



THÈSE

PRÉSENTÉE A

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE L'INGENIEUR

Par Jérôme MOREAU

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Sciences du bois

IMPACT DE PRATIQUES SYLVICOLES INTENSIVES SUR LES PROPRIETES DU BOIS DE PIN MARITIME

Directeur de recherche : Patrick CASTERA
Co-Directeur de recherche : Frédéric ROUGER

Soutenue le : 17 décembre 2010

Devant la commission d'examen formée de :

M. GRELIER Stéphane
M. LEBAN, Jean-Michel
M. MARCHAL, Rémy
M. GARDINER Barry
M. CASTERA Patrick
M. ROUGER Frédéric
M. GRIL Joseph
M. PUIGGALI Jean-Rodolphe

Professeur, Université Bordeaux 1
Directeur de recherche, INRA Nancy
Professeur, ENSAM Cluny
Professeur, Forestry Commission
Chargé de recherche, INRA
Directeur de recherche, FCBA
Directeur de recherche, CNRS
Professeur, Université Bordeaux 1

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Directeur de Thèse
Co-Directeur de Thèse
Invité
Invité

RESUME

Les techniques de culture du pin maritime dans les Landes de Gascogne ont connu des changements importants à partir des années 1960. A côté de peuplements de sylviculture traditionnelle basée sur la régénération naturelle assistée, se sont succédés de nouveaux types de peuplements sous le vocable de « ligniculture ». La proportion de ces peuplements menés intensivement, dans la récolte des coupes rases en Aquitaine, va augmenter rapidement dans les dix prochaines années. Les données technologiques faisant actuellement défaut sur cette ressource, il est nécessaire d'anticiper dès aujourd'hui l'impact de ces pratiques sylvicoles sur les propriétés du bois.

Des arbres ont été échantillonnés dans 14 parcelles réparties dans les Landes de Gascogne. Sur chaque parcelle, 4 arbres ont été sélectionnés pour les mesures des propriétés physiques. Les variations radiales de densité intra-cerne, de proportion de bois final, de duramen et d'angle du fil ont été mesurées. Parallèlement 8 arbres ont été exploités. Après sciage puis séchage, l'aspect visuel et les propriétés mécaniques des avivés obtenus ont été mesurés.

Sur la base des données recueillies et de données d'études précédentes, des modèles ont été développés pour prédire les variations des caractéristiques étudiées. Ces modèles de la famille des modèles mixtes, sont constitués d'une partie « fixe » commune à l'ensemble des arbres et d'une partie aléatoire qui quantifie les écarts propres à la parcelle et aux arbres (appelés effet « parcelle » et effet « arbre »). Un modèle décrivant les variations avec la hauteur dans l'arbre du taux de duramen, basé sur l'âge des arbres a été développé, il explique plus de 70% de la variation. Les modèles décrivant les variations radiales de l'angle du fil, de la densité, et des propriétés mécaniques du bois ont un niveau de prédiction plus faible, mais un effet significatif de l'âge cambial et de la largeur de cerne sur ces propriétés a été mis en évidence. La vitesse de croissance a un impact négatif sur les propriétés mécaniques du bois de pin maritime.

Appliqué à des scénarios sylvicoles, ces modèles ont permis d'estimer le classement mécanique des sciages pouvant potentiellement être obtenus à partir de la ressource.

Le transfert de ces modèles auprès des gestionnaires forestiers pourrait permettre une meilleure estimation de la qualité des bois et donc leur meilleure allocation dans un contexte post tempête où la ressource en pin maritime en Aquitaine se fait rare.

MOTS-CLES

Pin maritime, sylviculture, propriétés technologiques, modèle

ABSTRACT

“Silvicultural effect on wood properties of maritime pine”

The forest cultivation techniques of maritime pine in the South Western France deeply changed in the 1960's. In particular the reforestation method shifted from assisted natural regeneration to intensive techniques including soil ploughing, phosphoric fertilization and seeding, then plantation with improved material in the 1980's. As the proportion of “intensively cultivated” stands in final cut will increase drastically in the next decades, it is now necessary to anticipate the impact of these reforestation methods on the wood properties for the wood industry, from the analysis of the oldest.

Trees were sampled from 14 stands in the South Western France covering a wide range of mean volume. On each stand, 4 trees were selected for physical properties measurement. Within ring wood density, latewood content, heartwood diameter and spiral grain angle were measured on wood disks collected at different heights within each tree. At the same time 8 trees were harvested and bucked into 2.2 m long logs. After drying, visual aspect and mechanical properties of the sawn boards were assessed.

Based on the data, deterministic models were developed to predict the variables based on selected stand and tree characteristics. The models for heartwood content in cross section explain quite well the variation with height (more than 70% of the variation). The heights of green and dead branches were identified as important variables in the models for nature of knot in trees. The developed models, for spiral grain angle, radial variations of wood density and mechanical properties, have a relatively low level of prediction, but it has highlighted the effect of cambial age and ring width on these properties. The growth rate has so a negative impact on the mechanical properties of wood of maritime pine. Based on the mixed model analysis with repeated measurements structure, the trees and stand effect on the residual variation were estimated. Applied on silvicultural scenarios, these models have been used in a simplified approach to estimate the strength of timber that can potentially be obtained from the resource. The transfer of these models with forest managers could allow a better estimate of the quality of wood, and thus a better allocation in a post-storm context where the resource is scarce.

KEYWORDS

Pinus pinaster, Forestry, wood properties, model

REMERCIEMENTS

Ce travail de thèse a été réalisé conjointement au sein de l'Unité des Sciences du Bois et des Biopolymères (US2B) et de l'institut technologique de la Forêt, de la Cellulose, du Bois construction et de l'Ameublement (FCBA) dans le cadre d'une convention CIFRE.

Je tiens dans un premier temps à remercier Patrick Castéra, chargé de recherche à l'INRA et directeur de l'US2B pour avoir accepté de diriger cette thèse. La reprise des études, presque 10 ans après l'obtention de mon DEA, ne fut pas évidente alors merci pour ta confiance et ta patience. Je remercie également très chaleureusement Frédéric Rouger, directeur de recherche au FCBA pour la co-direction de cette thèse. Ton soutien, tes encouragements et ta lutte pour me libérer le temps nécessaire à l'aboutissement de ce travail ont été décisifs.

J'adresse également mes remerciements à Stéphane Grelier, professeur à l'université de Bordeaux qui m'a fait l'honneur de présider mon jury.

Je remercie également Jean-Michel Leban, directeur de recherche à l'INRA Nancy et Rémy Marchal professeur à l'ENSAM Cluny d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce travail malgré leurs nombreuses responsabilités. Je souhaite également remercier Barry Gardiner de la Forestry Commission pour avoir participé au jury en tant qu'examinateur et Joseph Gril Directeur de recherche CNRS et Jean-Rodolphe Puiggali professeur à l'université de Bordeaux 1 d'avoir participé au jury. Je suis reconnaissant envers tous les membres du jury pour leurs nombreuses remarques, dont je me suis efforcé de tenir compte dans la version définitive de ce manuscrit.

Je voudrais aussi remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de ce projet :

Merci à Guillaume Chantre de m'avoir permis de commencer la réalisation de cette thèse et à Alain Bailly de m'avoir laissé le temps de la terminer.

Merci à Céline Meredieu pour sa participation aux premiers comités de pilotage et pour son aide à la construction des protocoles et à Frédéric Laganne pour la réalisation des radios des échantillons à la plate forme QB de l'INRA Pierroton.

Merci à Alain Bouvet et Christine Deleuze pour la réalisation des premiers traitements statistiques et de m'avoir guidé dans le labyrinthe de la modélisation.

Merci à tout le personnel du laboratoire mécanique du FCBA pour la réalisation des essais de caractérisation des avivés, dans des temps aussi contraints.

Merci à l'équipe recherche du pôle IBC du FCBA de m'avoir accueilli, tel un ermite, le temps de terminer la rédaction de ce manuscrit.

Enfin merci à tout le personnel et aux stagiaires de la station Sud Ouest du FCBA, ou l'on consacre sa vie au pin maritime. Merci à Patricia Poupeau pour son aide dans la gestion administrative. Merci à Pierre Alazard, Jean-Yves Fraysse et Mohamed Najjar pour leurs nombreux conseils. Merci à Jean-Pierre Rousseau, Jean-Mathieu de Boisseson et Thomas Aumette pour la participation au travail de terrain et en particulier pour le transport des nombreux échantillons à dos d'homme. Merci à Adrien Arraiolos pour le développement du logiciel sur ses soirées et week-ends. Merci à Sébastien Cavaignac arrivé en cours de route, mais dont les conseils en statistiques et la reprise en main de certains de mes projets m'ont permis d'avancer plus sereinement. Un grand merci à François Besson pour son aide à toutes les étapes de ce projet.

Je terminerai en remerciant toute ma famille pour leurs encouragements tout au long de ce travail.

Merci à mes parents pour m'avoir donné la possibilité de réaliser ce que j'avais entrepris.

Un grand merci à Charlotte, toi qui partage ma vie, pour tes encouragements et les merveilleux moments que nous partageons, et à toi Elisa ma grande Pitchounette.

