion d'aubier dans la mesure où les sujets dépérissants en présentent des taux très faibles. Les résultats obtenus de la validation de la théorie du modèle tubulaire (*pipe model*), établissant une relation proportionnelle entre la quantité d'aubier et la biomasse foliaire, confirment ces observations. Le fait que les fortes proportions d'aubier soient associées à un rythme rapide de la croissance radiale et la diminution de ce dernier avec l'âge (effet du vieillissement) constitue un indice sur la qualité et l'usage du bois de cèdre en industrie. De ce point de vue, la production de bois avec une faible proportion de duramen telle que préconisée pour les industries papetières est favorisée par une croissance rapide et une récolte précoce, alors que la production de bois avec un minimum d'aubier comme recherché pour le bois de construction est favorisée par une croissance lente et une exploitation tardive.

L'étude de la cinétique de la croissance en hauteur et en circonférence par l'utilisation de formes paraboliques a permis de mettre en exergue l'effet de l'âge et de la fertilité de la station. Toutefois, celui de la densité n'as pas pu être démontré ; cet effet a été bien vérifié par un paramétrage adéquat des modèles hyperboliques testés. La concurrence liée à ces deux descripteurs est étudiée par l'intégration de diverses expressions de la compétition. Les résultats soulignent le rôle réducteur du facteur de compétition des couronnes par rapport à la croissance. L'estimation d'un effet moyen et global de la compétition a rendu l'influence des

autres indices tels que l'indice de densité de Reineke (IR), le facteur d'espacement de Hart-Becking et de Veen (IH et IV) faiblement significative, l'effet individuel en serait plus apparent.

En perspective, l'établissement d'un bilan exhaustif des reboisements en relation avec les conditions de milieu nécessite l'élargissement du champ d'investigation à d'autres situations plus contrastées d'Algérie, notamment du point de vue édaphique et climatique. Egalement, la connaissance des provenances des semences, des techniques d'élevage en pépinière, des soins culturaux pratiqués sont autant d'informations permettant une meilleure compréhension du tempérament du cèdre. Par ailleurs, la maîtrise de ce dernier permettra d'augmenter les chances de réussite des plantations ultérieures, voire l'élargissement de l'aire de l'espèce de manière à couvrir son aire potentielle qui serait de 128000 ha. Faire face à la régression des cédraies survenue ces dernières décennies nécessite un programme de restauration tout en considérant les divers changements qui s'opèrent dans le bassin méditerranéen, surtout l'effet des sécheresses prolongées devenu déterminant. Il s'agit d'anticiper les effets irréversibles des changements climatiques dont leurs conséquences pourraient être amorties par une connaissance écophysologique approfondie du cèdre de l'Atlas.

Des modèles fonctionnels peuvent mieux appréhender les interactions entre l'ensemble des descripteurs du milieu et ceux de l'arbre et constituent un outil de gestion pratique. Ceci trouve son intérêt dans la définition d'une typologie des peuplements de cèdre qu'on peut même élargir à la qualité du bois. C'est le cas par exemple de l'étude de la duraminisation présentée dans ce travail. Ce phénomène a été étudié en s'appuyant sur des mesures biométriques des deux types de bois, il serait judicieux et complémentaire d'aborder les processus chimiques régissant ce phénomène et approcher ainsi la qualité technologique et la durabilité du bois de cette essence.

---

# Références bibliographiques

Abd Kudus K., Ahmad M-I. and Lapongan J., 1999 - Nonlinear regression approach to estimating Johnson SB parameters for diameter data. *Can. J. For. Res.* (29), pp: 310–314

Abdelhamid Dj., Allal-Benfekih L. and Mouna M., 2014 - Could edaphic factors be at origin of *Cedrus atlantica* (Manetti, 1844) decay in the National Park of Theniet El Had (Northern Algeria)? *Advances in Applied Science Research*, 5(4), pp :7-12

Abdesselam M., 1995 – Structure et fonctionnement d'un karst de montagne sous climat méditerranéen : exemple du Djurdjura occidental (Grande Kabylie, Algérie). Thèse doctorat de l'univ. Franche-Comté. 232p.

Abdesselam M., Mania J., Mudry J., Gélard J.-P., MChauve P., Lami H. & Aigoun C., 2000 - Arguments hydrogéochimiques en faveur du Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (Dorsale kabyle, élément des Maghrébides). *Revue des Sciences de l'eau*, 12(2), pp. 155-166.

Abdessemed K., 1981 – Le cèdre de l'Atlas dans les massifs de l'Aurès et du Belezma. Etude phytosociologique. Problèmes de conservation et d'aménagement. Thèse de Doct. Ingénieur, fact. St-Jérôme, univ. Aix, Marseille III, 199p.

Abdessemed S., 2009 – Comportement des semis du cèdre de l'Atlas en conditions de stress thermique. Mém. Mag. Bio. vég. Univ. Constantine, 153p.

Abdou G. et Oukhaf N., 2002 - Etude phytoécologique des formations végétales de la partie centrale du Parc National de Chréa et proposition de réhabilitation pour étude de quelques espèces « rustiques ». Thèse. Ing. Ecolo. Univ. Sci. Techn, U.S.T.H.B, 171p.

Abourouh M., 1994 – Les ectomycorhizes du cèdre de l'Atlas: état des connaissances et perspectives. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27 (spécial), pp:337–348

Addar, 2003 - Analyse dynamique de la végétation et biodiversité des massifs orientaux et occidental du Djurdjura. Mém. Magister. USTHB, Alger. 251 p.

Adlard P.G., 1995 – Myth and reality in growth estimation. *For. Ecol. Manag.* 71, pp: 171-176.

Aidrous-Larbi N., 2007 – Exploration de la variabilité géographique des cèdres méditerranéens. Mém. Mag. Sci. agr. ENSA, Alger, 115p.

Arbez M., Ferrandès P. et Uyar N., 1978 – Contribution à l'étude de la variabilité géographique des Cèdres. *Annales des Sciences forestières*, vol. 35, n° 4, 1978, pp. 265-284.

Argillier C., Falconnet G., Moussain D. et Guehl J.M., 1994 – Technique de production hors-sol du cèdre de l'Atlas. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27 (spécial), pp: 487-497.

Arney J. D., 1984 – A modeling strategy for the growth projection of managed stands. *Can. J. For. Res.* 15 : pp : 511-518.

Aussenac G. et Finkelstein D., 1983 – Influence de la sécheresse sur la croissance et la photosynthèse du cèdre. *Ann. Sei. Forest.*, 40 (1), pp : 67-78.

Aussenac G. et Granier A., 1978 - Quelques résultats de cinétique journalière du potentiel de sève chez les arbres forestiers. *Ann. Sc. forest*, 35 (1), 19-32.

Aussenac G., 2000 - Interactions between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. *Ann. For. Sci.* 57, pp :287–301

Aussenac G. et El Nour M., 1985 – Utilisation des contraintes hydriques pour le préconditionnement des plants avant plantation ; premières observations pour le cèdre et le pin noir. *Rev. For. Fr.* XXXVII, (5) pp : 371-376

Aussenac G., et El Nour M., 1986 – Évolution du potentiel hydrique et du système racinaire de jeunes plants de cèdre, pin laricio de Corse et pin noir plantés à l'automne et au printemps. *Ann. Sci. For.* 43, pp : 1-14.

Aussenac G., Guehl J.M., Kaushal P., Granier A. & Grieu P., 1988 – Critères physiologiques pour l'évaluation de la qualité des plants forestiers avant plantation. *Rev. For. Fr.* 40s, pp : 131-139

Aussenac G., Valette J.-C., 1982 – Comportement estival de *Cedrus atlantica* Manetti, *Quercus ilex* L., *Quercus pubescens* Willd. et de divers pins dans le Mont Ventoux. *Ann. Sci. for.* 39 (1), pp :41-62.

Bagnouls F. & Gaussen H., 1953. Saison sèche et indice xérothermique. *Bull. Soc. Hist. Nat.* Toulouse, 88, pp.193-239

Bailey R.L. et Dell T.R., 1973 - Quantifying diameter distributions with the Weibull function. *Forest Sci.* (19), pp : 97–104.

Balandier P., Marquier A., Perret S., Collet C. et Courbaud B., 2010 - Comment estimer la lumière dans le sous bois forestier à partir des caractéristiques dendrométriques des peuplements ? *RDV techniques* n°27-28 - hiver-printemps 2010 – ONF, 7p.

Balandier P., Pauwels D., 2002 - La lumière, outil sylvicole pour favoriser la diversité végétale ou la gestion cynégétique des peuplements de mélèze (*Larix* sp.). *Forêt Wallonne* n° 61, pp. 9-13.

Ballaré, C. L., Sanchez, R. A., Scopel, A. L., Casal, J. J., Ghersa, C. M. (1987). “Early detection of neighbour plants by phytochrome perception of spectral changes in reflected sunlight.” *Plant, Cell and Environment.* 10: 551-557.

Bamber R. K., 1976 – Heartwood, its Function and Formation. *Wood Science and Technology* Vol. 10, pp : 1-8.

Bamber R. K., 1987 – Sapwood and Heartwood. Forestry Commission of New South Wales, Technical Publication N°2, Wood Technology and Forest Research Division, Australia, 8p.

Baudot J.Y., 2012 – Principe de la vraisemblance. Cours de statistique en ligne. [www.jybaudot.com](http://www.jybaudot.com).

Bechtold, W.A. 2003. Crown-diameter prediction models for 87 species of stand-grown trees in the eastern United States. *Southern Journal of Applied forestry.* 27(4) : 269-278.

Beghami Y., 2013 – Ecologie et dynamique de la végétation de l'Aurès : analyse spatio-temporelle et étude de la flore forestière et montagnarde. Th. Doct. Sc. Agr. Univ. Biskra, 284p.

Belabbas Z., 2010 – caractéristiques biologiques et écologiques des pontes du Bombyx disparate, *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera : Lymantriidae) dans les yeuseraies dans parcs nationaux de Chréa et Djurdjura. Th. Mag. Sci. agr. ENSA, Alger, 134p.

Bellahcene O., Bensaâd F., 1989 – Contribution à l'étude des relations sol-végétation de la partie nord du Djurdjura (Tala-Guilef). Mém. Ing. agr. UMMTO. 79p.

Ben Tiba B. & Reille M., 1982 – Recherches pollenanlytiques dans les montagnes de Kroumirie (Tunisie Septentrionale) : premiers résultats, *Ecologia Mediterranea* VIII (4), pp : 76-86.

Benhalima S., Les insectes xylophages et leur rôle dans le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière) dans le Haut et le Moyen Atlas (Maroc). Travaux de l'Institut Scientifique Série Zoologie, n°46, université Mohammed V – Agdal (Maroc), 69p.

Benmouffok A., 1994. Approche écopédologique dans les formations à *Cedrus atlantica*. Cas du massif du Djurdjura, Algérie. *Ann. Rech. For. Maroc*, n° spécial, 27, vol. 1, 206-217. Rabat.

Benslama M., Andrieu-Ponel V., Guiter F., Reille M., De Beaulieu J-L., Migliore J., Djamali M., 2010 – Nouvelles contributions à l'histoire tardiglaciaire et holocène de la végétation en Algérie : analyses polliniques de deux profils sédimentaires du complexe humide d'El-Kala. *Comptes Rendus Biologies*, 333, pp : 744-754.

Bentouati A. et Oujehih B., 1999 – Première étude de la croissance et de la productivité du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif de Belezma (Aurès - Algérie). *Rev.For.médit.* t :XX, n° 2, pp :115-119.

Bentouati A., Bariteau M., 2006 - Réflexions sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas des Aurès (Algérie). *Rev.For.médit*, t. XXVII, n° 4, pp : 317-322.

Bergström B., Gref R., Ericsson A., 2004 – Effects of pruning on heartwood formation in Scots pine trees. *Journal of Forest Science*, 50 (1): pp.11–16

Berka S., 1997 – Étude de la variabilité intra-spécifique de *Cedrus atlantica* Manetti en Algérie par l'étude des stomates. — *Annales de la Recherche forestière en Algérie*, n° 1, Nouvelle série, 1997, pp : 12-23.

Bernard C. et Philippe D., 1994 – effet du dépressage dans une régénération naturelle mixte de cedre et pin noir. *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp :269-280.

Bertrand, T. 2001. Contribution à l'étude de la sylviculture du chêne sessile en futaie régulière claire, en Sologne bourbonnaise. Rapport de stage de fin d'études, *Ecole National du Génie Rural des Eaux et des Forêt* (ENGREF).

- Björklund L., 1999 – Identifying heartwood-rich stands or stems of *Pinus sylvestris* by using inventory data. *Silva Fennica* 33(2), pp : 119–129.
- Bou Dagher-Kharrat M., Mariette S., Lefèvre F., Fady B., Grenier-de March G., Plomion C., & Sauré A., 2007 – Geographical diversity and genetic relationships among *Cedrus* species estimated by AFLP. *Tree Genetics & Genomes* (3), pp:275-285.
- Bouchon J., 1979 – Structure des peuplements forestiers. *Ann. Sci. Forest.* 36 (3), pp. 175-209.
- Bouchon, J. 1995 - Concepts et caractéristiques des divers modèles de croissance. *Rev. For. Fr.* XLVII-n° sp : 23-34.
- Boudani F., 1989 - Contribution à l'étude de l'influence de l'altitude, du PH et du peuplement arborescente sur l'évolution de la strate herbacée de Chréa (Versant Nord). Mémoire, Ing. agro., Univ.Sci. Tech., Blida, 83 p.
- Boudy P., 1950 - Economie forestière Nord – Africaine. Monographie et traitement des essences forestières. Ed. Larose, T 2 : 529 – 619.
- Bouheraoua H., 1993 – Contribution à l'étude phytosociologique et phytodynamique des peuplements végétaux de la forêt du Boudjurdjura (Tala-Guilef, Djurdjura occidental). Mém. Ing. agr. UMMTO, 107p.
- Boukcim H., & Mousain D., 2001 – Effets de la fertilisation phosphatée sur la mycorhization, la croissance et la nutrition en phosphore et en azote de semis de cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti) inoculés en pépinière par *Tricholoma tridentinum* Sing. var. *cedretorum* Bon. *Ann. Sci. for.* 58, pp : 289-300.
- Bragg, D. C .2001. A local basal area adjustment for crown width prediction. *North. J. Appl. For.* 18(1) : 22-28
- Bréda N., Granier A., 1996 - Intra and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*), *Ann. Sci. For.* 53, pp : 521-536.
- Bréda N., Granier A., Aussenac G., 1995 - Effects of thinning on soil water balance and tree water relations, transpiration and growth in oak forest (*Quercus petraea* (Matt) Liebl.), *Tree Physiol.* 15, pp : 295-306.
- Bréda, N., 1999 - L'indice foliaire des couverts forestiers : mesure, variabilité et rôle fonctionnel. *Revue Forestière Française* 2 (LI), p. 135-150.

- Brunetti M., De Capua E. L., Macchioni N. & Monachello S., 2001 – Natural durability, physical and mechanical properties of Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) wood from Southern Italy. *Ann. For. Sci.* 58, pp : 607–613.
- Caquet B., 2008 - Réactions de semis naturels de hêtre (*Fagus sylvatica* L.) et d'érable sycomore (*Acer pseudoplatanus* L.) à l'ouverture du couvert : croissance et ajustements fonctionnels. Th. Doct. Bio. For. Univ. Henri Poincaré, Nancy-I, 150p.
- Castedo Dorado F., Barrio M., Parresol B.R., Alvarez Gonzalez J.G., 2005 - A stochastic height–diameter model for maritime pine ecoregions in Galicia (northwestern Spain). *Ann. For. Sci.* 62, pp : 455–465.
- Chattaway M., 1952 – The sapwood-heartwood transition. *Au. For.* (16), pp. 25-34.
- Chaumont M. & Paquin C., 1971. Notice explicative de la carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500 000. *Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du nord, Alger, 24 p. + carte.*
- Cheddadi R., 2006 – Impact du climat sur quelques espèces méditerranéennes : du passé au futur. Colloque de restitution (18 - 20 septembre 2006), réponses adaptatives au changement global : résultats et prospective, pp : 91-96.
- Cheddadi R., Lamb H.F., Guiot J., Van-Der-Kaars S., 1998 – Holocene climatic change in Morocco: a quantitative reconstruction from pollen data. *Clim. Dynam.* 14 pp : 883-890.
- Cheddadi, R., Fady, B., François, L., Hajar, L., Suc, J.P., Huang, K., Demarteau, M., Vendramin, G.G., Ortu, E., 2009 – Putative glacial refugia of *Cedrus atlantica* from Quaternary pollen records and modern genetic diversity. *Journal of Biogeography*, 36, pp :1361-1371.
- Chekchek M., 1985 - Cartographie de la végétation d'une partie du Parc National de Chréa (versant nord). Thèse Ing. Agro., Inst. nati. Agro. El Harrach, 135 p.
- Climent J., Gil L., Pardos J., 1993 – Heartwood and sapwood development and its relationship to growth and environment in *Pinus canariensis* Chr. Sm ex DC. *Forest Ecology and Management*, 59, pp : 165-174.
- Collet C., Ningre F., Constant T., De Boutray A. et Piboule A., 2010 - Les semis préexistants : une composante importante de la régénération dans les hêtraies mélangées. *RDV techniques* n°27-28 - hiver-printemps 2010 – ONF, 7p.
- Courbet F., 1994 – Stratégie de recherche pour l'étude et la prédiction de la croissance et de la qualité du bois de cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti) en France, Séminaire International sur le cèdre de l'Atlas au Maroc, *Ann. Rech. For. Maroc* 27 pp : 206–217.

- Courbet F., Lagacherie M., Marty P., Ladier J., Ripert C., Riou-Nivert P., Huard F., Amandier L., & Paillassa É., 2012 – Le cèdre en France face au changement climatique : bilan et recommandations. Rapport du projet “Adaptation des forêts au changement climatique”, 32p.
- Curtin, R. A. 1970. Dynamics of tree and crown structure in eucalyptus obliqua. *Forest science*. 16 : 3 321-328.
- Cutini A. et Mercurio R., 1994 – Les performances d’accroissement d’un peuplement de cedre de l’Atlas en éclaircie. *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp: 281-194.
- Cutini A., 1996 - The influence of drought and thinning on leaf area index estimates from canopy transmittance method, *Ann. Sci. For.* 53, pp: 595-603.
- Czudek, R. 1998 - Modélisation de la croissance individuelle du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) dans différentes conditions de densité locale et de milieu. Application à la sylviculture sélective par détournage. Thèse de doctorat, *ENGREF*, 213p.
- 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.
- Davi H., Soudani K., Deckx T., Dufrene E., Le Dantec V. and François C., 2006 - Estimation of forest leaf area index from SPOT imagery using NDVI distribution over forest stands. *International Journal of Remote Sensing* Vol. 27, N° 5, pp : 885–902.
- De Kort I., 1993 – Relationships between sapwood amount, latewood percentage, moisture content and crown vitality of douglas fir, *Pseudotsuga menziensis*. *IAWA Journal*, Vol. 14 (4), 1993, pp: 413-427.
- De Marteau M., François L., Cheddadi R., & Roche E., 2007 – Réponses de *Cedrus atlantica* aux changements climatiques passés et futurs. *Geo-Eco-Trop*, 31, pp: 105-146.
- Deleuze C., Blaudez D., Hervé 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.
- Derak M., M’hirit O., Mouflih B., et Et-Tobi M., 2008 - Influence de la densité et du type de peuplement sur le dépérissement du cèdre à Sidi M’Guild (Moyen Atlas marocain). *Forêt méditerranéenne. t. XXIX, n° 1*, pp : 23-32.

Derridj A., 1990 – Étude de la variabilité géographique des dimensions des pollens du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en Algérie. In : Symposium international sur le cèdre, FAO/IUFRO. Antalya, Turquie, octobre 1990, pp : 904-932.

Derridj A., 1990 – Etude des populations de *Cedrus atlantica* Manetti en Algérie. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 288 p.

DGF, 2006 – Atlas des parcs nationaux. Direction générale des forêts, Algérie, 96p.

DGF, 2012 – Projet de localisation de peuplements portes-graines en Algérie. [www.dgf.dz](http://www.dgf.dz).

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

Dhôte, J.F. 1987- Modèles de croissance des peuplements forestiers. Rapport de D.E.A, université Claude Bernard - Lyon 1,108p

Dhôte, J.F. 1999 - Compétition entre classes sociales chez le chêne sessile et le hêtre. *Rev. For. Fr.*LI.2, pp : 309-324.

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

Dubé F., 2007 – Étude sur la dynamique de succession et de régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* (Endl.) Carrière) et du chêne vert (*Quercus rotundifolia* Lam.) dans le Parc National d'Ifrane au Maroc. Rapport de stage, Fac. Sci. univ Sherbrooke, Canada, 94p.

Ducrey M., 1981 – Action des basses températures hivernales sur la photosynthèse du cèdre et du douglas. *Ann. Sci. for.* 38 (3), pp : 317-329.

Ducrey, M. (1993). Adaptation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au climat méditerranéen : Aspects écophysiologicals de sa réaction à la sécheresse. *Annales des Recherches Forestières du Maroc 27(special)*, 140-153.

Durand J.H., 1951 – sur quelques sols de la forêt d'Akfadou et des environs de Yakouren. *Ann. Agr.*, 2, pp. 110-126.

El Abid A., 1994 – Bilan des recherches au Maroc en matière d'exploitation et valorisation du cèdre, *Ann. Rech. For. Maroc* 27, pp : 628–637.

El-Azzouzi K., Keller R., 1998 – Propriétés technologiques du bois de cèdre de l'Atlas (Maroc), *Rev. For. Medit.* 29, pp : 11–33.

Ellatifi M., 1994 – Le cèdre de l'Atlas hors de son aire naturelle : propriétés technologiques, Actes du séminaire international sur le cèdre de l'Atlas, *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp : 684–697.

Emberger L., 1955. Une classification biogéographique des climats. *Rec. Trav. Lab. Bot. Géol. Zool., Fac. Sc. Univ. Montpellier, Bot.*, 7, 3-43.

Ezzahiri M., & Belghazi B., 2000 – Synthèse de quelques résultats sur la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas au Moyen Atlas (Maroc). *Sécheresse*, Vol. 11 (2), pp : 79-89.

Ezzahiri, M., Belghazi, B., et Bahmad, M. (1994). Bilan naturel de la régénération naturelle de la cédraie dans les parcelles clôturée du Moyen Atlas, Maroc. *Annales des Recherches Forestières du Maroc* 27(spécial), pp : 260-268.

Fabre J-P., 1988 - Possibilités d'infestation par les pucerons : *Cedrobium laportei* Remaudière, *Cinara cedri* Mimeur (Homoptera, Lachnidae), chez le genre *Cedrus*. *Ann. Sci. For.* 45(2), pp : 125-140.

Fabre J-P., Mouna M., Du Merle P., et Benhalima S., 1999 - Le point sur certains ravageurs du cèdre de l'Atlas en Afrique du nord, en France et en Europe. *Forêt méditerranéenne. t. XX, n° 4*, pp :203-218.

Fady B. et Vauthier D., 1988 – Comparaison des stratégies de croissance en hauteur du sapin de Céphalonie (*abies cephalonica* loud.) et du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Maneti). *Forêt méditerranéenne*, t. X, n° 2, pp : 397-406.

Ferrandès P., 1986 – Cèdres. *Revue forestière française*, vol. XXXVIII, n° spécial “Amélioration génétique des arbres forestiers”, pp : 139-141.

Finkelstein D., 1981 – Influence des conditions d'alimentation hydrique sur le débourrement et la croissance de jeunes plants de cèdre (*Cedrus atlantica* Manetti) cultivés en serre. *Ann. sci. for.* 38 (4), pp : 109-126.

Flandrin J., 1952. La chaîne du Djurdjura. XIXème Congrès Géologique International, Alger. Monographies régionales. 1ère Série : Algérie, 19 : 1–49.

Fonton H-N. et Sagbo A-A-P., 2004 - Modélisation des distributions des paramètres dendrométriques d'une espèce ligneuse dominante en peuplement naturel. *Ann. For. Sci.* (61), pp : 545–549.

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.

Francis, J. K. 1998. The relationship of bole diameters and crown widths of seven bottomland hardwood species. United States Department of Agriculture Forest Service, *Research Note* SO.328. 3 p.

Frey-Wyssling, A., Bosshard, H.H., 1959 - Cytology of the ray cells in sapwood and heartwood. *Holzforschung* 13(5), 129-137.

Gachet, C., 2000 - Eudes préliminaires sur la formation du duramen chez le pin maritime. Mémoire de DEA en Sciences du Bois, Univ. Bordeaux 1, France. 30 pp.

Gachi M., 1994 - Note sur la présence en Algérie de la processionnaire du cèdre: *Thaumetopoea bonjeani* powell (*Lepidoptera; Thaumetopoeidae*). *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp : 613-626.

Gering, L. R. 1995. The relationship of diameter at breast height and crown diameter for four species groups in Hardin County, Tennessee. *South. J. Appl. For.* 19 : 4 177-181.

Ghazil S., 2010 – étude de la migration des fluides dans le bois. Th. Doct. Sciences du bois et des fibres. Univ. Henri Poincaré, Nancy 1, 161p.

Gill S.J., Biging G.S. & Murphy E.C., 2000 - Modeling conifer tree crown radius and estimating canopy cover. *For. Ecol. Manage.* 126:405-416.

Giroud G., 2005 – Caractérisation de la proportion de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier (*Betula papyrifera* Marsh.). Mém. Univ. Laval, Quebec, Canada, 163p.

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.

Gorgoso J. J., Álvarez González J. G., Rojo A. and Grandas-Arias J. A., 2007 – Modelling diameter distributions of *Betula alba* L. stands in northwest Spain with the two-parameter Weibull function. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 16(2), pp 113-123.

Graf P. et Mzibri M., 1994 - L'infestation du cèdre d'Atlas *Cedrus atlantica* (Manetti) par la chenille processionnaire (*Thaumetopoea pityocampa* Schiff.) au Maroc et son impact sur la productivité. *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp : 527-538.

Granier A., 1981 – Etude des relations entre la section du bois d'aubier et la masse foliaire chez le Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco). *Ann. For. Sci.* 38 (4), pp : 503-512.

Guehl J.M., Falconnet G., et Gruez J., 1989 – Caractéristiques physiologiques et survie après plantation de plants de *Cedrus atlantica* élevés en conteneurs sur différents types de substrats de culture. *Ann. Sci. For.* 46, pp : 1-14.

Guibal F., 1984 – Contribution dendroclimatologique à la connaissance du cèdre de l'Atlas dans les reboisements du Sud-Est de la France. Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle. Univ. Aix Marseille III, Fac. St Jérôme, 123 pages.

Guillemot J., 2011 – Influence de la sylviculture sur la relation entre le climat et la croissance du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*, Manetti). Mém. Master en Sciences et Technologies du Vivant et de l'Environnement. AgroParisTech, 46p.

Guilley E., Nepveu G., 2003 – Interprétation anatomique des composantes d'un modèle mixte de densité du bois chez le Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) : âge du cerne compté depuis la moelle, largeur de cerne, arbre, variabilité interannuelle et duraminisation. *Ann. For. Sci.* 60, pp : 331-346.

Hainry D. & Colombe M., 2009 - Bilan des introductions et perspectives d'utilisation du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) en Bretagne. *Forêt privée française*. 10p.

Halimi A., 1980 : L'Atlas blidéen, climats et étages végétaux, O.P.U., Alger, 523 p.

Hapla F., Oliver-Villanueva J. V., GonzaÁlez-Molina J. M., 2000 - Effect of silvicultural management on wood quality and timber utilisation of *Cedrus atlantica* in the European mediterranean area. *Holz als Roh- und Werkstoff* (58), pp : 1-8.

Harfouche A. et Nedjahi A., 2003 – Prospections écologiques et sylvicoles dans les cédraies du Belezma et de l'Aurès à la recherche de peuplements semenciers et d'arbres plus. *Revue Forestière Française*. LV (2), pp : 113-122.

HCEFLD, 2006 – Haut Commissariat aux Eaux et Forêts et à la Lutte contre la Désertification, Le cèdre de l'Atlas, mémoire du temps. Ed. Mardaga, 253p.

Hazenberg G. and Yang K. C., 1991 – Sapwood/ heartwood width relationships with tree age in balsam fir. *IAWA Journal Bulletin n.s.*, Vol. 12 (1), pp: 95-99.

Heshmatol Vaezin S.M., 2006 - modèles économiques de gestion des peuplements réguliers, irréguliers ou en transition ; illustrations dans le cas du hêtre dans le nord-est de la France. The. Doct. Sci. For. *ENGREF*, 338p.

Hillis, E., 1987 - Heartwood and tree exudates. Springer Series in Wood Science, Springer Verlag, Berlin. 268 pp.

Hocine H., Belarbi R., Perrin R., Chevalier G., 1994 – Possibilités de mycorhization de *Cedrus atlantica* Manetti. *Ann. Rech. For. Maroc*, 27 (spécial), pp: 350-361.