TABLE DES MATIERES

RESUME	2
MOTS-CLES	2
ABSTRACT	3
KEYWORDS	3
REMERCIEMENTS	4
TABLE DES MATIERES	6
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	10
INTRODUCTION.....	16
1) REVUE DE LITTERATURE.....	18
A) INTRODUCTION GENERALE SUR LE PIN MARITIME	18
i) <i>Éléments botaniques, Aire de répartition.....</i>	18
ii) <i>Historique de l'introduction.....</i>	20
iii) <i>Sylviculture</i>	21
(1) La ligniculture, une technique de reboisement bien rodée	22
(2) Rôle et rythme des éclaircies.....	25
iv) <i>L'industrie du pin maritime en Aquitaine</i>	26
v) <i>Produits, état des lieux et perspectives d'évolution des marchés</i>	27
(1) Secteur du bois d'œuvre.....	27
(2) Secteur du bois d'industrie.....	28
B) QUALITE DU BOIS	29
i) <i>Définition</i>	29
ii) <i>Le bois juvénile</i>	32
iii) <i>Paramètres étudiés et impact sur la qualité des bois.....</i>	33
(1) Duramen	33
(2) Nodosité.....	35
(3) Angle du fil	37
(4) Densité intra cerne	40
(5) Propriétés mécaniques (MOE, MOR)	41
C) IMPACT DE LA SYLVICULTURE INTENSIVE SUR LA QUALITE DES BOIS	42
D) MODELISATION DE LA QUALITE DU BOIS EN FONCTION DE LA SYLVICULTURE.....	43
i) <i>La modélisation en forêt, pourquoi modéliser ?</i>	43
ii) <i>Exemples de modèles développés sur résineux</i>	45
E) INDICATEURS DE LA QUALITE ETUDIÉS	47

2) MATERIEL ET METHODES	48
A) DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	48
i) Inventaire des peuplements disponibles.....	48
ii) Sélection des peuplements.....	49
(1) Peuplements conduits en ligniculture.....	49
(2) Peuplements conduits en régénération naturelle	52
(a) Peuplements étude ex-CTBA.....	52
(b) Peuplements étude ex-AFOCEL.....	53
iii) Choix des arbres et mesures réalisées avant exploitation	54
B) EXPLOITATION DES ARBRES, FAÇONNAGE ET SCIAGE	55
i) Exploitation et façonnage	55
ii) Sciage des billons prélevés	56
C) METHODES DE CARACTERISATION DES ECHANTILLONS PRELEVES	56
i) Méthode de mesure du taux de Duramen.....	56
ii) Méthode de mesure de la qualité des nœuds.....	57
iii) Méthode de mesure des variations radiales de l'angle du fil.....	57
iv) Méthode de mesure de la résistance mécanique des sciages	58
v) Méthode de mesure des variations de densité intra cerne	58
vi) Méthode de mesure de l'âge de transition bois juvénile – bois adulte.....	60
vii) Synthèse des échantillons prélevés et des mesures réalisées.....	61
D) METHODES D'ANALYSES STATISTIQUES	63
3) CONSTRUCTION DES MODELES A PARTIR DE VARIABLES DENDROMETRIQUES.....	66
A) PROPRIETES BIOLOGIQUES DU BOIS	66
i) Duramen	66
(1) Description des données.....	66
(2) Construction de la partie fixe du modèle.....	67
(3) Ajout des effets aléatoires	71
(4) Qualité de l'ajustement du modèle.....	72
ii) Nature des nœuds.....	74
(1) Description des données.....	74
(2) Parcelles de ligniculture non élaguées	76
(a) Construction de la partie fixe du modèle	76
(b) Ajout des effets aléatoires.....	78
(c) Qualité de l'ajustement du modèle	78
(3) Parcelles de régénération naturelle.....	79
(a) Profil de variation de la surface de nœud vert.....	80
(b) Profil de variation de la surface sans nœud.....	81
(c) Profil de la surface de nœud noir	84
(4) Conclusion	84
iii) Âge de transition bois juvénile bois adulte	85
iv) Densité intra-cerne	86

(1)	Densité intra-cerne bois initial et bois final.....	87
(2)	Construction modèle bois final	88
(3)	Proportion de bois final.....	91
(4)	Conclusion	93
v)	<i>Angle du fil</i>	94
(1)	Description des données.....	94
(2)	Construction du modèle	95
B)	PROPRIETES TECHNOLOGIQUES : MOE, MOR	97
i)	<i>Description des données</i>	97
ii)	<i>Construction des modèles</i>	99
iii)	<i>Analyse des corrélations entre variables</i>	99
iv)	<i>Construction modèle de prédiction du MOE</i>	100
v)	<i>Construction modèle de prédiction du MOR</i>	101
vi)	<i>Construction modèle de prédiction du MOR fractile à 5%</i>	102
C)	CONCLUSION	103
D)	INTRODUCTION DE NOUVELLES VARIABLES DANS LES MODELES	104
i)	<i>MOE et nouvelles variables</i>	105
ii)	<i>MOR et nouvelles variables</i>	106
iii)	<i>Conclusion</i>	106
4)	CAS CONCRETS D'UTILISATION DES MODELES DEVELOPPES	107
A)	IMPACT DE SCENARIOS SYLVICOLES CONTRASTES SUR LA QUALITE DES SCIAGES PRODUITS	107
i)	<i>Scénarios sylvicoles retenus (contexte reconstitution)</i>	107
ii)	<i>Simulation billonnage et sciage des arbres</i>	109
iii)	<i>Propriétés technologiques des produits</i>	110
(1)	Duramen	110
(2)	Nature des nœuds intra arbre.....	111
(3)	Angle fil	113
(4)	Module d'élasticité en flexion (MOE)	114
(5)	Classes de résistance mécanique.....	116
iv)	<i>Conclusion</i>	118
B)	IMPACT SUR LE CLASSEMENT MECANIQUE DES BOIS DE DIFFERENTES HYPOTHESES DE RECOLTE DU MASSIF AQUITAIN	120
i)	<i>Méthodologie</i>	120
(1)	Estimation de la ressource disponible	120
(2)	Estimation du volume de sciages et classement	122
ii)	<i>Résultats</i>	122
C)	EVALUATION ECONOMIQUE DU SYSTEME DE PRODUCTION	125
i)	<i>Méthode</i>	125
ii)	<i>Résultats</i>	126
D)	CONCLUSION	130

5) EXEMPLES DE TRANSFERT DES MODELES AUPRES DES PROFESSIONNELS.....	132
i) <i>Contexte et objectifs.....</i>	<i>132</i>
ii) <i>Grille d'estimation qualitative de parcelles.....</i>	<i>133</i>
iii) <i>Outil informatique développé.....</i>	<i>134</i>
CONCLUSION GENERALE, PERSPECTIVES	135
BIBLIOGRAPHIE.....	137
ANNEXE 1 : LOGICIEL PROCALC.....	147
ANNEXE 2 : POSTER PRESENTE AU 6EME COLLOQUE IUFRO	148

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE 1 : AIRE DE REPARTITION NATURELLE DU PIN MARITIME D'APRES BARADAT & MARPEAU (1988).....	18
FIGURE 2 : POTENTIEL DE PRODUCTION ANNUELLE DU MASSIF DE PIN MARITIME EN AQUITAINE EN MILLIONS DE M ³ D'APRES IFN.....	20
FIGURE 3 : RECAPITULATIF DES TABLES DE DECISION DE DECLENCHEMENT DES ECLAIRCIES EN LIGNICULTURE (COPEAUX 2003)	25
FIGURE 4 : EVOLUTION DE L'EMPLOI SALARIE DANS LES INDUSTRIES DU BOIS ET DU PAPIER DE 1990 A 2006, BASE 100 EN 1990 D'APRES DUMARTIN (2009)	26
FIGURE 5 : EVOLUTION DE LA DESTINATION DES SCIAGES DE PIN MARITIME PRODUITS EN AQUITAINE (D'APRES DONNEES EAB / DRAAF).....	27
FIGURE 6 : EVOLUTION DU NOMBRE DE SCIERIES EN AQUITAINE ENTRE 1993 ET 2007 (D'APRES DONNEES EAB / DRAAF).....	28
FIGURE 7 : DIFFERENTES PERCEPTIONS DE LA NOTION DE QUALITE (HEBERT ET AL. 2002).....	30
FIGURE 8 : ORIENTATION DES MICRO FIBRILLES DANS LA COUCHE S2 DE LA PAROI CELLULAIRE D'APRES (KRETSCHMANN 2003).....	31
FIGURE 9 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE LA LOCALISATION DU BOIS JUVENILE ET DU DURAMEN DANS L'ARBRE (D'APRES (JOZSA & MIDDLETON 1997)).....	32
FIGURE 10 : PIN MARITIME, ASPECT DU DURAMEN SUR DISQUE ET SUR SCIAGE.....	35
FIGURE 11 : PIN MARITIME - COUPE TRANSVERSALE D'UNE BRANCHE INCLUSE DANS LE BOIS	36
FIGURE 12 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE COUPE LONGITUDINALE D'UN ARBRE, NATURE INTERNE DES NŒUDS (ADAPTE D'IKONEN (2008)).....	36
FIGURE 13 : IMAGE 3D D'UN BILLON DE PIN MARITIME RECONSTITUEE A PARTIR D'IMAGES ACQUISES AVEC UN TOMOGAPHE RX, MONTRANT LA STRUCTURE INTERNE DES BRANCHES LEUR NATURE ET LA LOCALISATION DU DURAMEN (D'APRES PINTO (2004))	37
FIGURE 14 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DE L'ANGLE DU FIL POUR L'EPICEA (D'APRES SÄLL (2002))	37
FIGURE 15 : GAUCHISSEMENT DES SCIAGES EN FONCTION DE L'ANGLE DU FIL MESURE SUR LE CERNE EXTERNE DES BILLONS APRES ECORÇAGE (D'APRES KLIGER & JOHANSSON (2004))	39
FIGURE 16 : EXEMPLE DE VARIATION DE LA DENSITE INTRA-CERNE POUR PIN MARITIME ET PIN TAEDA D'APRES DOIRAT ET AL. (2003)	40
FIGURE 17 : EFFETS DE DIFFERENTES OPERATIONS SYLVICOLES SUR LA QUALITE DES BOIS, D'APRES MACDONALD & HUBERT (2002).....	42
FIGURE 18 : EXEMPLE DE VARIABLES UTILISEES DANS DES MODELES DE PREDICTION DES PROPRIETES DU BOIS.....	46
FIGURE 19 : LOCALISATION GEOGRAPHIQUE DES ESSAIS FORESTIERS AQUITAINS DU RESEAU FCBA	48
FIGURE 20 : SCENARIOS CIBLES - VOLUME UNITAIRE EN FONCTION DE L'AGE POUR DEUX INDICES DE FERTILITE ET OBJECTIFS D'EXPLOITATION (REPRESENTES PAR UN CERCLE).....	50
FIGURE 21 : LOCALISATION DES PARCELLES RETENUES POUR L'ETUDE	50
FIGURE 22: CARACTERISTIQUES DES PARCELLES CONDUITES EN LIGNICULTURE RETENUES POUR L'ETUDE	51
FIGURE 23 : LIGNICULTURE, PARCELLES SELECTIONNEES : VOLUME UNITAIRE MOYEN ET ACCROISSEMENT EN CIRCONFERENCE	51