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., Price D., Titus S.J., 2000 - Development of ecoregion-based height-diameter models for white spruce in boreal forests, *For. Ecol. Manage.* 129, pp : 125–141.

Huang S., Titus S.J., 1992 - Comparison of nonlinear heightdiameter functions for major Alberta tree species, *Can. J. For. Res.* 22, pp : 1297–1304.

Hudak D. and Tiryakioglu M., 2009 - On estimating percentiles of the Weibull distribution by the linear regression method. *J Mater Sci* (44), pp:1959–1964.

Jacquemoud S. et Baret F., 1990 - “PROSPECT. A model of leaf optical properties spectra.” *Remote Sensing of Environment.* 34: pp :75-91.

Jeffrey D. D., Lachenbruch B., 2009 – Heartwood/sapwood variation of western redcedar as influenced by cultural treatments and position in tree. *Forest Ecology and Management*, 258, pp : 2026-2032.

Kadi-Bennane S., 2003 – *Cedrus atlantica* en plantations artificielles : variation des épaisseurs des cernes. 7eme congrès forestier mondial, Québec city (Canada), 5p.

Khanfouci M. S., 2005 - Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M) dans le massif du Belezma. Mém. Mag. Univ. Batna, 224p.

Kherchouche., Kalla M., Gutierrez E., Briki A., Hamchi A., 2013 – La sécheresse et le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) dans le massif du Belezma (Algérie). *Sécheresse*, 24 : 129-137.

Knapic S., Pereira H., 2005 – Within-tree variation of heartwood and ring width in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management* 210, pp : 81-89.

Kokutse A. D., 2002 – Analyse de la qualité du bois de teck (*Tectona grandis* L.f) en plantation au Togo : formation du bois de cœur, propriétés mécaniques et durabilité. Th. Doc. Science du bois. Univ. Bordeaux I, 163p.

Kosei, S., Noguchi, K., Terasima, I., 2002. Analyses of tree architecture construction based on the pipe-model theory and branch autonomy. *Annals of Botany*. (Sous presse).

Krouchi F., 2010 – étude de la diversité de l'organisation reproductrice et de la structure génétique de cèdre de l'Atlas (*cedrus atlantica* Manetti) en peuplement naturel (Tala-Guilef, Djurdjura nord-ouest, Algérie). Th. Doc. Eco. For. UMMTO. 127p. + annexes.

- Lafond V., 2010 – évaluation d'un modèle de simulation de dynamique forestière en sapinière – pressière irrégulière de montagne. Rapp. M2, *Cemagref*, Nancy, 38p.
- Lamb H.F., Eicher U., Switsur V.R., 1989 – An 18000-year record of vegetation, lake-level and climatic change from Tigalmamine, Middle Atlas, Morocco, *J. Biogeogr.* 16(6), pp : 5-74.
- 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.
- Le Houérou H. 1995 - Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du nord de l'Afrique : diversité biologique, développement durable et désertisation. *CEHEAM, Options méditerranéennes*, Série B, étude et recherches (10), 396p.
- Lefebvre H., 1900 – *Les forêts de l'Algérie*. Univ of California Library, 434 pages.
- Lei, Y., 2008 – Evaluation of three methods for estimating the Weibull distribution parameters of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*). *Journal of Forest Science*, 54, 2008 (12): 566–571
- 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.
- Lepoutre B., 1963 - Premier essai de synthèse sur le mécanisme de régénération du cèdre de l'Atlas dans Le moyen atlas marocain. *Ann. Rech. For. Maroc*. T 7, Rabat, pp : 57-163.
- Letreuch-Belarouci N. (1991) - Les reboisements en Algérie et leurs perspectives d'avenir. 2 vol., *Office des publications universitaire* (Alger), 641 p.
- Liu C., Beaulieu J., Prégent G. & Zhang S. Y., 2009 - Applications and comparison of six methods for predicting parameters of the Weibull function in unthinned *Picea glauca* plantations. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 24:1, pp : 67-75.
- Liu C., Zhang S.Y., Lei Y., Newton P. F. & Zhang L., 2004 - Evaluation of three methods for predicting diameter distributions of black spruce (*Picea mariana*) plantations in central Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, pp : 2424-2432.
- Long J.N. 1985 - A practical approach to density management. *Forestry Chronicle*. 61 : pp : 23-27.

Longuetaud F., 2005 – Détection et analyse non destructive de caractéristiques internes de billons d'épicéa commun (*Picea abies* (L.) Karst.) par tomographie à rayons X. Thèse Doct. ENGREF, Nancy, 124p.

López Sánchez C.A., Gorgoso J.J., Castedo F., Rojo A., Rodríguez R., Álvarez González J.G., Sánchez Rodríguez F., 2003 - A height-diameter model for *Pinus radiata* D. Don in Galicia (Northwest Spain), *Ann. For. Sci.* 60, pp : 237–245.

Loukkas A., 2001 - Etude de la variabilité stationnelle de la qualité du bois de *Cedrus atlantica* Manetti dans le massif du Djurdjura. Institut National d'Agronomie (INA) El-Harrach (Alger), 95 pages.

M'hirit O., 1982 : Etude écologique et forestière du Rif marocain. Essai sur une approche multidimensionnelle de la phytoécologie et de la productivité du cèdre. *Ann. Rech. Forest. Maroc.* Tome 22. P : 502-511.

M'hirit O., 1994 – croissance et productivité du cèdre : approche multidimensionnelle de l'étude des liaisons stations production. *Ann. Rech, For.* Maroc 27, pp :295-312.

M'hirit O., 1999 – le cèdre de l'Atlas à travers le réseau silva mediterranea «cèdre». Bilan et perspectives. *Rev. For. médit.* t :XX, n° 3, pp :91-100.

Magnussen S., 1986 - Diameter distributions in *Picea abies* described by the Weibull model. *Scandinavian Journal of Forest Research* (1), 1-4, pp: 493-502.

Maltamo M., Puumalainen J., Paivinen R., 1995 - Comparison of beta and Weibull functions for modeling basal area diameter distribution in stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. *Scand. J. Forest. Res.* (10), pp : 284–295.

Marchand, P.J., 1983. Sapwood area as estimator of biomass and projected leaf area for *Abies balsamea* and *Picea rubens*. *Can. J. For. Res.* 14, 85-87.

Mason, E.G., 2000 - A brief review of the impact of stand density on variables affecting radiata pine stand value. [http : //www.fore.canterbury.ac.nz/euan/spacing/density3.htm](http://www.fore.canterbury.ac.nz/euan/spacing/density3.htm)

Maugé J.P. 1975 - Modèle de croissance et de production des peuplements modernes de pin maritime C.R annuel de *l'AFOCEL* : 227-249.

Meddour R., 2010 – Bioclimatologie, phytogéographie et phytosociologie en Algérie : exemple des groupements forestiers et pré-forestiers de la Kabylie Djurdjureene. Th. Doct. Sci. Agr. UMMTO. 397 p. + annexes.

Mediouni K. & Yahi N., 1989 - Etude structurale de la série du cèdre à Ait Ouabane, Djurdjura. *Forêt médit.*, XI, 2, pp : 103-112

- Meredieu C., Perret S., Dreyfus Ph., 2002 - Modelling dominant height growth : effect of stand density. IUFRO Workshop Reality, Models and Parameters Estimation. Institut Supérieur de Gestion de Lisbonne, Sesimbra (Portugal, 2-5 juin 2002).
- Messaoudène M., 1989 – dendroécologie et productivité de *Quercus afares* POMEL et *Quercus canariensis* WILL. dans les massifs forestiers de l'Akfadou et de Beni Ghobri en Algérie. Th. Doct. ès sciences, univ. Aix – Marseille III, 123p.
- Messaoudène M., Derridj A., 1996 – Paléoécologie : découverte d'un arbre de 25000 ans dans la forêt de Yakouren. *La forêt algérienne* (N°2 déc.), INRF, Alger, 4p.
- Messaoudène M., Loukkas A., Janin G., Tafere M., Dilem A., Gonzalez J., 2004 - Propriétés physiques du bois d'éclaircie des cèdres (*Cedrus atlantica*), contenant du bois de compression, provenant de l'Atlas du Djurdjura (Algérie). *Ann. For. Sci.* 61, pp : 589–595.
- Messaoudène M., Rabhi K., Megdoud A., Sarmoum M. et Dahmani-Megrerouche M., 2013 - Etat des lieux et perspectives des cédraies algériennes. III<sup>e</sup> Semaine forestière méditerranéenne, Tlemcen. *rev. For. Médit. t. XXXIV, n° 4*, pp : 1-8.
- Mestar N., 1995. Cartographie physiologique et approche phytoécologique de la cédraie de Tala Guilef (Djurdjura occidental). *Thèse de Magister, INA, Alger, 116 p.*
- Mille R., 1986 – Contribution à l'étude de la variabilité génétique du cèdre. Mém. ETITEF. INRA, laboratoire d'amélioration des arbres forestiers, 122p.
- Minckler, L.S., Gingrich, S.F. Relation of Crown Width to Tree Diameter in Some Upland Hardwood Stands of Southern Illinois. Research Note NC-99.1970, St. Paul, MN : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station.
- Morataya R., Galloway G., Berninger F., Kanninen M., 1999 – Foliage biomass - sapwood (area and volume) relationships of *Tectona grandis* L.F. and *Gmelina arborea* Roxb.: silvicultural implications. *Forest Ecology and Management* 113, pp : 231-239.
- Mörling, T. & Valinger, E. 1999. Effects of thinning on heartwood area, sapwood area, and growth in Scots pine. *Scandinavian Journal of Forest Research.* (14), pp. 462-469, 1999.
- Mouas S., 1989 – contribution à l'étude de la végétation et des sols de la forêt relique des Ait-ouabane (Djurdjura). Mém. Ing. Agr. UMMTO. 120p.
- Mouna M., 1994 - Etat des connaissances sur l'entomofaune du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) au Maroc. *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp : 513-526.

Nedjahi A., 1987 : La croissance et la productivité du cèdre de l'Atlas à Chréa. *Ann. Rech. For. en Algérie*, vol. II, n °2, pp : 23-59.

Nedjahi A., 1993 - La régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) en Algérie : cas de Chréa et des Aurès. INRF. *Ann. Rech. For. Algérie*. Alger, pp : 31-40.

Nezzar-Hocine H., Perrin R., Halli-Hargas R., Chevalier G., 1998 – Ectomycorrhizal associations with *Cedrus atlantica* (Endl) Manetti ex Carrière. I. Mycorrhizal synthesis with *Tricholoma tridentinum* Singer var. *cedretorum* Bon. *Mycorrhiza* 8 (Short note), pp : 47-51.

Niederlender L., Badeau V., 2010 – Arboretum et dendroécologie. Dépérissement du cèdre. *Collection Edytem*, n° 11 : 47-54.

O'hara, K.L. et Valappil N.I., 1995 - Sapwood-leaf area prediction equations for multi-aged ponderosa pine stands in western Montana and central Oregon. *Can. J. For. Res.* (25): 1553-1557.

Ottorini J. M., 1978 – Aspects de la notion de densité et croissance des arbres en peuplement. *Ann. Sci. Forest*, 35 (4), pp. 299-320.

Panini T. & Amandier L., 2005. Climats pluviométriques et thermiques en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Analyse des données météorologiques 1961-1996 et cartographie par SIG. *Forêt médit.*, XXVI,4,pp.299-308.

Pardé J., Bouchon J., 1988 – dendrométrie. Ed. *Ecole Nationale des Eaux et des Forêts* (ENGREF), Nancy, 328p.

Pauwels D., Lejeune P., Pâques L. E., Rondeux J., 2003 – Développement de modèles prédictifs des proportions de duramen et d'écorce des espèces de mélèze cultivées en zones de basse altitude en Europe de l'Ouest (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr., *Larix decidua* Miller et *Larix eurolepis* Henry). *Ann. For. Sci.* 60, pp : 227-235.

Pavé A. & Schmidt-Lainé C., 2004 - Integrative Biology: Modelling and Simulation of the Complexity of Natural Systems. *Biology International* N° 44 (June, 2004), pp : 13-24.

Peillon P., 1978. Problèmes d'habitat en Basse Kabylie. In : CNRS éd., « Recherches sur l'Algérie ». Mémoires et Documents, N.S., 17, 165-291.

Piboule A. 2005 - Influence de la structure du peuplement forestier sur la distribution de l'éclairement sous couvert. Cas d'une forêt hétérogène feuillue sur plateau calcaire. Thèse de doctorat, ENGREF. 147 p.

Piboule, A., 2001. Validation et analyse de sensibilité d'un modèle de transfert radiatif en vue de son application à la cartographie de l'éclairement en peuplement forestier. Rapport de

D.E.A. (Biologie forestière), Institut National de la Recherche Agronomique, ENGREF, Nancy, 24 p.

Pinto I., Pereira H., Usenius A., 2004 – Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait) stems. *Trees*, vol. 18, pp : 284-294.

Polge H., 1964 – Délimitation de l'aubier et du bois de cœur par analyse densitométrique de clichés radiographiques. *Ann. for. Sci.*, 21 (4) 605-623.

Polge H., 1982 – Influence de la compétition et de la disponibilité en eau sur l'importance de l'aubier du douglas. *Ann. For. Sci.* 39 (4), pp : 379-398.

Polge H., 1985 – Influence de l'élagage sur la duraminisation, la production de bois de tension et quelques autres propriétés du bois de peuplier I 214. *Ann. For. Sci.* 42(3), pp : 283-296.

Ponge J.-F., André J., N. Bernier N. et Gallet C., 1994 - La régénération naturelle: connaissances actuelles. Le cas de l'épicéa en forêt de Macot (savoie). *Revue Forestière Française* 46, 1, pp : 25-45.

Pons A., 1998 – l'histoire du genre *Cedrus* d'après les données paléobotaniques disponibles. *Forêt Méditerranéenne*, t. XIX, n° 3, pp : 236-242.

Priestley J.H., 1932 - The growing tree. *Forestry*, 6: pp : 105–112.

Quézel P., 1998 - Cèdres et cédraies du pourtour méditerranéen : signification bioclimatique et phyto géo graphique. *For. Médit.* t. XIX, n° 3, novembre

Quézel P., Médail F., 2003 – Ecologie et biogéographie des forêts du bassin méditerranéen. Ed. *Elsevier SAS*. 571p.

Rabhi K., Messaoudène M., 2013 – Ajustement de modèle hyperbolique hauteur – circonférence pour le chêne zéen (*Quercus canariensis* Willd) de l'Akfadou (Algérie). *Ann. Rech. For. en Algérie*, pp : 83-92.

Reille M., 1976 – Analyse pollinique de sédiments postglaciaires dans le Moyen Atlas et le Haut Atlas marocains : premiers résultats, *Ecologia Mediterranea*, (2), pp : 153-170.

Rennolls K., 1997 – data requirements for forest modelling. Ed. *Salsamondra*, Portugal, pp: 11-22.

Reynolds M.R., Burk T.E., Huang W.C., 1988 – Goodness-of-fit tests and model selection procedures for diameter distribution model. *Forest Science*, 34: 373-399.

Rhanem M., 2011 – Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*) aux confins de la plaine de Midelt (Maroc). *Physio-géo*, vol. 5, pp : 143-165.

Rhoujjati A., Cheddadi R., Taïeb M., Baali A., Ortu E., 2010 – Environmental changes over the past c. 29,000 years in the Middle Atlas (Morocco): a record from Lake Ifrah. *J. Arid Environ.* 74, pp : 737–745.

Richardson J-J., Monika Moskal L. and Kim S-H., 2009 - Modeling approaches to estimate effective leaf area index from aerial discrete-return LIDAR. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, pp : 1152–1160.

Riedacker A., 1978 – Régénération et croissance de la partie souterraine et aérienne de cèdres placés sous climat constant. *Ann. Sci. For.*, 35 (2), pp : 117-138.

Riffaud J.L., 1998 – Le cèdre de l'Atlas dans le Ventoux : l'aménagement de la série des cèdres en forêt communale de Bedoin. *Revue Forestière Française*, L (1), pp : 65-70.

Rinne H., 2009 – Weibull distribution, a handbook. Ed. *CRC press*, Justus-Liebig-university (Germany), 782p.

Ripert C. et Boisseau B., 1994 - Ecologie et croissance du cèdre de l'Atlas en Provence. *Ann. Rech, For. Maroc* 27, pp : 155-172.

Rondeux J., 1993 – la mesure des arbres et des peuplements forestiers. Ed. Presses Agronomiques de Gembloux, Belgique, 521p.

Ruchaud F., Nicolaïdes O., Jouvie R., 2000 - Modélisation de l'éclairement au sol dans des peuplements de résineux : proposition de sylvicultures développant la richesse spécifique du sous-bois ou la production herbacée, Rapport interne, CEMAGREF, Clermont-Ferrand, France. 41p.

Rudman P., 1966 - Heartwood formation in trees. *Nature*, 210: pp : 608–610.

Salamani M., 1991 – Premières données sur l'histoire Holocène du massif de l'Akfadou (Grande-Kabylie, Algérie). *Ecologia mediterranea*, XVII : pp 145-159

Sarmoum M., 2008 - Impact du climat sur le dépérissement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica Manetti*). Diagnostic dendroécologique et climatique de la cédraie de Theniet El Had. Mémoire de Magister, USTHB (Alger), 98 p.

Sbadjji M., Kadik B., 2011 - Effects of Atlas cedar (*Cedrus atlantica*) defoliation on performance of the pine processionary moth (*Thaumetopoea pityocampa*). *J Pest Sci*, (84), pp: 213–217.

Schinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K., Kira, T., 1964. A quantitative analysis of plant form. The pipe model theory. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japanese Journal of Ecology*. 4, 133-139.

Sellin, A. 1993 - Sapwood-heartwood proportion related to tree diameter, age, and growth rate in *Picea abies*. *Canadian Journal of Forest Research* (24), pp. 1022–1028.

Seltzer P., 1946. Le climat de l'Algérie. Trav. Inst. Météorol. Phys. Globe, Alger, 1 vol. 219 p. + carte.

Sémah A-M. et Renault-Miskovsky J., 2004 – L'évolution de la végétation depuis deux millions d'années. Ed. *Artcom/errance*, Paris. 314p.

Serre F., 1973 – Contribution à l'étude dendroclimatologique du pin d'alep (*Pinus halepensis*). Th. Doct. ès sciences, univ. Aix – Marseille III, 144p.

Sghaier T. et Ammari Y., 2012 – Croissance et production du pin d'Alep (*Pinus halapensis* Mill) en Tunisie. *Ecologia mediterranea*, vol 38 (1), pp : 39-57.

Sghaier T. et Palm R., 2002 - Répartition des arbres et des volumes par classes de grosseur dans les peuplements de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en Tunisie. *Ann. For. Sci.* (59), pp : 293–300.

Slimani, 2014 – Reconstitutions dendrochronologiques du climat et de l'histoire des incendies dans les régions des Aurès et de Kabylie, nord d'Algérie. Th. Doct. Sci. Agr. Univ. Mouloud Mammeri, Tizi ousou, 156p.

Smith, H., 1982. Light quality, photoperception, and plant strategy. *Annual Review of Plant Physiology* 33, p. 481-518.

Sonohat G., Balandier P. et Ruchaud, F., 2004 - Predicting solar radiation transmittance in the understory of even-aged coniferous stands in temperate forests. *Annals of Forest Science* 61, pp : 629-641.

Sonohat G., Balandier P., Sinoquet H., Varlet-Grancher C., Jovie R., De Berranger C., Dumas Y. et Gosselin F., 2003 - Mesure de l'éclairement au sol dans les peuplements forestiers réguliers et relations avec leurs caractéristiques dendrométriques. Projet CEMAGREF-INRA, rapport final, 88p.

Soudani K., 2002 - Leaf area index and canopy stratification in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stands. *int. j. remote sensing*, vol. 23 (18), pp : 3605–3618

Stage A.R. 1968 - A tree-by-tree measure of site utilization for grand fir related to stand density index. Resour. Note INT-77. Ogden, UT : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain forest and range experiment station.

Stewart PH., Roustide R., 1974 – cours de sylviculture. Institut National Agronomique, El Harrach, Alger, 101p.

Stewart P., 1969. Quotient pluviothermique et dégradation biosphérique : quelques réflexions. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, 59 (1-4), 23-36.

Tafer M., Abderrahmani S., Guibal F., Messaoudène M. - Le dépérissement du cèdre de l'Atlas dans le Belezma (Algérie). Impact des changements climatiques. Accepté à *Terre et vie*. Non publié.

Telewski, F.W., 1990 - Growth, wood density, and ethylene production in response to mechanical perturbation in *Pinus taeda*. *Canadian Journal of Forestry Research*. 20, 1277-1282.

Temesgen H., Gadow K.V., 2004 - Generalized height-diameter models— an application for major tree species in complex stands of interior British Columbia, *Eur. J. For. Res.* 123, pp : 45–51.

Till C., 1986 – influence des facteurs écologiques sur l'épaisseur des cernes du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* au Maroc. *Ecologia Mediterranea*, tome XII (Fascicule 3-4), pp : 33-48.

Toth J., 1970 - Plus que centenaire et plein d'avenir, le cèdre en France. *Revue forestière française*, n° 3, pp : 353-364.

Toth J., 1973 — Première approche de la production potentielle du cèdre de l'Atlas dans le Sud de la France. *Revue forestière française*, vol. XXV, n° 5, pp : 381-389.

Toth J., 1978 – Contribution à l'étude de la fructification et de la régénération naturelle du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manettj) dans le sud de la France. Thèse de Doct. ing. Marseille Saint-Jérôme, 136 p.

Touchan R., Anchukaitis K.J., Meko D.M., Sabir M., Attalah S. et Aloui A., 2010 – spatiotemporal drought variability in northwestern Africa over the last nine centuries. *Clim. Dyn.* DOI 10.1007/s00382-010-0804-4 (Springer link).

Vila B., Nicault, A., et Vennetier, M. 2001. Influence de la densité des peuplements sur la croissance en hauteur et radiale de *Pinus sylvestris* L. en région méditerranéenne française. *Forêt méditerranéenne*, Journées pin sylvestre, Tome XXII, numéro 1, 7p.

Vlashev V., 1987 – croissance en groupes du cèdre dans la montagne des Babors. *Ann. Sci. agr. INA* (Alger), pp : 1-14.

Walter J. M. N., 2000 - Photographies Hémisphériques des voûtes forestières, Etude du rayonnement solaire sous le couvert à l'aide du logiciel GLA(c) Version 2.0. Note technique, Université Louis Pasteur Strasbourg I Centre d'Etudes et de Recherches Eco- Géographiques (C.N.R.S.), les Nouragues (Guyane Française), 28 p.

Waring, R.H., Schroeder, P.E., Oren, R., 1982. Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Can. J. For. Res.* 12, 556–560.

Yahi N., 2007. Les cédraies d'Algérie : phytoécologie, phytosociologie, dynamique et conservation des peuplements. Thèse Doctorat ès sciences, *USTHB, Alger, 2007, 265 p.*

Zedek M., 1993 - Contribution a l'étude de la productivité du *cedrus atlantica* Manetti (cèdre de l'Atlas) dans le Parc National de Theniet El Had. *Mém. Mag. Sci. Agr. ENSA*, 175p + annexes.

Zhang L., Packard K. C. & Liu C., 2003 - A comparison of estimation methods for fitting Weibull and Johnson's SB distributions to mixed spruce fir stands in northeastern North America. *Canadian Journal of Forest Research*, 33, pp : 1340-1347.

Zhou B., and McTague J.P., 1996 - Comparison and evaluation of five methods of estimation of the Johnson system parameters. *Can. J. For. Res.* 26, pp: 928–935.

Ziegler, H., 1968 - Storage, mobilisation and distribution of reserve material in trees. *The formation of wood in forest trees*. Academic Press. London, New York. 303-320.

# Annexes

## ANNEXE 1 : Présentation graphique des tests de validation des modèles

### ➤ Modèles issus de la forme hyperbolique de Dhôte et de Hercé

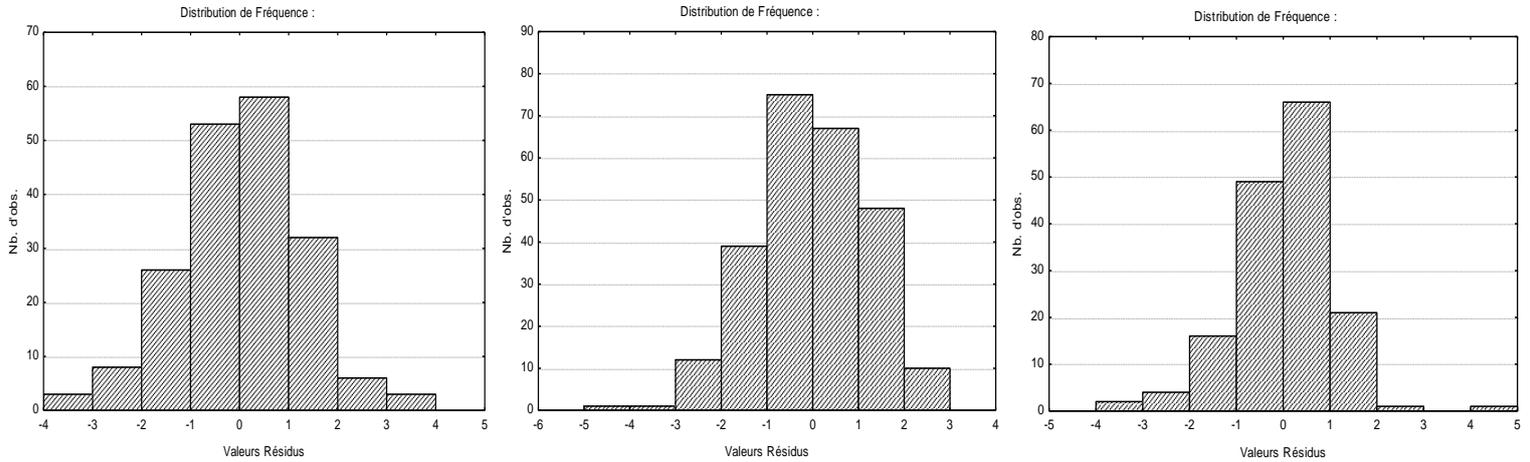


Fig.1: Distribution des résidus des modèles : Fer.F, Fer.M et Fer.B.

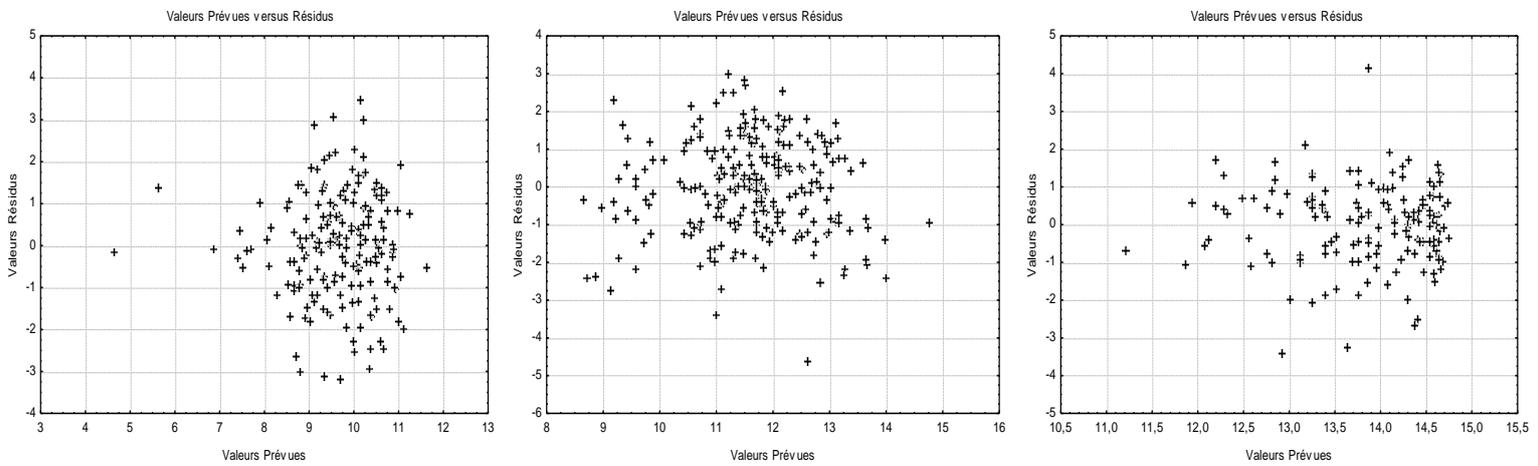


Fig.2 : Nuage des résidus en fonction des valeurs prévues des modèles : Fer.F, Fer.M et Fer.B.