FIGURE 24: CARACTERISTIQUES DENDROMETRIQUES MOYENNES DES PARCELLES DE REGENERATION NATURELLE SELECTIONNEES DANS L'ETUDE EX-CTBA (EXPLOITATION EN 1986)	52
FIGURE 25 : REGENERATION NATURELLE, PARCELLES ETUDE EX-CTBA : VOLUME UNITAIRE MOYEN ET ACCROISSEMENT EN CIRCONFERENCE	52
FIGURE 26: CARACTERISTIQUES DENDROMETRIQUES MOYENNES DES PARCELLES DE REGENERATION NATURELLES SELECTIONNEES DANS L'ETUDE EX-AFOCEL (EXPLOITATION EN 2004).....	53
FIGURE 27 : REGENERATION NATURELLE, PARCELLES ETUDE EX-AFOCEL : VOLUME UNITAIRE MOYEN ET ACCROISSEMENT EN CIRCONFERENCE	53
FIGURE 28 : ARBRES SELECTIONNES - ACCROISSEMENT EN CIRCONFERENCE EN FONCTION DU VOLUME UNITAIRE	54
FIGURE 29 : ARBRES SELECTIONNES – FAÇONNAGE DISQUES ET BILLONS.....	55
FIGURE 30 : PLAN DE DEBIT DES BILLONS ET CODE COULEUR APPLIQUE POUR LE REPERAGE DE LA DISTANCE AU COEUR	56
FIGURE 31 : METHODE DE MESURE DE LA NATURE DES NŒUDS SUR RONDELLE, ET PROFILS DE NATURE DES NŒUDS GENERES.....	57
FIGURE 32 : MISE EN EVIDENCE L'ANGLE DU FIL (POINTE TRACEUSE) ET MESURE AU RAPPORTEUR ELECTRONIQUE (SPIROLYTE).....	58
FIGURE 33 : ESSAI DE FLEXION DE 4 POINTS, PHOTO ET SCHEMA.....	58
FIGURE 34 : VARIATION DE LA DENSITE DU BOIS FINAL EN FONCTION DE L'AGE CAMBIAL, DETERMINATION DE L'AGE DE TRANSITION BOIS JUVENILE BOIS ADULTE PAR REGRESSION LINEAIRE SEGMENTEE	60
FIGURE 35 : PEUPELEMENTS CONDUITS EN LIGNICULTURE – SYNTHESE DES ECHANTILLONS PRELEVES.....	61
FIGURE 36 : PEUPELEMENTS DE EX-CTBA DE REGENERATION NATURELLE – SYNTHESE DES ECHANTILLONS ANALYSES	61
FIGURE 37 : PEUPELEMENTS EX-AFOCEL DE REGENERATION NATURELLE – SYNTHESE DES ECHANTILLONS ANALYSES	62
FIGURE 37 : SYNTHESE DU NOMBRE D'ECHANTILLONS ANALYSES POUR LES 3 TYPES DE PEUPELEMENTS ETUDIES	62
FIGURE 38 : TAUX DE DURAMEN SUR SECTIONS MOYEN ET MESURES A 2,4 ET 10 M.....	66
FIGURE 39 : TAUX DE SURFACE DE DURAMEN EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE POUR LES 28 PARCELLES ETUDIEES (INDICATION <i>_R</i> POUR LES PARCELLES DE REGENERATION NATURELLE ET <i>_L</i> POUR LES PARCELLES DE LIGNICULTURE).....	67
FIGURE 40 : MODELE DU TAUX DE SURFACE DE DURAMEN, RESULTATS DE L'AJUSTEMENT A L'ENSEMBLE DES ARBRES	68
FIGURE 41 : REPRESENTATION GRAPHIQUE DES AJUSTEMENTS ARBRE PAR ARBRE DES PARAMETRES DU MODELE DURAMEN.....	68
FIGURE 42 : CERCLE DES CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES DENDROMETRIQUES ET LE PARAMETRE K (EN VARIABLE SUPPLEMENTAIRE), DU MODELE DE TAUX DE DURAMEN.....	69
FIGURE 43 : MODELE DE TAUX SURFACE DE DURAMEN, RESULTATS DE L'AJUSTEMENT A L'ENSEMBLE DES ARBRES	70
FIGURE 44 : RESIDUS EN FONCTION DES DONNEES AJUSTEES (A GAUCHE) ET VALEURS PREDITES EN FONCTION DES VALEURS MEASUREES (A DROITE)	70
FIGURE 45 : SYNTHESE DES PARAMETRES DU MODELE DE VARIATION DU DURAMEN	71
FIGURE 46 : SURFACE DE DURAMEN, VALEURS MEASUREES / VALEURS PREDITES POUR L'ENSEMBLE DES PARCELLES (GAUCHE) ET DETAILLE PAR PARCELLE (DROITE).....	72
FIGURE 47 : CONTROLE GRAPHIQUE DE L'AJUSTEMENT DU MODELE DE DURAMEN : RESIDUS EN FONCTION DES VALEURS PREDITES (A GAUCHE) ET NORMALITE DES RESIDUS (A DROITE).....	72

FIGURE 48 : CONTROLE GRAPHIQUE DE L'AJUSTEMENT DU MODELE DE DURAMEN : NORMALITES DES EFFETS ALEATOIRES.....	73
FIGURE 49 : TAUX DE DURAMEN, COMPARAISON VALEURS REELLES (POINTS BLEUS), VALEURS MODELISEES (EFFETS FIXES UNIQUEMENT EN BLEU ET EFFETS FIXES + EFFETS ALEATOIRES ARBRES EN ROUGE) POUR 25 ARBRES	73
FIGURE 50 : SURFACE DES NŒUDS (EN TAUX PAR RAPPORT A LA SURFACE TOTALE) SUR DES SECTIONS PRELEVEES A 1,30 M POUR LES PARCELLES ETUDIEES.....	74
FIGURE 51 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE COUPE LONGITUDINALE DE L'ARBRE MOYEN POUR LES PARCELLES DE LIGNICULTURE ET REGENERATION NATURELLE, NATURE INTERNE DES NŒUDS (ZONE VERTE : NŒUD VERT, ZONE NOIRE : NŒUD NOIR, ZONE JAUNE : SANS NŒUD)	75
FIGURE 52 : SURFACE DE NŒUD VERT (EN ROSE) ET NŒUD NOIR (EN BLEU) EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE POUR LES 3 PARCELLES DE LIGNICULTURE NON ELAGUEES ANALYSEES	76
FIGURE 53 : CERCLE DES CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES DENDROMETRIQUES ET LES SURFACES DE NŒUD NOIR (S_NOIR) ET DE NŒUD VERT (S_VERT) POUR LES PARCELLES DE LIGNICULTURE.....	77
FIGURE 54 : MODELE DE TAUX NŒUD VERT EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE RESULTATS DE L'AJUSTEMENT A L'ENSEMBLE DES ARBRES	77
FIGURE 55 : SYNTHESE DU MODELE DE VARIATION DE LA SURFACE DE NŒUD VERT EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE	78
FIGURE 56 : CONTROLE GRAPHIQUE DE L'AJUSTEMENT DU MODELE DE NOEUD VERT : RESIDUS EN FONCTION DES VALEURS PREDITES (A GAUCHE) ET NORMALITES DES RESIDUS (A DROITE)	78
FIGURE 57 : SURFACES DE NŒUD VERT, NŒUD NOIR ET SANS NOEUD EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE POUR LES 14 PARCELLES DE REGENERATION NATURELLE ANALYSEES	79
FIGURE 58 : CERCLE DES CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES DENDROMETRIQUES ET LES SURFACES DE NŒUD NOIR (S_NOIR), DE NŒUD VERT (S_VERT) ET SANS NŒUD (S_SANS) POUR LES PARCELLES DE REGENERATION NATURELLE	80
FIGURE 59 : MODELE DE TAUX NŒUD VERT EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE, RESULTATS DE L'AJUSTEMENT A L'ENSEMBLE DES ARBRES DE REGENERATION NATURELLE.....	80
FIGURE 60 : SYNTHESE MODELE DE VARIATION DE LA SURFACE DE NŒUD VERT.....	81
FIGURE 61 : MODELE DE TAUX DE BOIS SANS NŒUD EN SURFACE EN FONCTION DE LA HAUTEUR RELATIVE, RESULTATS DE L'AJUSTEMENT A L'ENSEMBLE DES ARBRES	82
FIGURE 62 : EXEMPLE DE L'INFLUENCE DE LA HAUTEUR DE LA COURONNE DE BRANCHES MORTES (HCM) SUR L'EVOLUTION DE LA PROPORTION DE BOIS SANS NOEUD INTRA ARBRE AVEC LA HAUTEUR RELATIVE	82
FIGURE 63 : SYNTHESE DU MODELE DE VARIATION DE LA SURFACE DE BOIS SANS NOEUD.....	83
FIGURE 64 : TAUX DE BOIS SANS NOEUD, EXEMPLE POUR 12 ARBRES, COMPARAISON VALEURS REELLES, VALEURS MODELISEES (EFFETS FIXES UNIQUEMENT EN BLEU ; EFFETS ALEATOIRES PARCELLES EN ROUGE ; EFFETS ARBRES EN VERT).....	83
FIGURE 65 : ÂGE DE TRANSITION BOIS JUVENILE BOIS ADULTE POUR LES 14 PARCELLES DE LIGNICULTURE ET LES 3 NIVEAUX DE HAUTEUR ANALYSES.....	85
FIGURE 66 : EXEMPLE DE CALCUL DE L'AGE DE TRANSITION POUR L'ARBRE 3 DE LA PARCELLE 3 A 2 HAUTEURS (2,4 M ET 4,8 M)	85