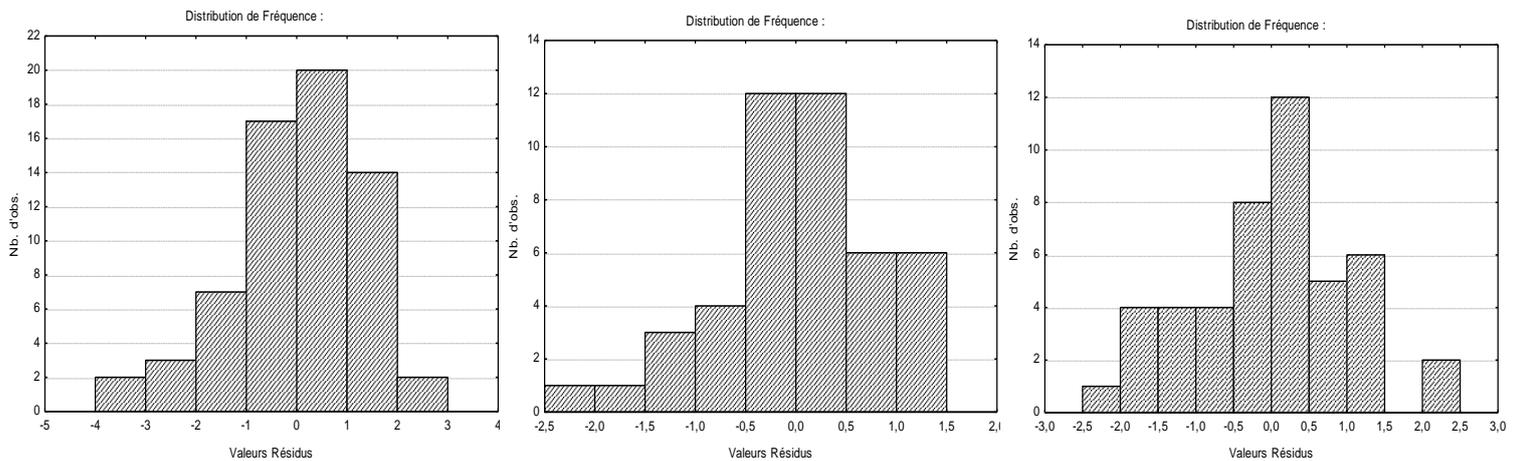


Fig.3 : Distribution des résidus des modèles : Den.F, Den.M et Der.E.

# Annexes

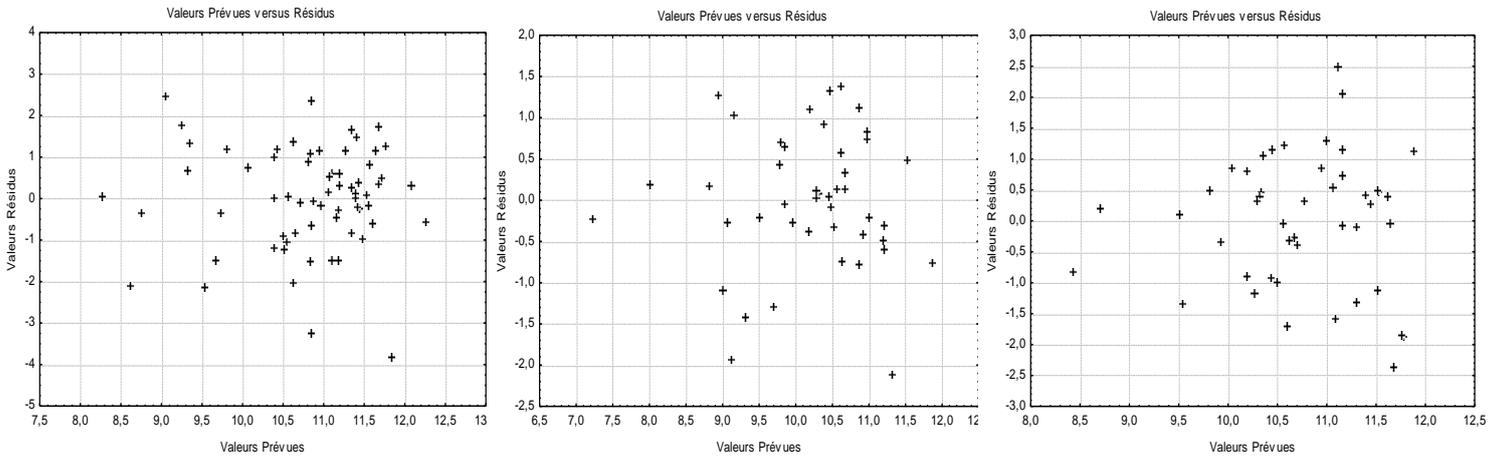


Fig.4 : Nuage des résidus en fonction des valeurs prévues des modèles : Den.F, Den.M et Den.E.

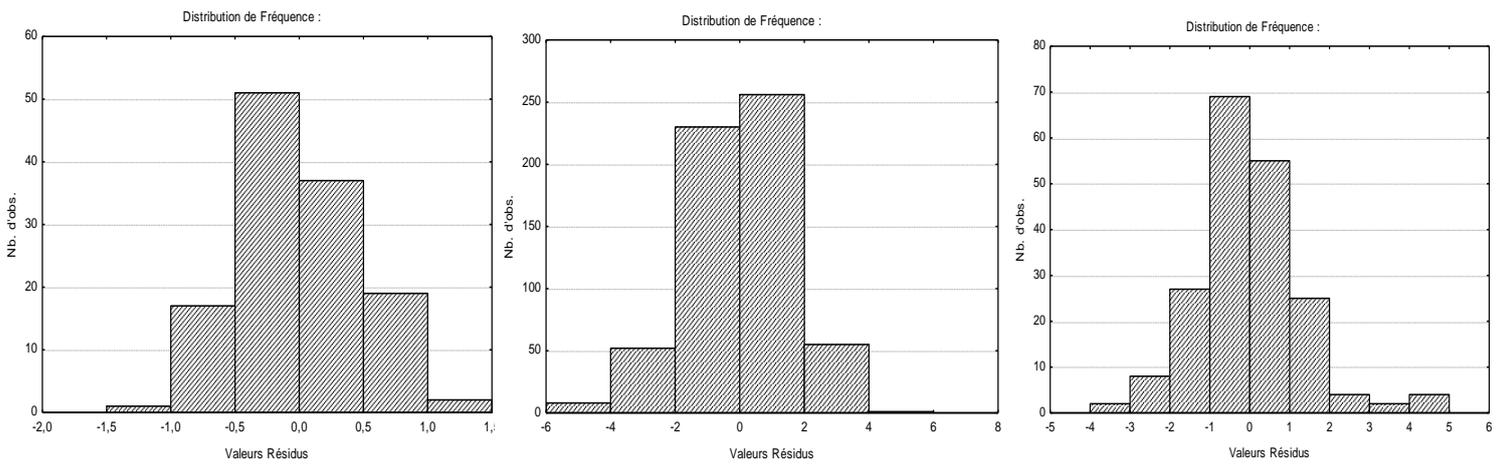


Fig.5 : Distribution des résidus des modèles : Chell, Tir et Tik.

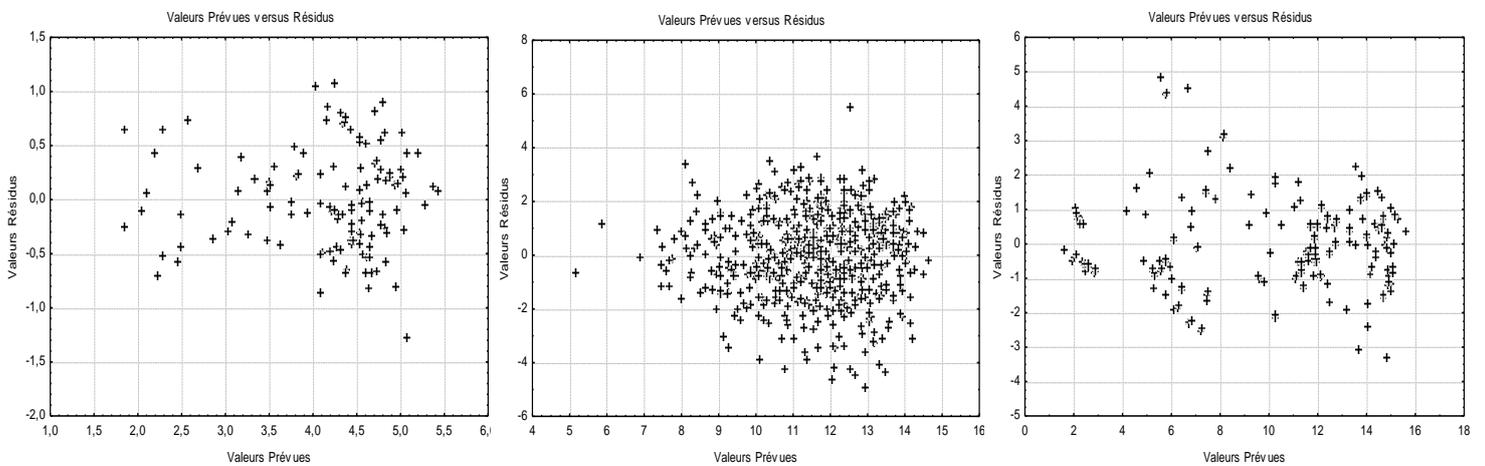


Fig.6 : Nuage des résidus en fonction des valeurs prévues des modèles : Chell, Tir et Tik.

# Annexes

## ➤ Modèles issus de la forme hyperbolique de Schnute

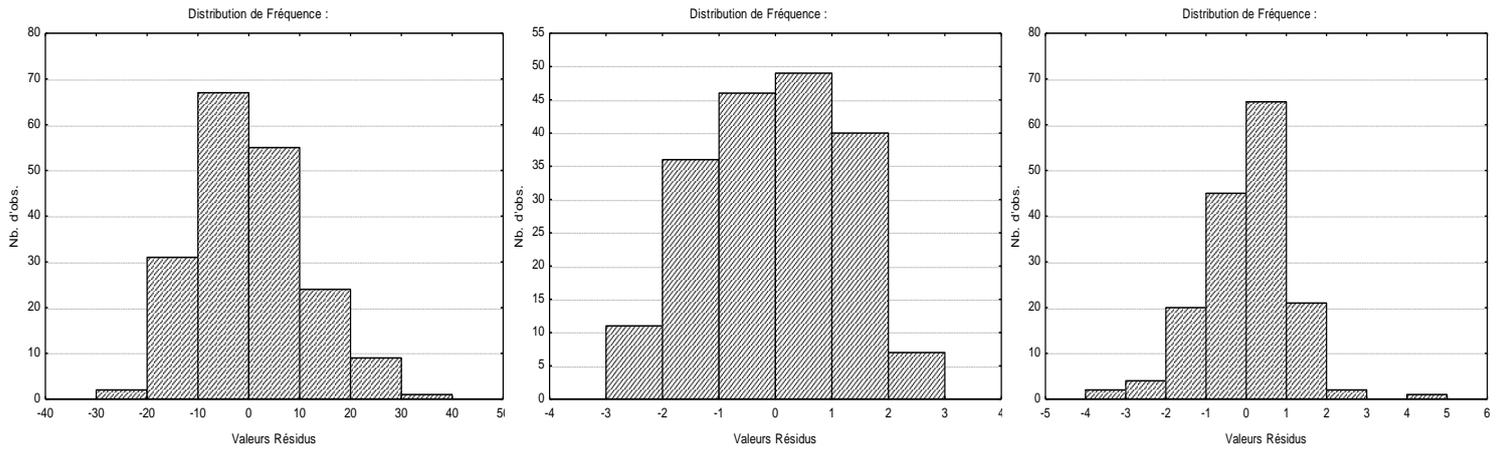


Fig.7 : Distribution des résidus des modèles : Den.F, Den.M et Den.E.

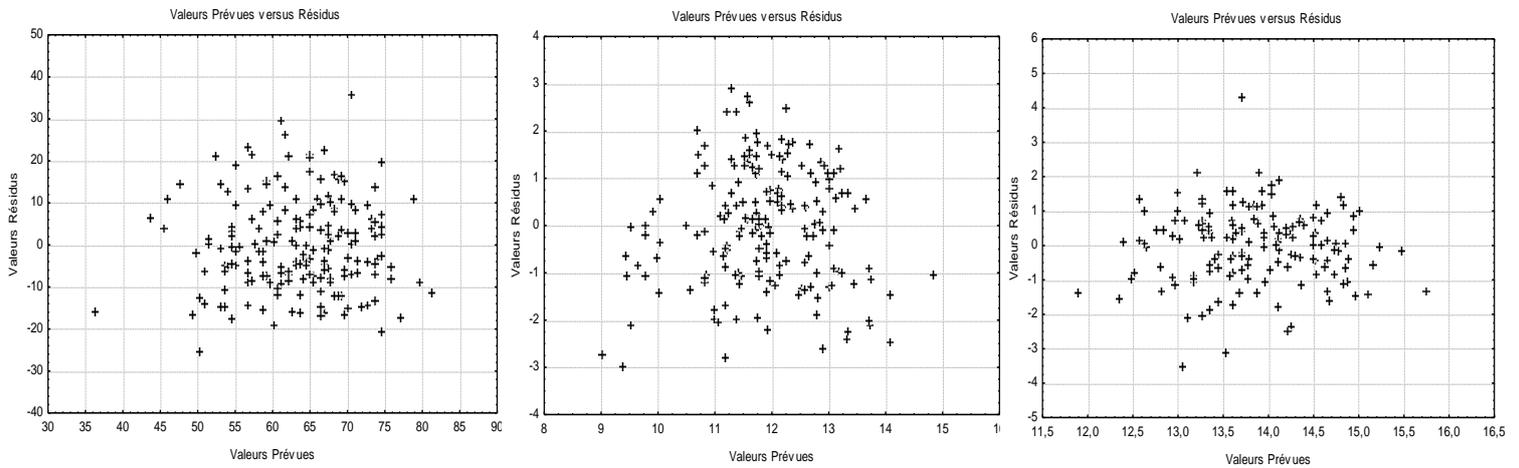


Fig.8 : Nuage des résidus en fonction des valeurs prévues des modèles : Den.F, Den.M et Den.E.

# Annexes

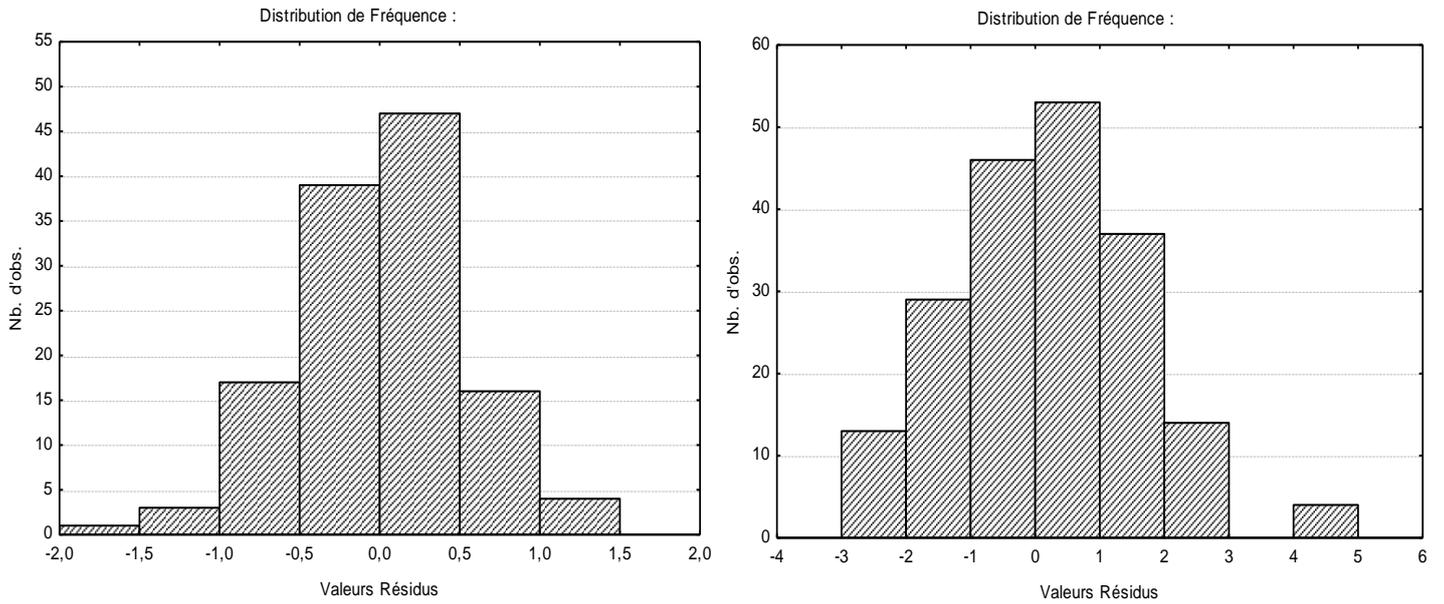


Fig.9 : Distribution des résidus des modèles : Chell et Tik.

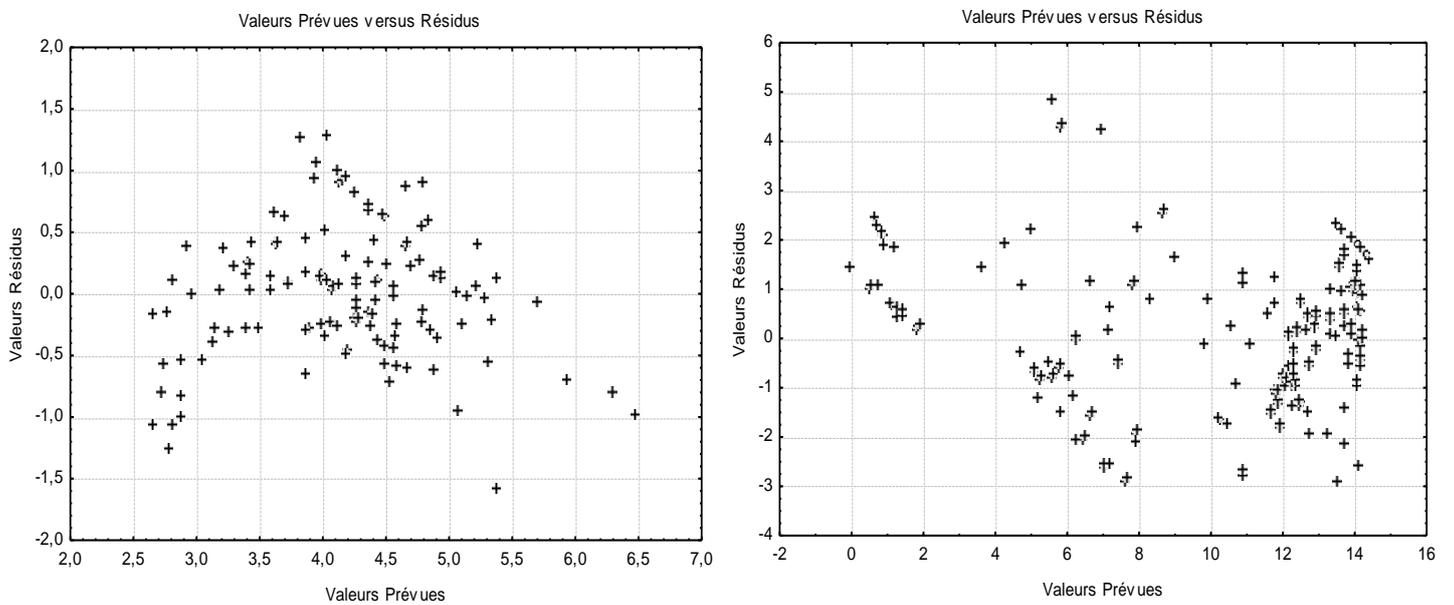


Fig.10 : Nuage des résidus en fonction des valeurs prévues des modèles : Chell et Tik.

# Annexes

## ➤ Modèles issus de la forme logarithmique de Fortin et al.

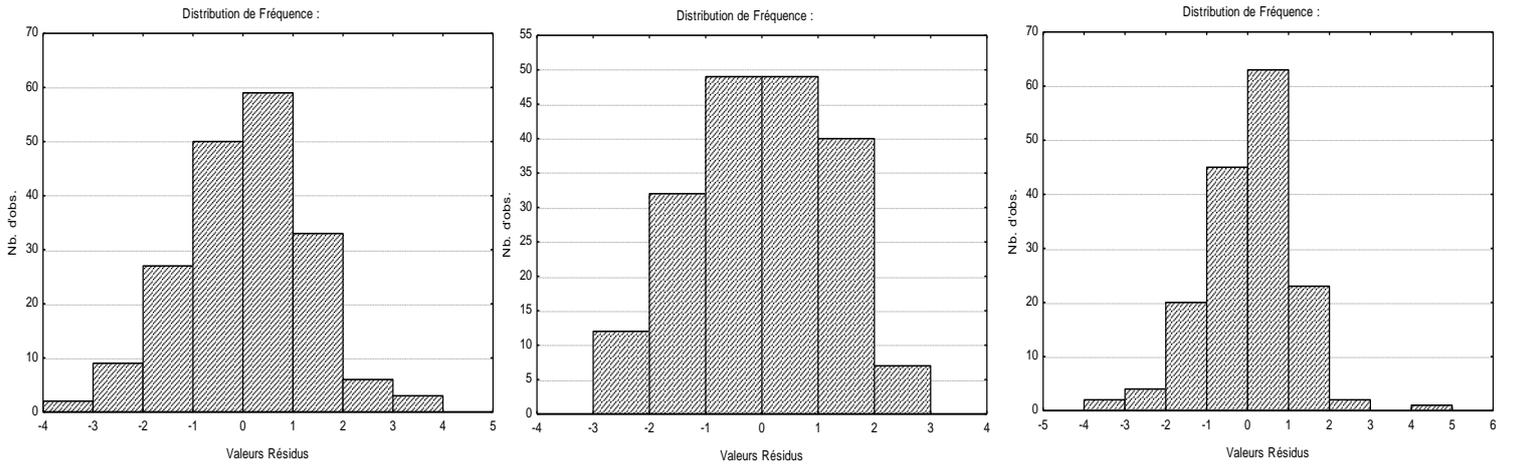


Fig.11 : Distribution des résidus des modèles : Fer.F, Fer.M et Fer.B.

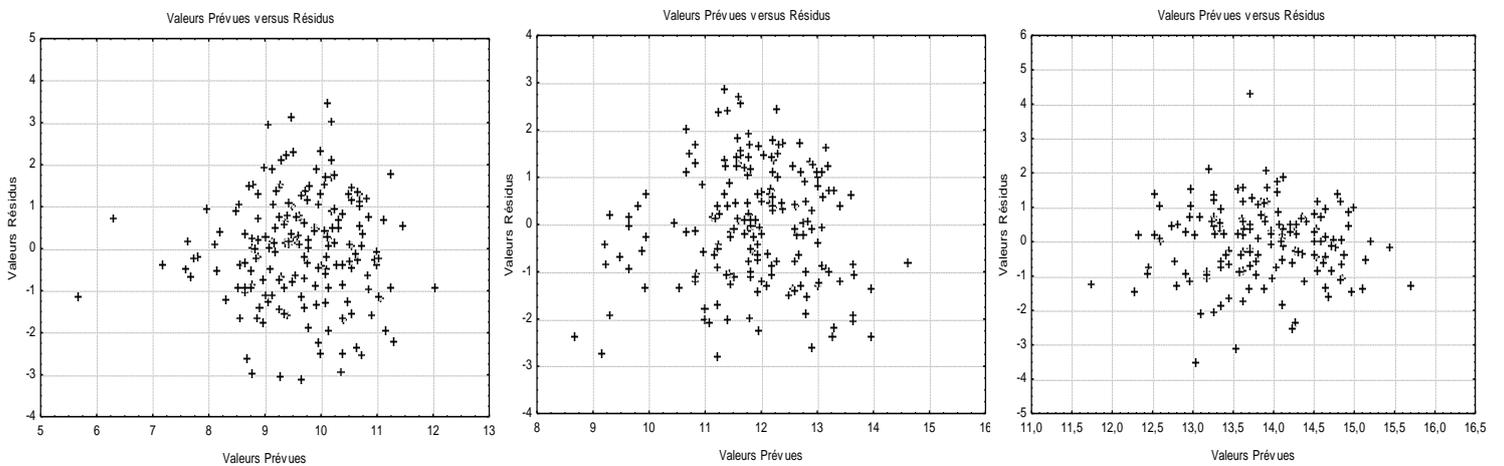


Fig.12 : Nuage des résidus en fonction des valeurs prévues des modèles : Fer.F, Fer.M et Fer.B.

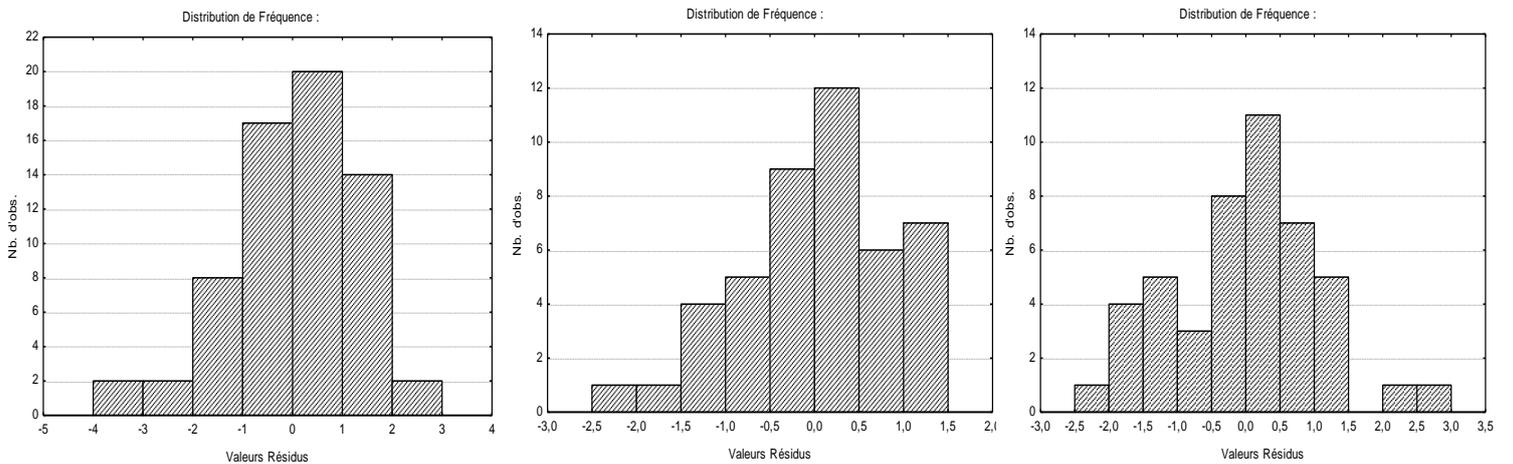


Fig.13 : Distribution des résidus des modèles : Den.F, Den.M et Der.E.

# Annexes

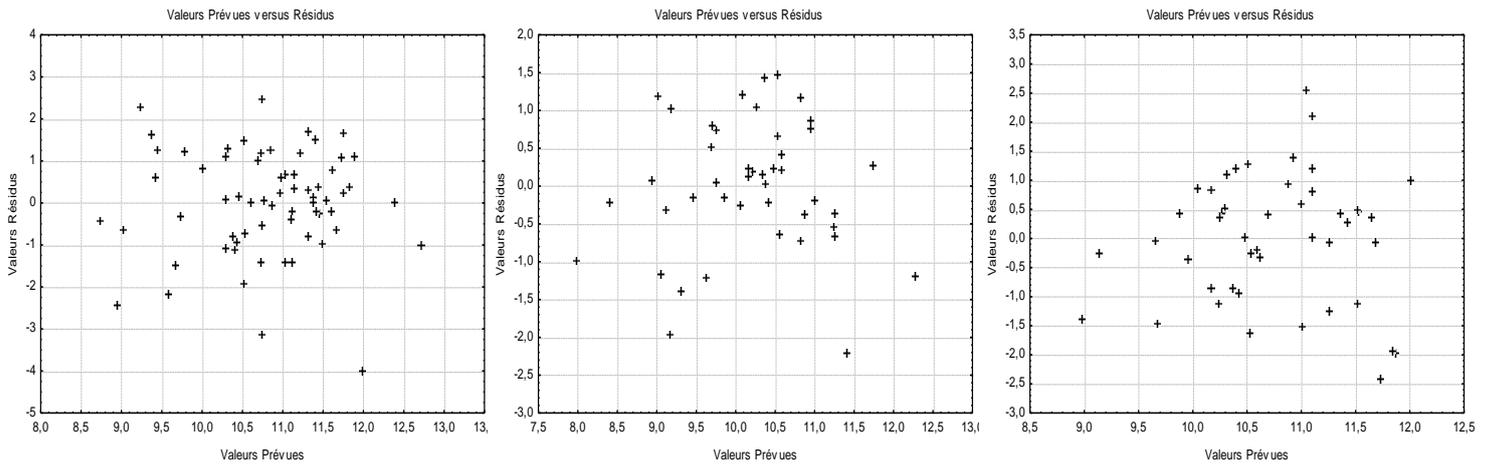


Fig.14 : Nuage des résidus en fonction des valeurs prévues des modèles : Den.F, Den.M et Den.E.