FIGURE 67 : ANOVA DE L'AGE DE TRANSITION BOIS JUVENILE BOIS ADULTE POUR LES 14 PARCELLES ANALYSEES A 3 NIVEAUX DE HAUTEURS.....	86
FIGURE 68 : DENSITE INTRA-CERNE BOIS INITIAL ET BOIS FINAL, PARCELLES CONDUITES EN LIGNICULTURE	87
FIGURE 69 : DENSITE DU BOIS INITIAL (MBI) ET DU BOIS FINAL (MBF) EN FONCTION DE L'AGE CAMBIAL POUR L'ENSEMBLE DES ECHANTILLONS ANALYSES	87
FIGURE 70 : CERCLE DES CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES DENDROMETRIQUES ET LA DENSITE DU BOIS FINAL INTRA-CERNE POUR LES PARCELLES DE LIGNICULTURE	88
FIGURE 71 : MODELE DE DENSITE INTRA-CERNE EN FONCTION DE L'AGE CAMBIAL ; RESULTATS DE L'AJUSTEMENT A L'ENSEMBLE DES ARBRES	89
FIGURE 72 : DENSITE MOYENNE DU BOIS FINAL EN FONCTION DE LA LARGEUR DE CERNE (MM) POUR DIFFERENTS AGES CAMBIAUX, POUR LES 14 PARCELLES DE LIGNICULTURE ANALYSEES	90
FIGURE 73 : SYNTHESE MODELE DE VARIATION DE LA DENSITE DU BOIS FINAL	90
FIGURE 74 : PROPORTION DE BOIS FINAL, PARCELLES CONDUITES EN LIGNICULTURE	91
FIGURE 75 : MODELE DE DENSITE DE LA PROPORTION DE BOIS FINAL EN FONCTION DE L'AGE CAMBIAL ; RESULTATS DE L'AJUSTEMENT A L'ENSEMBLE DES ARBRES	92
FIGURE 76 : SYNTHESE MODELE DE VARIATION DE PROPORTION DE BOIS FINAL	92
FIGURE 77 : VALEURS MOYENNES D'ANGLE DU FIL ET ECART TYPE POUR LES PARCELLES DE LIGNICULTURE A UNE HAUTEUR DE 2,4 M	94
FIGURE 78 : EVOLUTION RADIALE DE L'ANGLE DU FIL A UNE HAUTEUR DE 2,40 M POUR LES PARCELLES DE LIGNICULTURE	94
FIGURE 79 : ANGLE DU FIL (°) PROFIL DE VARIATION INTRA-ARBRE	95
FIGURE 80 : MODELE D'ANGLE DU FIL INTRA-CERNE EN FONCTION DE L'AGE CAMBIAL ; RESULTATS DE L'AJUSTEMENT A L'ENSEMBLE DES ARBRES	95
FIGURE 81 : SYNTHESE MODELE DE VARIATION DE L'ANGLE DU FIL	96
FIGURE 82 : MOE (EN GPA) ET MOR (EN MPA) MOYEN, A 2,5 M, A 7,2 M ET ECART TYPE (EC).....	97
FIGURE 83 : MOE, PROFILS DE VARIATION INTRA-ARBRE (TOUTES PARCELLES).....	98
FIGURE 84 : MOR, PROFILS DE VARIATION INTRA-ARBRE (TOUTES PARCELLES).....	98
FIGURE 85 : CERCLE DES CORRELATIONS ENTRE LES VARIABLES DENDROMETRIQUES ET LE MOE ET LE MOR (EN VARIABLES SUPPLEMENTAIRES) POUR LES PARELLES DE LIGNICULTURE ET DE REGENERATION NATURELLE	99
FIGURE 86 : MODELE DE VARIATION DU MOE POUR L'ENSEMBLE DES PARCELLES (LIGNICULTURE ET REGENERATION NATURELLE).....	100
FIGURE 87 : LARGEUR DE CERNE MOYENNE A UNE HAUTEUR DE 2,40M EN FONCTION DE L'AGE CAMBIAL POUR LES PARCELLES DE REGENERATION NATURELLE ET DE LIGNICULTURE.....	100
FIGURE 88 : SYNTHESE MODELE DE VARIATION DU MOE	101
FIGURE 89 : MODELE DE VARIATION DU MOR POUR L'ENSEMBLE DES PARCELLES (LIGNICULTURE ET REGENERATION NATURELLE).....	101
FIGURE 90 : SYNTHESE MODELE DE VARIATION DU MOR	102
FIGURE 91 : MODELE DE VARIATION DU FRACTILE A 5% DU MOR POUR L'ENSEMBLE DES PARCELLES (LIGNICULTURE ET REGENERATION NATURELLE)	103
FIGURE 92 : BILAN DES MODELES DEVELOPPES	104

FIGURE 93 : MOE – INTRODUCTION DE NOUVELLES VARIABLES	105
FIGURE 94 : MOR – INTRODUCTION DE NOUVELLES VARIABLES	106
FIGURE 95 : SCENARIOS SYLVICOLES ETUDIES ADAPTE D'APRES (ECOFOR 2009)	107
FIGURE 96 : CIRCONFERENCE MOYENNE A 1,30 M EN FONCTION DE L'AGE POUR LES 3 SCENARIOS ETUDIES.....	108
FIGURE 97 : REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU BILLONNAGE ET DU SCIAGE PAR DEBIT TOURNANT DE L'ARBRE SIMULE	109
FIGURE 98 : DURAMEN, REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROFIL DE L'ARBRE SIMULE POUR LES 3 SCENARIOS ...	110
FIGURE 99 : TAUX D'AVIVES AVEC DURAMEN POUR LES 3 SCENARIOS APRES SIMULATION DU SCIAGE DES BILLONS ...	110
FIGURE 100 : NATURE DES NŒUDS, REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROFIL DE L'ARBRE SIMULE	111
FIGURE 101 : TAUX DE SCIAGES AVEC NŒUDS NOIRS (NN) ET NOEUDS VERTS (NV) POUR LES 3 SCENARIOS ETUDIES	112
FIGURE 102 : ANGLE DU FIL, REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROFIL DE L'ARBRE SIMULE POUR LES 3 SCENARIOS	113
FIGURE 103 : ANGLE DU FIL MOYEN PAR BILLON ET TAUX DE SCIAGE AVEC UN ANGLE INFERIEUR A -8° POUR LES 3 SCENARIOS SYLVICOLES ANALYSES	114
FIGURE 104 : MOE EN FLEXION (GPA), REPRESENTATION SCHEMATIQUE DU PROFIL DE L'ARBRE SIMULE POUR LES 3 SCENARIOS	115
FIGURE 105 : MOE MOYEN (GPA) POUR LES 3 SCENARIOS APRES SIMULATION DE SCIAGE DES BILLONS	115
FIGURE 106 : CLASSES DE RESISTANCE MECANIQUE DEFINIES SELON LA NORME NF EN 338.....	116
FIGURE 107 : CLASSES DE RESISTANCE MECANIQUE POUR LES 3 SCENARIOS EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE PRELEVEMENT.....	117
FIGURE 108 : CLASSES DE RESISTANCE MECANIQUE PAR BILLON, EN FONCTION DE LA HAUTEUR POUR LES 3 SCENARIOS	118
FIGURE 109 : PROPRIETES MOYENNES DES SCIAGES OBTENUS LES 3 SCENARIOS A LA COUPE RASE	119
FIGURE 110 : VOLUMES DE BOIS D'ŒUVRE PIN MARITIME (BILLONS DE SCIAGE), PRELEVES SUR LE MASSIF AQUITAIN EN FONCTION DES 3 HYPOTHESES DE RECOLTE (MILLIERS DE M ³).....	123
FIGURE 111 : AQUITAINE, PIN MARITIME, VOLUME DE SCIAGES TOTAL ET PAR CLASSE DE RESISTANCE MECANIQUE EN FONCTION DES 3 HYPOTHESES DE RECOLTE (MILLIERS DE M ³).....	123
FIGURE 112 : AQUITAINE, PIN MARITIME, VOLUMES SCIAGES PAR CLASSE DE RESISTANCE MECANIQUE EN FONCTION DES 3 HYPOTHESES DE RECOLTE (MILLIERS DE M ³)	124
FIGURE 113 : SCENARIO D'EVOLUTION DE LA PRODUCTION DE SCIAGES DE PIN MARITIME DE 2009 A 2015 D'APRES IMBERTY ET AL. (2010)	124
FIGURE 114 : METHODE DE CALCUL DU COUT DE REVIENT DU SCIAGE BRUT	126
FIGURE 115 : CARACTERISTIQUES DE L'APPROVISIONNEMENT SCIERIE POUR LES 3 CAS ETUDIES.....	126
FIGURE 116 : COUTS DE REVIENT DU SCIAGE EN €/M ³ SCIE POUR LES 3 CAS.....	127
FIGURE 117 : COUTS DE REVIENT DU SCIAGE EN €/M ³ SCIE POUR LES 3 CAS	128
FIGURE 118 : QUALITE MECANQUES DES SCIAGES PRODUITS POUR LES 3 MODALITES D'APPROVISIONNEMENT	128
FIGURE 119 : DONNEES ECONOMIQUES POUR LES 3 MODALITES D'APPROVISIONNEMENT	129
FIGURE 120 : EXEMPLE DE PRODUITS BOIS RECONSTITUES : BOIS MASSIF ABOUTE (DROITE) ET BOIS MASSIF RECONSTITUE (A GAUCHE) (PHOTOS SINBPLA).....	130

FIGURE 121 : SYSTEME DE MESURE DE L'ANGLE DU FIL SUR BILLON DEVELOPPE EN SUEDE (D'APRES NYSTRÖM 2003)
..... 131

FIGURE 122 : TAUX DE SCIAGES CLASSES SUIVANT LA NATURE DES NŒUDS - EXEMPLE DE GRILLE D'ESTIMATION
QUALITATIVE DE PEUPEMENTS 133

FIGURE 123 : TAUX DE SCIAGES DE CLASSE DE RESISTANCE MECANIQUE C24 - EXEMPLE DE GRILLE D'ESTIMATION
QUALITATIVE DE PEUPEMENTS 134

INTRODUCTION

L'expérience acquise par la scierie en Aquitaine repose aujourd'hui sur l'exploitation de gros bois issus de sylviculture traditionnelle et de régénération naturelle assistée. A côté de ces types de peuplements anciens, de nouveaux types de peuplements se sont succédés, sous le vocable de « ligniculture ». Dès les années 60, des semis en bande puis en ligne sont réalisés après un travail du sol et mènent à des productivités très supérieures. Le phénomène s'accroît avec la fertilisation phosphorique, puis beaucoup plus récemment avec la plantation de matériel amélioré au plan génétique.

Les données technologiques font actuellement défaut sur cette nouvelle ressource avec laquelle il va falloir compter, sachant que les caractéristiques du bois sont profondément affectées par les méthodes de culture de la forêt.

Pour le pin maritime, seuls les modèles de croissance et les modèles bois-fibres sont opérationnels, en raison d'une faible présence de cette essence sur le marché du bois de structure. La modélisation de ces propriétés technologiques nécessite des développements supplémentaires adaptés à une ressource en pleine évolution (coupe rase de peuplements conduits en ligniculture).

Les études « bois français » menés par FCBA en 1990, visant à estimer les caractéristiques mécaniques des bois, sont à l'image des peuplements anciens précédemment cités et aujourd'hui transformés. Il est donc essentiel de pouvoir décrire les caractéristiques de base du matériau que l'industrie va transformer en masse d'ici 5 à 10 ans, afin de pouvoir engager la réflexion technologique sur le devenir du pin maritime dans la construction bois, et ce à différentes échelles allant de la parcelle au niveau régional.

De plus, la tempête KLAUS du 24 janvier 2009 a provoqué des dégâts considérables sur la forêt des Landes de Gascogne. En effet, 42,5 millions de m³ ont été mis à terre, davantage encore que lors de la précédente tempête (Martin en décembre 1999). La stratégie de gestion du massif doit ainsi viser à réduire le « trou de production » qui s'annonce pour les prochaines décennies :

- dans un premier temps, en stockant un maximum de chablis, et en favorisant la consommation locale de ceux-ci,
- dans un deuxième temps, en récoltant les coupes provenant de peuplements endommagés (régularisation) puis préférentiellement les vieux peuplements, mais aussi en diversifiant les scénarios sylvicoles. En effet, la diversification des itinéraires sylvicoles du pin maritime -en termes de durée de rotation et nombre d'éclaircies- permettrait d'augmenter le taux de production par unité de volume sur pied, mais aussi de réduire l'exposition aux risques.

Parallèlement, des besoins croissants se font jour, avec le support explicite des pouvoirs publics pour l'utilisation du bois dans la construction. Il s'agit également de l'axe stratégique majeur du Pôle de Compétitivité Xylofutur, qui vise à mieux positionner le pin maritime sur le secteur de la construction. La question de l'adéquation de la ressource en pin maritime à ces nouveaux enjeux se pose alors.

Les objectifs de cette thèse sont ainsi :

- de développer et améliorer la connaissance des propriétés du bois de pin maritime notamment en élaborant des modèles de prédiction de la densité du bois, de la proportion de bois juvénile, du duramen, de l'angle du fil et de la nature des nœuds.
- de créer un outil de simulation des caractéristiques du matériau bois produit en ligniculture, afin de pouvoir prédire l'impact technique de différentes modalités de croissance et d'objectif de production

Les modèles une fois validés constitueront un outil puissant pour guider les professionnels dans leurs choix (sylviculteurs, experts forestiers, exploitants, industriels). Les outils de simulation créés permettront d'évaluer l'influence des pratiques sylvicoles, en intégrant les caractéristiques des grumes produites.

1) REVUE DE LITTÉRATURE

a) Introduction générale sur le pin maritime

i) Éléments botaniques, Aire de répartition

Le pin maritime (*pinus pinaster*) est un gymnosperme appartenant au genre *Pinus*, de la famille des Pinacées.

C'est un résineux à feuilles en aiguilles très longues, groupées en faisceaux par 2. Le pin maritime est une espèce monoïque et allogame quasi-stricte (Rameau et al. 1994). D'une manière générale, les inflorescences femelles sont positionnées dans la partie supérieure de l'arbre sur les rameaux principaux des 3 ou 4 derniers verticilles. Les chatons mâles sont au contraire situés dans la partie inférieure du houppier. Dans la plupart des cas, un rameau ne porte qu'une catégorie d'inflorescence.

Le pin maritime est caractérisé par une aire de répartition naturelle très fragmentée sur tout le pourtour occidental du bassin méditerranéen (Pastuszka et al. 2002). Cette aire est très variée quant aux conditions de sols et de climat. Les principales provenances reconnues sont :

- En France : le sud-ouest, le sud-est et la Corse,
- En Espagne : la Galice, les Asturies, la Castille, les sierras d'Aragon et d'Andalousie,
- Au Portugal : du nord jusqu'au sud de Lisbonne,
- Au Maroc : dans le Rif occidental et oriental, dans le moyen et haut Atlas,
- En Algérie : côte de Kabylie,
- En Tunisie : région de Tabarka,
- En Italie : la Ligurie, la Toscane et la Sardaigne.

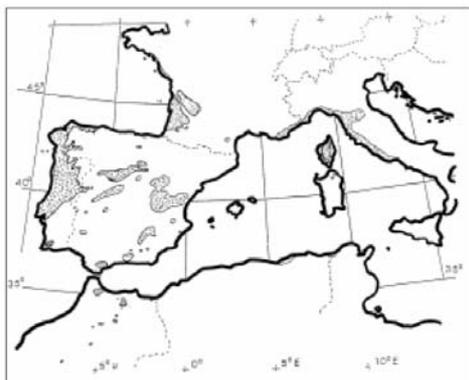


Figure 1 : Aire de répartition naturelle du pin maritime d'après Baradat & Marpeau (1988)

Des reboisements ont été conduits dans l'hémisphère sud hors de son aire naturelle. Les surfaces les plus importantes sont situées au Chili (100 000 Ha), en Australie (50 000 Ha) et en Afrique du Sud (40 000 Ha). Des surfaces non négligeables, mais inférieures à 10 000 Ha, sont présentes en Australie, Nouvelle Zélande et Argentine. C'est plus sa grande plasticité en termes de conditions de reboisement qu'un intérêt économique qui est à l'origine de cette expansion.

Le pin maritime au niveau mondial couvre environ une surface de 4,4 millions d'Ha ce qui représente 1/1000^{ème} de la forêt mondiale (Rauscent 1999).

L'Aquitaine est la première région forestière française avec un taux de boisement de 44 %, contre 28 % au niveau national. La forêt d'Aquitaine dédiée à la production de bois couvrait 1,77 millions d'hectares en 2008, dont 830 000 Ha de pin maritime (IFN 2008). Il devance le chêne pédonculé, deuxième essence de la région devant le châtaignier, le chêne pubescent et le hêtre. Cette superficie est détenue à 94% par des propriétaires privés et un aquitain sur dix est propriétaire forestier. La propriété est très émietlée : 250 000 détenteurs possèdent moins de 10 hectares et seuls 33 000, plus de 10 Ha.