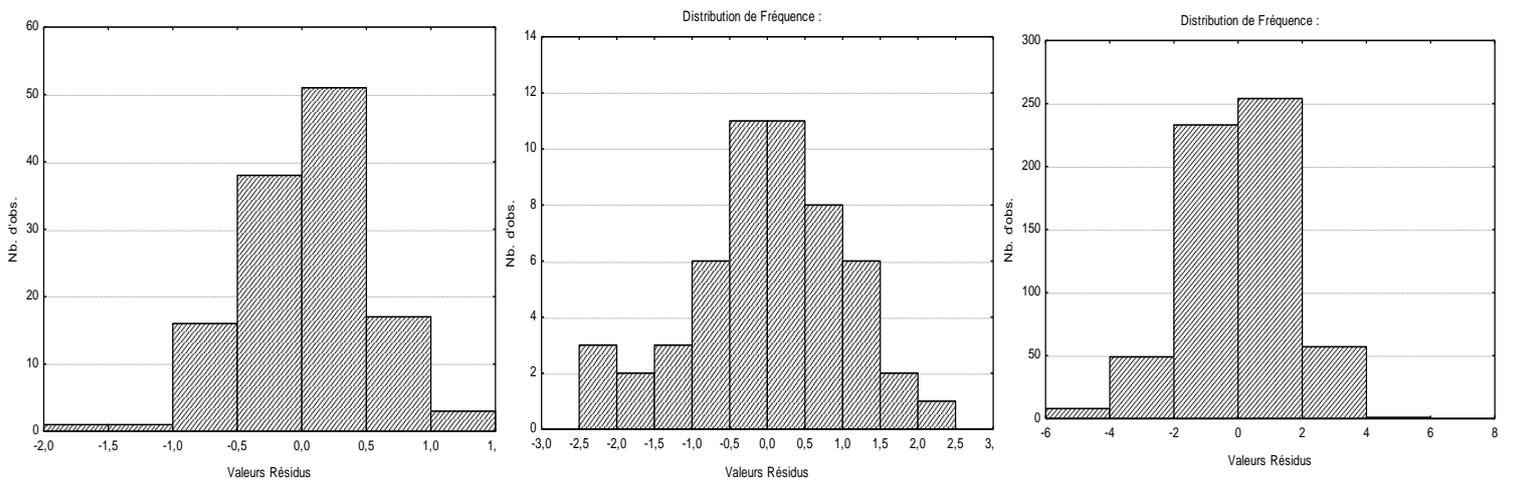


Fig.15 : Distribution des résidus des modèles : Chell, TO et Tir.

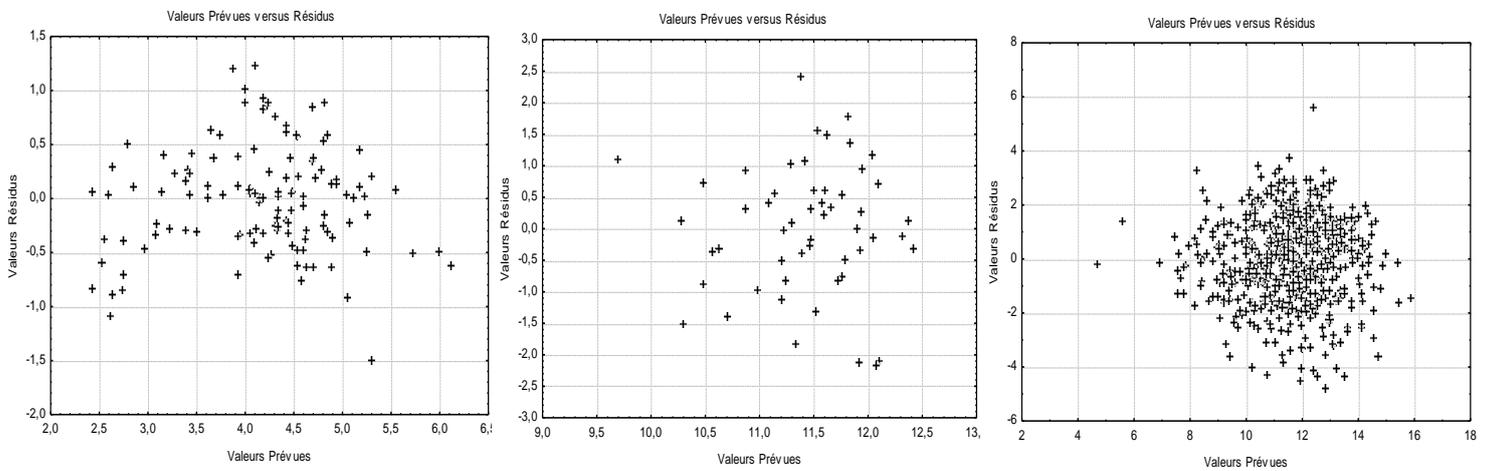


Fig.16 : Nuage des résidus en fonction des valeurs prévues des modèles : Chell, TO et Tir.

# Annexes

---

## **ANNEXE 2 : Photos des zones et des échantillons étudiés**

Photo **A** : Vue générale du reboisement du col de Tirourda.

Photo **B** : Plantation bien venante sur terrasses (col de Tirourda).

Photo **C** : Plantation en difficulté de croissance sur sol argileux à hydromorphie temporaire.

Photo **D** : Vue générale du reboisement de Tizi Oujaâboub.

Photo **E** : Partie du reboisement de Tizi Oujaâboub détruite par un incendie.

Photo **F** : Partie non incendiée du reboisement de Tizi Oujaâboub.

Photo **G** : Reboisement de 1935 (Chrèa).

Photo **H** : Reboisement de 1958 (Chrèa).

Photo **I** : Reboisement de 1970 (Chrèa).

Photo **J** : Reboisement de 1998 à coté de cépées de chêne vert (Chrèa).

Photo **K** : Forme d'un arbre de cèdre de l'Atlas.

Photo **L** : Vue générale de la cédraie de Tikjda centre.

Photo **M** : Futaie adulte de cèdre à Tikjda.

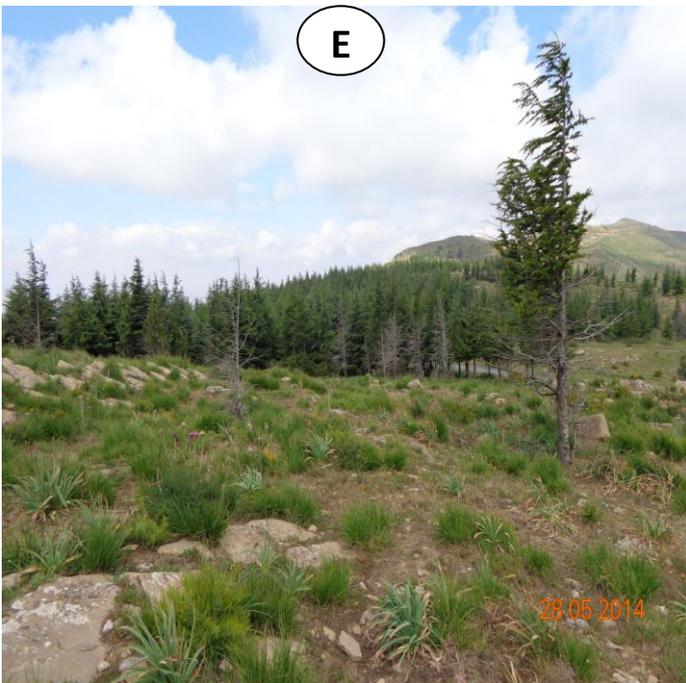
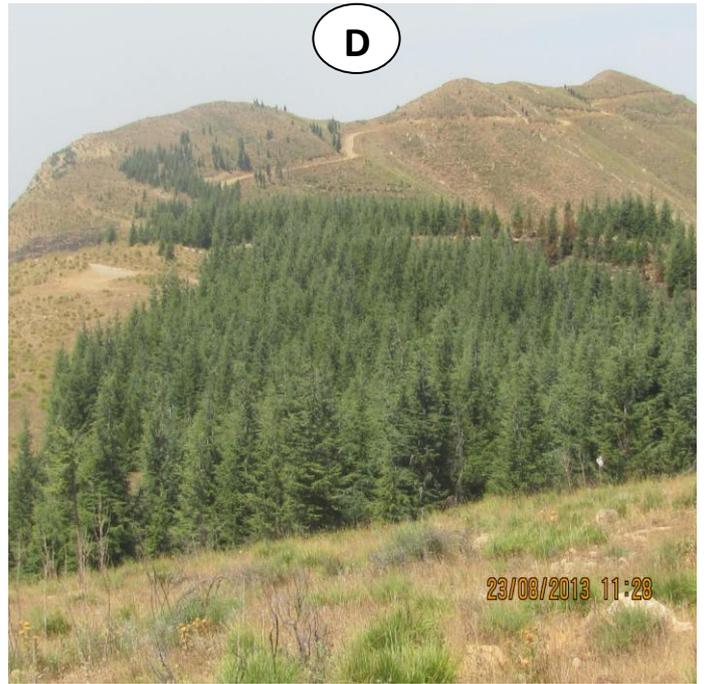
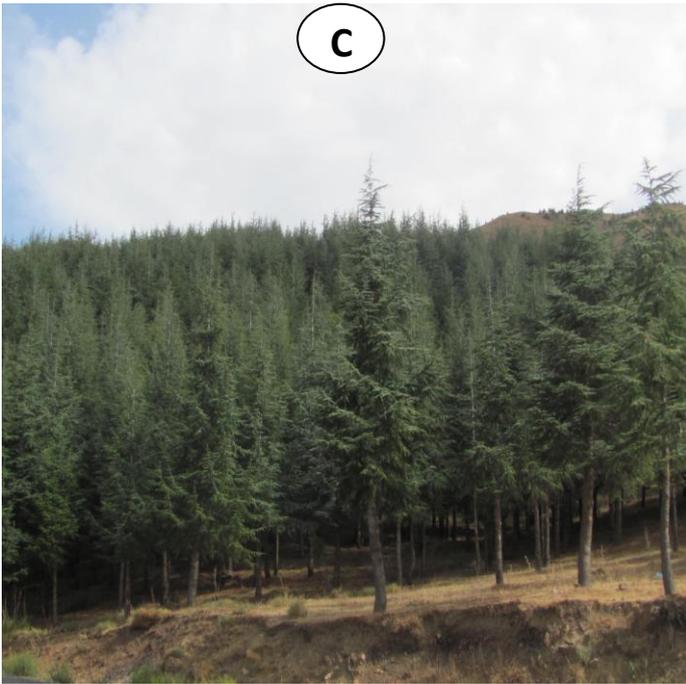
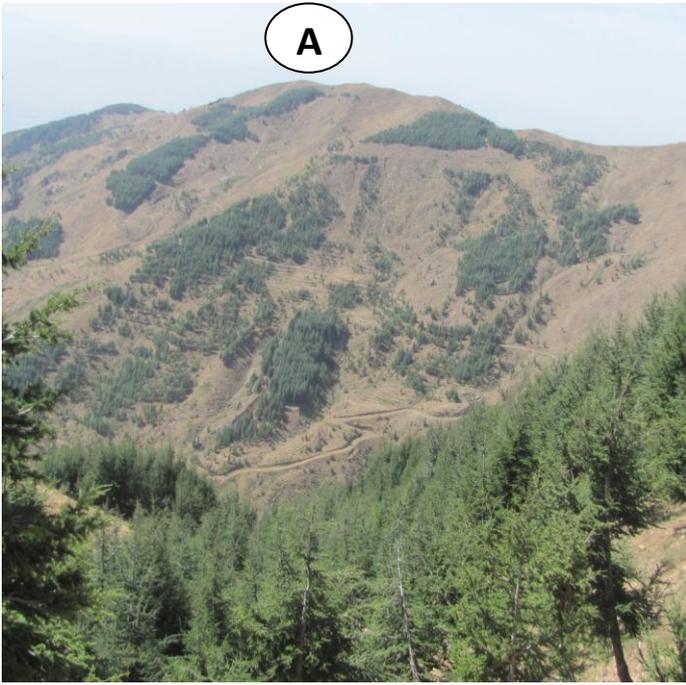
Photo **N** : Fourré de cèdre à Tikjda.

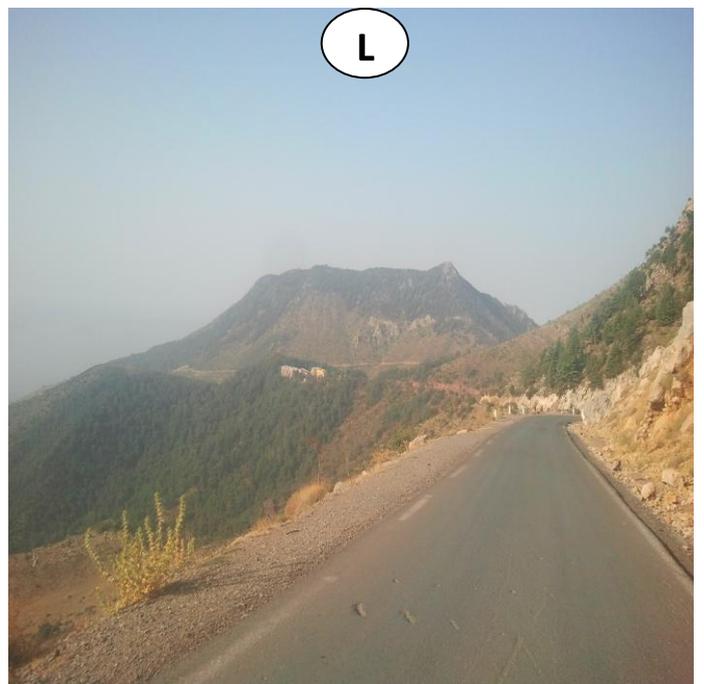
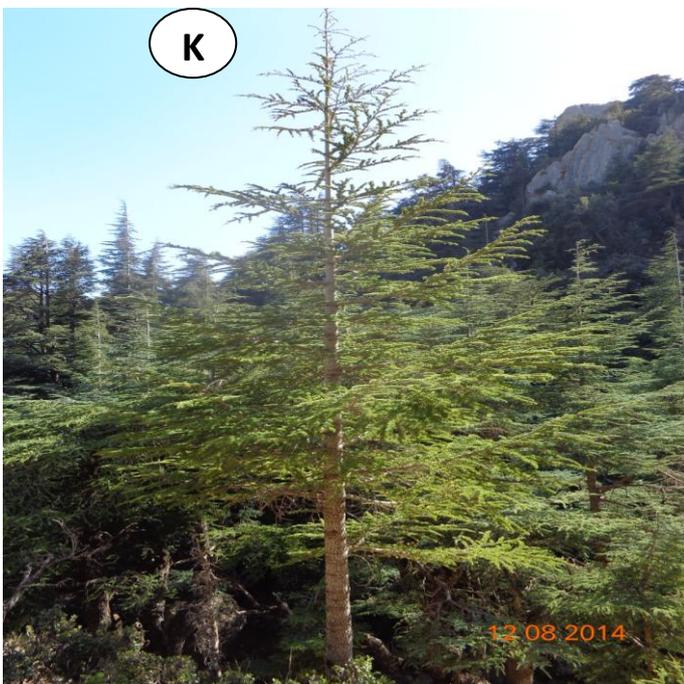
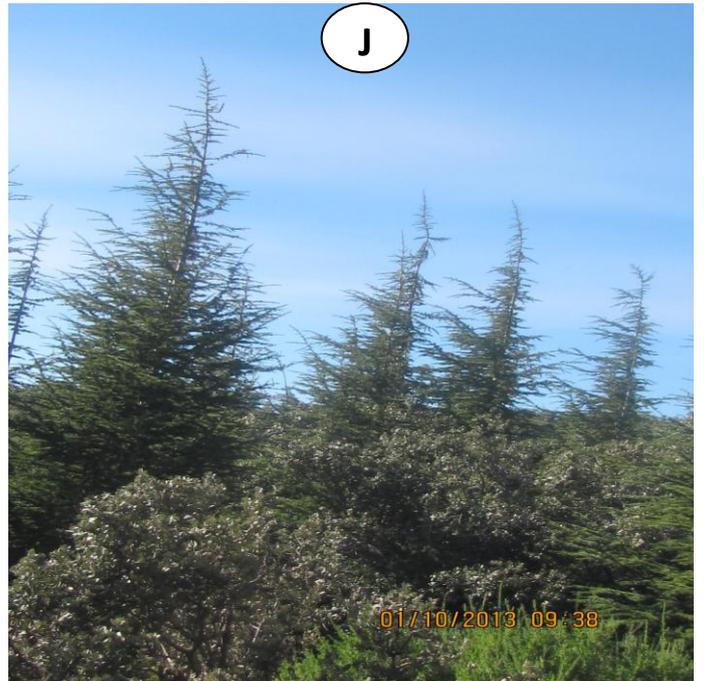
Photo **O** : Effet des trouées et modification de la lumière incidente.