Sur les 10 dernières années, ce massif a subi des dégâts consécutifs au passage de deux tempêtes exceptionnelles, d'abord Lothar et Martin en 1999 puis Klaus en 2009. Les dégâts en forêt consécutifs au passage de ces cyclones sont considérables. Selon les données de l'Inventaire Forestier National, le massif des Landes de Gascogne a été amputé en 2009 de :

- 203 000 hectares de pin maritime détruits à plus de 40%,
- 41 millions m³ de bois au total dont 37 millions m³ de pin maritime (24% du volume sur pied avant tempête - environ 5 années de récolte en Aquitaine) qui s'ajoutent aux 24 millions m³ de pin maritime abattus en décembre 1999.

Le bilan global du passage successif de Martin (1999) et Klaus (2009) sur le massif des Landes de Gascogne est donc considérable. Ainsi le volume sur pied est passé de 139,7 millions de m³ avant Martin à 115,9 Mm³ après Martin pour atteindre 74,8 Mm³ après Klaus. La ressource disponible en pin maritime aura été divisée par 2 en l'espace de 10 ans.

Concernant la ressource forestière, une caractéristique essentielle du massif est sa production annuelle brute, à savoir la quantité de bois produite annuellement par la forêt du fait de la croissance biologique des arbres. La production annuelle brute avant la tempête Martin était en 1999 de 9,5 Mm³, puis pour l'année 2007, d'environ 8 Mm³ sur environ 830 000 Ha.

Suite à la tempête Klaus, cette production annuelle brute se situera d'après l'IFN pour les années 2009 et 2010 autour de 6 Mm³.

	1999	2007 (après tempête Martin)	2009 (après tempête Klaus)
Bois d'œuvre	6	5,1	3,6
Bois d'industrie	3,5	3,1	2,4
Total	9,5	8,2	6,0

Figure 2 : Potentiel de production annuelle du massif de pin maritime en Aquitaine en millions de m³ d'après IFN

Les données de prélèvements de bois sont évaluées par le Service de la Forêt et du Bois à partir d'enquêtes annuelles de branche (EAB). Ces enquêtes sont basées sur la déclaration par les industries de transformation du bois de leur consommation annuelle. Il n'est cependant pas possible de considérer que les volumes déclarés à l'EAB correspondent aux volumes prélevés car de nombreux facteurs ne sont pas pris en considération : pertes lors de l'exploitation des arbres, problèmes de conversion entre les tonnages mesurés en entrée usine et les volumes de bois mesurés sur coupe,... Les volumes déclarés dans les EAB sont donc sous-estimés, de l'ordre de 30% d'après les professionnels du massif. Entre 1999 et 2006 les EAB donnaient une consommation annuelle moyenne de 8,4 Mm³ soit des prélèvements en moyenne supérieurs à 10 Mm³ (Perillat & Muller 2009). Le massif a donc été surexploité au cours des dix années précédant la tempête.

D'après une étude du groupement d'intérêt public sur les écosystèmes forestiers (GIP ECOFOR) les scénarios d'exploitation du massif devront être ajustés pour pouvoir répondre aux objectifs majeurs de reconstitution du massif et de réponse à la demande industrielle avec des bois locaux (ECOFOR 2010).

Les objectifs de cette thèse rentrent dans le cadre de l'aide à la reconstitution. La quantification de l'impact des scénarios sylvicoles sur la qualité des bois permettra aux professionnels d'orienter les modalités de la reconstitution.

ii) Historique de l'introduction

La présence du pin maritime en Aquitaine est ancienne. Elle a pu être prouvée par la présence de pins fossiles dans des bancs de lignite et par des témoignages historiques (exploitation en particulier de la poix par les romains).

Cette forêt régresse par la suite, en particulier à cause du développement des écobuages pour le pastoralisme, pour atteindre au 18^{ème} siècle une surface ne dépassant pas 100 000 Ha (Chaperon 1986). Ce pastoralisme était alors viable : le système agro-pastoral permettait de nourrir les familles en tirant un profit des terres de la lande, et il fut pratiqué jusqu'à l'implantation des pins.

A cette époque, la lande était un vaste marécage alors que le sable envahissait les zones du littoral. Des essais de fixation des dunes par le pin maritime à l'initiative entre autres de Brémontier (en 1786) marquent le début de la reconstitution de la forêt Landaise. La poursuite de la reconstitution par Chambrelent, puis par l'état sous le second empire, aboutit à la création de plus de 600 000 Ha de forêt entre 1850 et 1875. Cela signa l'expropriation et la disparition des populations agro-pastorales, qui se recyclèrent dans l'industrie du bois et du gemmage. Cette victoire de la forêt ne se fit pas sans mal, de nombreuses parcelles furent incendiées par les bergers (Dupuy 1996).

La forêt était alors entièrement tournée vers la production de l'or blanc ou gemme qui présentait l'essentiel des revenus. On extrayait deux principaux composants pour l'industrie chimique: l'essence de térébenthine (environ 20 %) et la colophane (environ 80 %). Le bois constituait alors un revenu marginal.

Vers 1930, la gemme est encore le grand produit de la forêt qui atteint 800 000 Ha, mais la recherche de nouveaux produits commence. Le bois est alors utilisé pour la fabrication de traverses et de poteaux de mine ou de lignes. En 1927 l'usine des papeteries de Gascogne de Mimizan produit ses premières tonnes de papier d'emballage (Kraft frictionné) et en 1928 les ateliers de Facture commencent leur première production de pâte de cellulose de type Kraft (Leonard 1999).

Cette forêt sera détruite pour moitié (300 000 Ha) par les grands incendies qui ont lieu après la seconde guerre mondiale. Sa reconstitution se fera par de la régénération naturelle puis par des reboisements artificiels, base de la ligniculture actuelle.

La concurrence des produits pétroliers ainsi que cette nouvelle sylviculture, orientée vers la production de bois, provoquera la disparition progressive du gemmage des pins au profit du développement rapide de l'industrie du bois et du papier (Sargos 1997).

iii) Sylviculture

La sylviculture est un terme global pour désigner la gestion de la forêt, non seulement pour produire du bois, mais aussi pour lui conserver le maximum de valeurs écologiques et pour offrir une gamme variée d'usages divers (Chaperon 1986).

Les pratiques sylvicoles du massif ont donc toujours été conditionnées par les produits que les sylviculteurs souhaitaient obtenir. La disparition progressive du gemmage, après la seconde guerre mondiale emporta, avec elle, les pratiques sylvicoles qui lui étaient liées : fortes densités d'arbre

initiales et faibles densités à la coupe rase, longues révolutions (plus de 60 ans) et élagage des branches basses pour permettre la récolte de résine.

Les sylviculteurs se sont alors tournés vers la production de bois matériau. En conséquence, les durées de révolution ont diminué, l'élagage n'a plus été une nécessité. Dans les années 1960 à 1970, une nouvelle sylviculture, dite « ligniculture », pour le massif aquitain est apparue. Signifiant littéralement culture de bois, l'usage l'a consacré à la culture intensive. A l'image de l'agriculture, elle recommande le drainage, la fertilisation phosphatée, le labour et le semis en ligne. L'ensemble de ces mesures a donné des résultats si spectaculaires en terme de croissance qu'en moins de 10 ans la majorité des sylviculteurs landais les adoptèrent (Thivolle-Cazat & Najjar 2001).

Le premier inventaire de l'Inventaire Forestier National de 1961-62 indiquait une production pour les futaies d'Aquitaine de 4,8 m³/ha/an, contre 9,8 m³/ha/an pour le troisième inventaire de 1999. La ligniculture permettrait une production d'environ 12 m³/ha/an en moyenne. Même si cette augmentation est due en partie à une modification de la structure des classes d'âge du massif sur cette période (augmentation de la surface des jeunes peuplements, à croissance plus rapide), l'impact de la ligniculture sur la croissance en volume est très positif (Loustau et al. 1999).

(1) La ligniculture, une technique de reboisement bien rodée

La préparation du sol avant le boisement est liée à la nature du sol, les travaux seront différents selon que la lande est humide, mésophile ou sèche. Elle comprend les opérations suivantes (Chaperon 1986) :

- l'assainissement : il constitue une opération pré requise au reboisement des landes humides; ces dernières représentant environ 40 % des surfaces régénérées. Ces travaux ont pour finalité d'améliorer l'installation des peuplements et d'augmenter la profondeur d'enracinement.
- le nettoyage de la parcelle : débroussaillage et dessouchage pour les parcelles reconstituées après coupe rase.
- la fertilisation initiale. Elle est à la base des gains de productivité du massif depuis sa généralisation lors des reboisements. Dans le massif landais, cette fertilisation se traduit essentiellement par des apports en phosphore lors de l'installation des peuplements (entre 80 à 120 unités de P₂O₅, acide phosphorique par Ha). En effet, les sols landais sont classés parmi les sols pauvres selon Bonneau (1995). La croissance du pin maritime sur ces sols est généralement limitée par la nutrition phosphatée (Ben Brahim 1996). P. Trichet et al. (2000), confirment l'effet bénéfique d'une fertilisation phosphatée apportée à l'installation d'un

peuplement de pin maritime sur des pins de 34 ans en lande humide, en observant un gain de volume de 20 % par rapport au témoin. Des études récentes cherchent à optimiser les quantités de phosphore apportées pour des raisons écologiques, économiques mais aussi qualitatives (la fertilisation augmente la fréquence des tares et des défauts de forme et de branchaison chez le pin maritime d'après Alazard (1981)). L'absence d'effet dose, entre 65, 95 et 125 kg d'acide phosphorique par hectare, sur la croissance d'un peuplement âgé de cinq ans tend à montrer qu'une optimisation peut-être réalisée (P. Trichet et al. 2000). Sur lande sèche, la fertilisation phosphatée n'a que peu d'intérêt car son effet est à la fois trop faible et fugace, il peut même être parfois dépressif (AFOCEL 1994). L'eau serait le facteur limitant de la croissance plus qu'un déficit en phosphore (Loustau et al. 1999).

- le travail du sol. Il a des objectifs multiples. Il permet de mettre un sol dans les meilleures conditions pour une culture donnée notamment en :
 - o ameublissant la couche cultivée,
 - o formant un bon lit de semence ou de plantation,
 - o corrigeant la porosité du sol qui peut-être soit trop grande, soit insuffisante.

Dans le massif landais, le travail du sol consiste en un labour suivi d'une reprise au pulvérisateur à disques ou au rouleau débroussailleur. Pour la préparation du sol, les outils utilisés de manière standard sont des charrues agricoles classiques renforcées et adaptées au travail en forêt. Les charrues à socs fixes (mono ou bi-socs) se rencontrent couramment. Performantes sur les différents types de landes, elles assurent un bon enfouissement de la matière organique comme de la fertilisation et peut réaliser un travail en plein et en bandes (CAFSA 1997).

- Le semis ou plantation

La régénération artificielle du pin maritime fait appel à deux techniques traditionnelles utilisées en Aquitaine : le semis et la plantation.

Le semis, initialement réalisé manuellement à la volée et en plein, visait à compléter des régénérations naturelles insuffisantes ou incomplètes. Il était effectué, le plus souvent avec de la graine issue de la propriété. De même, les premières plantations, consistaient à transplanter des semis naturels de zones abondamment pourvues vers des secteurs très clairsemés, la réussite de ce type d'opération était assez aléatoire. Le développement de la mécanisation des travaux a entraîné une rationalisation des techniques, la notion de production de graines et de plants est alors apparue.

Bien que les quantités semées aient considérablement diminué avec, notamment, l'apparition de la ligniculture, il n'en demeure pas moins que la technique du semis est une grande consommatrice de graines. Le grand froid de 1985 a mis en évidence la sensibilité au froid des provenances de la

péninsule ibérique massivement introduites pour pallier le manque de graines d'origine locale nécessaires à la reconstitution des propriétés dévastées par les grands incendies des années après guerre. Ainsi, seules sont autorisées les récoltes sur des peuplements d'origine landaise certifiée par analyses.

Les graines améliorées, issues des vergers à graines, ont toujours, compte tenu de leur prix de vente, été destinées exclusivement aux pépinières pour la production de plants.

Ces vergers à graines, concrétisation du programme d'amélioration génétique du pin maritime initié à partir de 1955, ont été mis en place dès les années 1960 et sont entrés en production au début des années 80. Dans le même temps, la technique de plantation s'est développée pour utiliser au mieux ces nouvelles graines améliorées, les graines récoltées sur peuplements classés étant réservées pour le reboisement par semis direct (Crémère et al. 2002).

Les vergers de première génération installés entre 1962 et 1978 sont à la base des 80.000 hectares reboisés par plantation entre 1980 et 2000, pour un gain génétique attendu de 10 à 15 % sur le volume et sur la rectitude. Ils ne sont plus récoltés depuis 1999, les vergers de 2^{ème} génération arrivent en production (Alazard & Raffin 2002). Ces vergers permettent de doubler les gains génétiques obtenus sur les vergers de 1^{ère} génération.

Alors que les vergers de deuxième génération sont en pleine production une nouvelle génération de vergers (troisième génération) a été créée. Le Groupe Pin Maritime du Futur a ainsi défini deux nouvelles variétés :

- (1) une variété landaise (dénommée VF3) améliorée pour la croissance et la rectitude,
- (2) une variété Landes*Corse (LC2) permettant un niveau supplémentaire d'amélioration pour la forme des arbres.

Le gain génétique attendu pour ces variétés est d'environ 40 % (par rapport aux peuplements non améliorés) pour la croissance et la rectitude basale ce qui représente un important supplément de gain par rapport aux variétés précédentes. L'installation des vergers destinés à produire cette troisième génération a débuté en 2002 pour se poursuivre jusqu'à fin 2006 (Alazard & Raffin 2002; Merzeau et al. 2002).

(2) Rôle et rythme des éclaircies

Le rôle des éclaircies d'un peuplement est le suivant (Maugé 1977) :

- rôle sanitaire : le premier rôle de l'éclaircie consiste à enlever les arbres dont l'état sanitaire compromet l'avenir (attaques d'insectes, de champignon, bris,...),
- amélioration de la qualité du peuplement : on recherche aussi à éliminer les arbres dont le phénotype est défavorable à l'obtention de bois de qualité (arbres flexueux, présence de grosses branches, de fourches...),
- réduction de la concurrence : même si la concurrence est favorable pour la qualité de la branchaison (diminution du diamètre des branches), une trop forte concurrence crée une hétérogénéité du peuplement. Certains arbres dominés ne vont plus se développer au détriment d'arbres très vigoureux, mais de qualité médiocre,
- intérêt économique : les éclaircies constituent également des rentrées d'argent intermédiaires avant la coupe rase qui compose le principal apport de trésorerie pour le propriétaire.

La prise de décision de réalisation des éclaircies et de la coupe rase est aujourd'hui technico-économique (Chantre et al. 2003). Ainsi, durant la période 1985-1994, en raison de la faible rentabilité des premières éclaircies, leur nombre s'est réduit et parallèlement, le taux de prélèvement a augmenté pour atteindre 1 arbre sur 4 voire 1 sur 3. En ce qui concerne l'âge de déclenchement d'une éclaircie dans le massif landais, les gestionnaires se réfèrent à des tables de décision auxquelles est comparé l'inventaire du peuplement. Les itinéraires décrits par ces tables renvoient aux conditions stationnelles : landes mésophiles, humides ou sèches. Un exemple de règle de déclenchement des éclaircies est donné ci-dessous :

	Circonférence moyenne du peuplement avant éclaircie	STATION RICHE		STATION MOYENNE		STATION PAUVRE	
		Nombre de tiges/ha avant éclaircie	Nombre de tiges/ha après éclaircie	Nombre De tiges/ha avant éclaircie	Nombre De tiges/ha après éclaircie	Nombre de tiges/ha avant éclaircie	Nombre de tiges/ha après éclaircie
1ère éclaircie	45 cm	1200	770	1100	690	1000	620
2ème éclaircie	65 cm	770	460	690	430	620	390
3ème éclaircie	85 cm	460	300	430	270	390	250

Figure 3 : Récapitulatif des tables de décision de déclenchement des éclaircies en ligniculture (Copeaux 2003)

Vues au travers des données de l'inventaire forestier, les pratiques d'éclaircie et de coupe rase dans le pin maritime sont un peu plus complexes et variées que ces quelques règles énoncées sur le nombre et

la fréquence des éclaircies et sur les grosseurs à atteindre pour le déclenchement des coupes finales (Najar 2008) :

- de nombreux peuplements sont à des densités très faibles, vraisemblablement le résultat d'un échec du reboisement ou d'une absence de gestion,
- pour les autres, la fréquence des éclaircies est bien supérieure à cinq ans même lorsque le niveau de concurrence entre arbres est important,
- des coupes rases sont pratiquées alors que le volume unitaire moyen des pins est faible. On peut avancer deux explications à cela : des changements dans l'usage du sol de plus en plus perceptibles dans le Massif des Landes de Gascogne et d'autre part, l'anticipation pour remplacer des peuplements peu productifs par une nouvelle génération plus prometteuse.

iv) L'industrie du pin maritime en Aquitaine

La filière forêt-bois-papier en Aquitaine, en prenant en compte les emplois des activités de distribution des produits, de la recherche et de la formation, emploie environ 34 000 personnes pour un chiffre d'affaire de 2,6 milliards d'Euros. Les activités de formation et de recherche et les organismes professionnels emploient environ un millier de personnes. Hormis les industries lourdes du papier et du panneau, les entreprises sont souvent de très petites unités situées en zones rurales (Cabadie et al. 2006).

Le secteur des industries du bois et du papier aquitain a perdu un emploi sur quatre ces seize dernières années (Dumartin 2009).