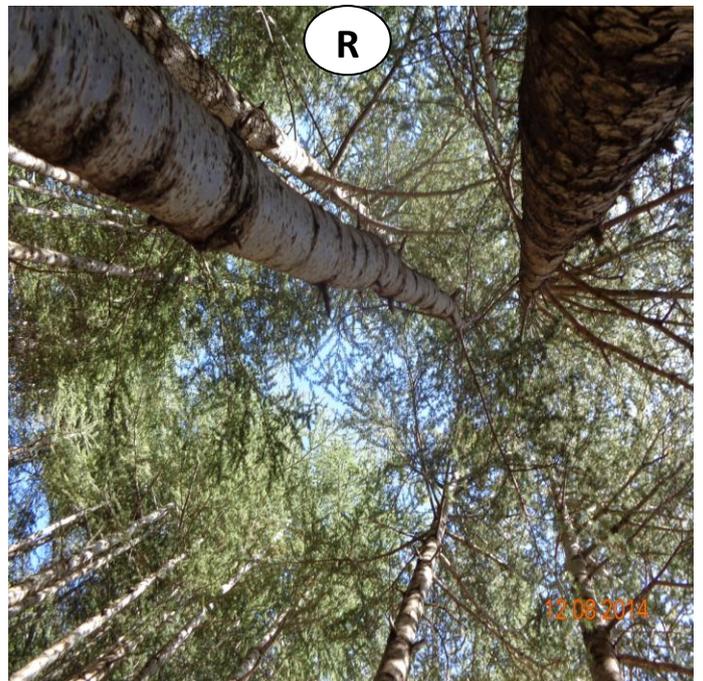
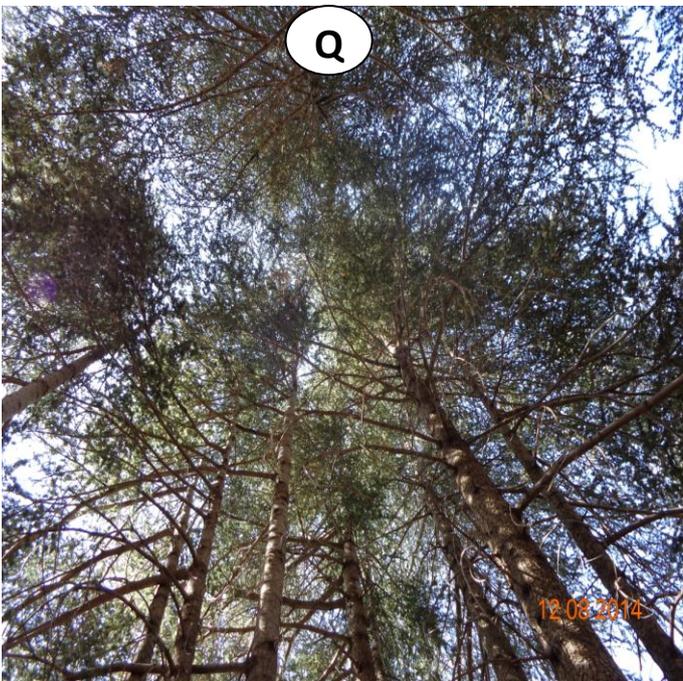
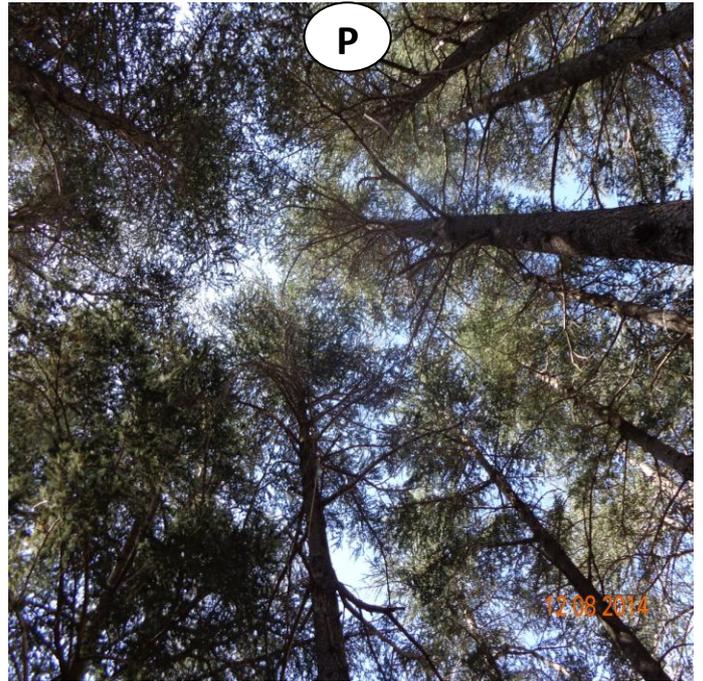
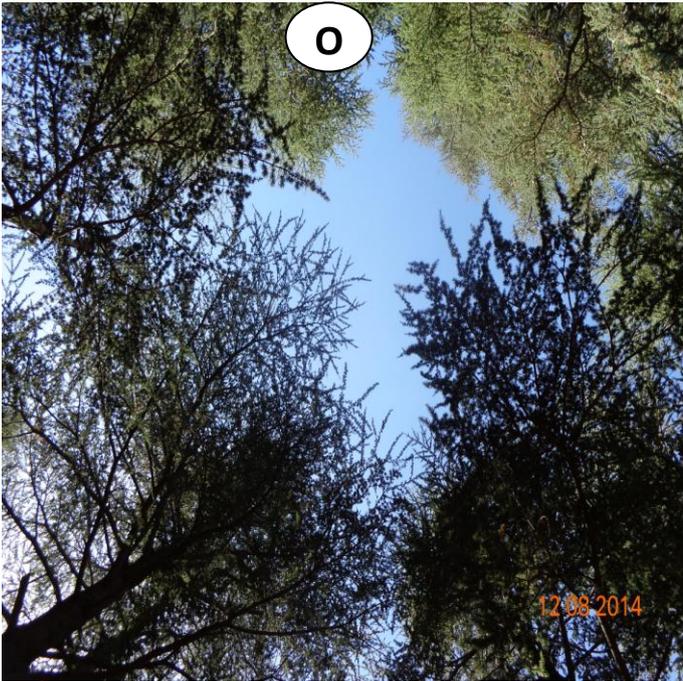
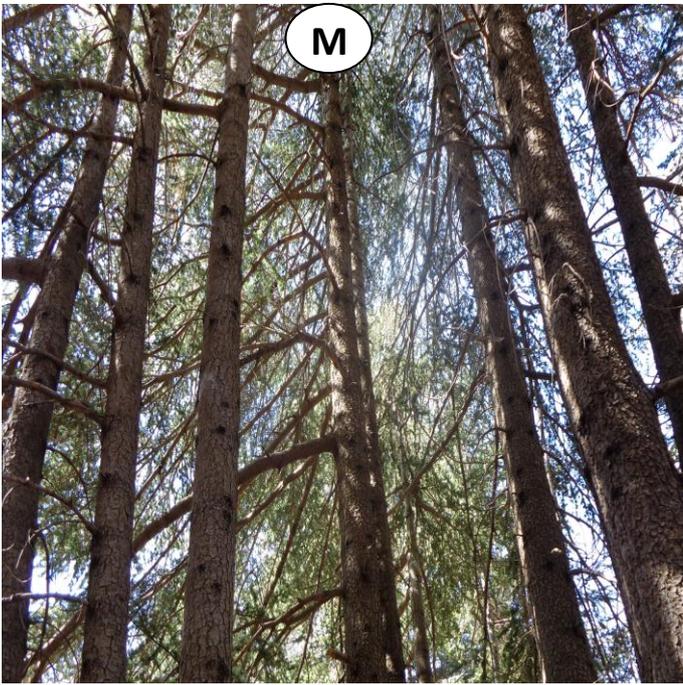
Photo **P** : Structure du couvert d'une futaie de cèdre à Tikjda.

Photo **Q** : Entrelacement des houppiers et fermeture quasi-complète du couvert.

Photo **R** : Structuration verticale des houppiers.







## Résumé

L'objectif de ce travail est d'appréhender le comportement du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* Manetti) et d'optimiser son fonctionnement. Sur des peuplements naturels et des plantations du Djurdjura, les aspects liés à la croissance en hauteur, en diamètre et radial ainsi qu'au développement du houppier ont été abordés par l'étude de leur réponse à plusieurs descripteurs du milieu (sol, climat, topographie, lumière) et sylviculturaux (densité et compétition).

L'analyse descriptive des reboisements a confirmé les potentialités productives du cèdre de l'Atlas et sa faculté à coloniser des zones de montagne contrastées. La pertinence du choix de la distribution des probabilités de Weibull dans l'établissement d'un modèle de répartition des tiges, aussi bien sur peuplements réguliers ou d'allure jardinée, est mise en évidence. L'étude de la structure du couvert par le biais de plusieurs attributs morphologiques des couronnes a mis en exergue la réaction des houppiers du cèdre à la densité et au degré de pénétration de la lumière. La biomasse foliaire estimée à partir des paramètres biométriques des houppiers s'avère positivement corrélée avec le taux de bois fonctionnel (aubier). Il est clairement établi que les facteurs environnementaux favorables s'accompagnent d'une proportion d'aubier élevée où le processus de duraminisation démarre précocement. L'effet de la densité et de la fertilité sur la croissance en hauteur et en diamètre est mieux expliqué par des modèles de forme hyperbolique. Les résultats montrent aussi le rôle réducteur des compétitions sur l'élancement et le grossissement des arbres.

**Mots clés :** Optimisation, fonctionnement, cèdre de l'Atlas, Djurdjura, descripteurs.

## Abstract

The aim of this work is to understand the behavior of the Atlas cedar (*Cedrus atlantica* Manetti) and to optimize its operation. On Djurdjuran natural stands and plantations, the aspects related to the growth in height, diameter and radial and the crown development have been addressed by studying their response to several environmental descriptors (soil, climate, topography, light) and silvicultural (density and competition). The descriptive analysis of reforestation confirmed the productive potential of Atlas cedar and its ability to colonize contrasting mountain areas. The appropriateness of the Weibull probability distribution in establishing a model of distribution of stems, both even-age or uneven-age stands is highlighted. The study of the structure of the canopy through several morphological attributes crowns highlighted the reaction of crowns cedar to density and degree of light penetration. Leaf biomass estimated from the biometric parameters of crowns proves positively correlated with functional wood rate (sapwood). It is clear that the favorable environmental factors are associated with a high proportion sapwood where duraminisation process starts early. The effect of the density and fertility on the growth in height and diameter is best explained by hyperbolic shape models. The results also show the reducing role of competitions on diameter and hight growth.

**Key words:** Optimization, operation, Atlas cedar, Djurdjura, descriptors.

## المخلص

الهدف من هذا العمل هو فهم سلوك شجرة أرز الأطلس (*Cedrus atlantica* Manetti) وتحسين نموها. على الغابات الطبيعية و مناطق التشجير في جبال جرجرة تم تناول الجوانب المتعلقة بالنمو الطولي والقطري والشعاعي وكذلك تطور الاوراق من خلال دراسة استجابتها لعدة عوامل بيئية (التربة والمناخ والتضاريس ، و الضوء ) والممارسات الحراجية (الكثافة والمنافسة) أكد التحليل الوصفي الإمكانيات الإنتاجية لأرز الأطلس وقدرتها على استعمار المناطق الجبلية . تم توضيح مدى ملائمة التوزيع الاحتمالي "ويبول" في إنشاء نموذج لتوزيع الاشجار ، سواء للغابات ذات الاعمار المنتظمة والغير المنتظمة . أبرزت دراسة هيكل الاوراق من خلال العديد من السمات المورفولوجية رد فعل اشجار الأرز لالكثافة ودرجة اختراق الضوء . الكتلة الورقية المقطرة من المعلومات البيومترية يبين ارتباطا إيجابيا مع معدل الخشب الوظيفي . فمن الواضح أن العوامل البيئية المواتية ترتبط مع نسبة عالية من الخشب الوظيفي حيث تبدأ عملية تحويله الى خشب قلبي في وقت مبكر . ويفسر تأثير الكثافة والخصوبة على النمو في الطول والقطر بشكل أفضل من خلال نماذج الشكل القطعي . تظهر النتائج أيضا الدور التقليصي للمنافسة على النمو الطولي و العرضي للاشجار .

**الكلمات الاستدلالية:** تحسين ، نمو ، أرز الأطلس، جبال جرجرة ، الاوصاف.