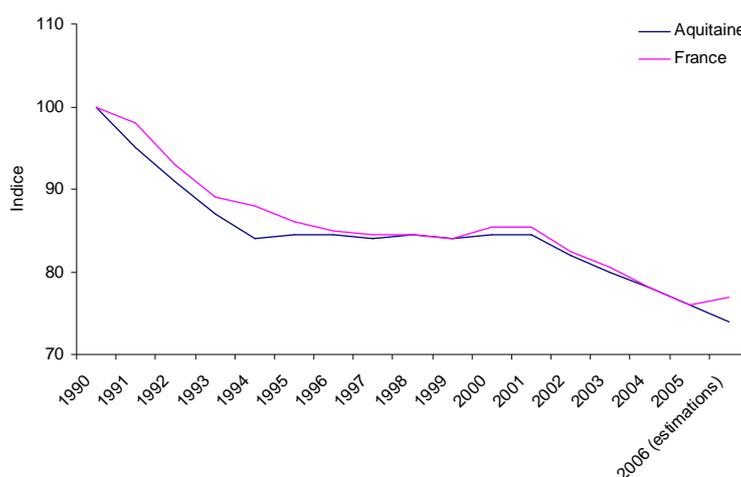


Figure 4 : Evolution de l'emploi salarié dans les industries du bois et du papier de 1990 à 2006, base 100 en 1990 d'après Dumartin (2009)

v) Produits, état des lieux et perspectives d'évolution des marchés

(1) Secteur du bois d'œuvre

La capacité de production de sciages de pin maritime en Aquitaine a augmenté régulièrement depuis les années 1990 pour atteindre 1,8 Mm³ au début des années 2000. L'emballage avec l'essor de la palette au début des années 1990 est le principal moteur de l'augmentation de cette capacité de production de l'industrie du sciage (plus de 55% de la production de sciage en 2005). Cette industrie a développé des produits en adéquation avec les marchés et fortement augmenté sa productivité. En revanche, l'utilisation des sciages de pin maritime en charpente reste marginale avec une utilisation inférieure à 5% du volume produit. Pour les usages structuraux, d'autres essences sont plus compétitives (principalement l'épicéa en provenance du nord de l'Europe). La part de sciage à destination du parquet lambris est globalement, stable autour de 30% du volume produit (Figure 5).

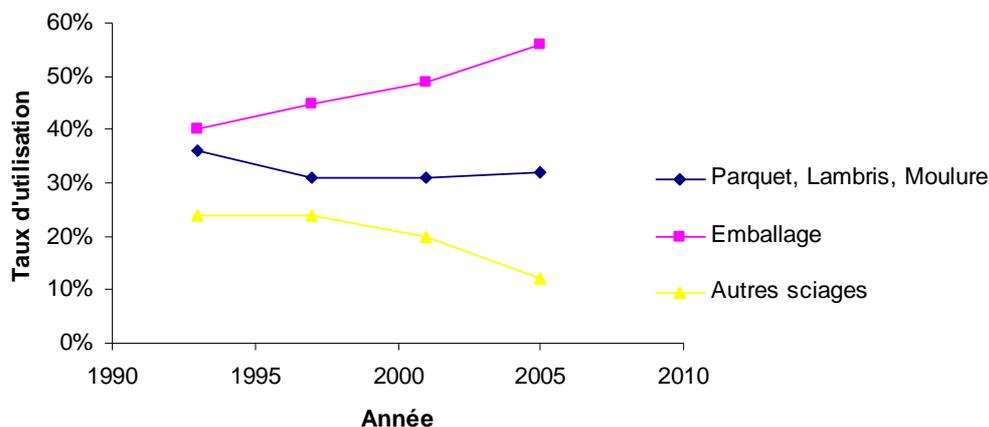


Figure 5 : Evolution de la destination des sciages de pin maritime produits en Aquitaine (d'après données EAB / DRAAF)

De 2000 à 2001 suite à la tempête Martin de décembre 1999, l'industrie du sciage a fonctionné au maximum de ses capacités mais en produisant principalement des bois de qualité palettes du fait de la dégradation précoce des bois renversés par la tempête. Depuis 2002, la crise d'après tempête touche le secteur. La production de sciage a fortement diminué pour atteindre 1,4 M m³. Cette chute est liée à la concurrence sur les marchés traditionnels du pin maritime (traverse, caisse, lambris). La légère reprise en 2007 ne se confirmera pas, l'activité du sciage en 2008 accusant une baisse d'activité de 30% par rapport à 2007. Les difficultés d'approvisionnement que vont rencontrer les scieries suite à la tempête de 2009 font craindre une nouvelle disparition des petites scieries (de moins de 20 000 m³ de sciages produits par an) comme cela avait eu lieu après la tempête de décembre 1999, avec une chute du nombre d'établissements de 300 en 1993 à moins de 200 en 2007 (ECOFOR 2010).

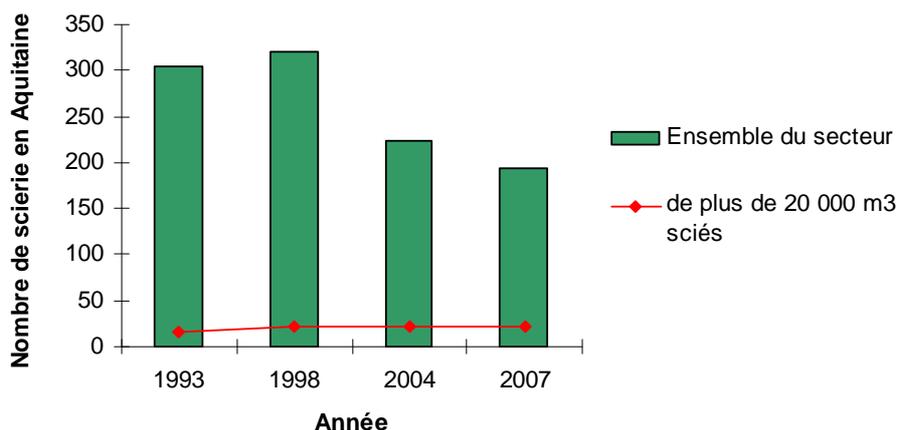


Figure 6 : Evolution du nombre de scieries en Aquitaine entre 1993 et 2007 (d'après données EAB / DRAAF)

L'industrie du déroulage de pin maritime en Aquitaine ne comprenait qu'une unité jusqu'en 2007 dont la production en 2007 était de 80 000 m³. Depuis 3 nouveaux opérateurs ont installé de nouvelles unités en Aquitaine, une en 2007, une en 2009 et une en 2010 (Thébault, XiloFrance et Garnica France). Ces unités tournées en partie vers le déroulage du peuplier, devraient néanmoins participer à l'augmentation des capacités de production sur des marchés de la construction de maisons à ossature bois.

Les analyses d'évolution des marchés des sciages de pin maritime prévoient une augmentation régulière des sciages à destination de la palette en fonction de la croissance générale de l'économie, une stabilisation des usages en lambris/parquet et une augmentation des sciages en construction. L'utilisation du pin maritime dans des usages d'isolation par l'extérieur mais aussi dans des usages structuraux dans des logements à ossature bois constitue un enjeu important. Les capacités de production de sciages de pin maritime en Aquitaine sont ainsi estimées en 2015 à 1,4 Mm³ (Duvergé 2009).

(2) Secteur du bois d'industrie

Le secteur du bois d'industrie est très développé en Aquitaine avec 3 papeteries (Smurfit Kappa Cellulose du Pin, Gascogne Paper et Tembec) et 5 usines de panneaux de process.

D'après la Fédération des Industries du Bois en Aquitaine, la consommation de bois par les industries de la pâte et du panneau était en 2001 de 3,7 Mm³ et a atteint en 2008, 4 Mm³. Elle atteindra en 2010, compte tenu des développements industriels 4,5 Mm³ (FIBA 2009). Cette consommation de bois se répartit entre les produits connexes de scierie (plaquettes, chutes, délignures) pour 35% et les billons (rondins de petits diamètres, ou billons de sciage déclassés) pour 65%.

Parallèlement des projets d'utilisation du bois pour un usage énergétique apparaissent en Aquitaine. A côté d'utilisations déjà existantes (chaudière industrielle), de nouveaux projets apparaissent (chaufferie collective, agro carburants, granulés bois,...).

La demande en bois énergie en 2015 est comprise suivant différents scénarios de développement entre 1 et 2 millions de tonnes par an (ECOFOR 2010).

Ainsi si l'on considère qu'en 2015 la production annuelle du massif sera de 6 Mm³ dont 2,4 millions pour le bois d'industrie, le déficit en bois d'industrie sur le massif Aquitain pourrait être compris entre 2,3 et 3,5 Mm³. Ce déficit ne pourra être comblé que par la mise en place de mesures multiples : adaptation de la gestion forestière en anticipant la coupe rase de bois anciens de fort volume unitaire et en diminuant les durées de rotation, limitation de l'export des chablis, importation de bois,...

Suite aux deux tempêtes qui ont touché le massif Aquitain, l'offre potentielle en bois est donc considérablement diminuée. La demande est potentiellement toujours élevée avec une augmentation du bois énergie mais aussi des perspectives prometteuses sur le bois d'œuvre avec la présence de nouvelles usines de déroulage et un secteur du bois construction en plein développement. La connaissance réelle de la qualité de la matière produite est donc en enjeu essentiel pour ce massif.

b) Qualité du bois

i) Définition

La qualité d'un produit est une notion qui ne peut pas être définie dans l'absolu. On peut utiliser la définition donnée par Jozsa & Middleton (1994) : la qualité du bois est son aptitude à être utilisé pour un usage précis. La qualité d'un produit doit ainsi être définie par son utilisation finale (Hébert et al. 2002). Une faible masse volumique peut par exemple être requise pour des utilisations en isolation acoustique alors qu'inversement une forte masse volumique peut être exigée pour des utilisations en structure.

Les normes de management de la qualité (ISO 9000 :2005) nous fournissent aussi des définitions du terme qualité : adéquation à l'usage, conformité aux exigences du client...

Malheureusement, dans le secteur bois pour de nombreux acteurs la qualité est synonyme simplement pour eux de « bonne qualité » ce qui reste assez vague. De plus, la perception de la qualité du bois par le sylviculteur peut être totalement déconnectée de celle du transformateur qui peut être éloignée de celle de l'utilisateur final. Le dialogue entre les différents acteurs de la filière est donc primordial. Les normes de classement du bois (aspect oustructure), en garantissant des caractéristiques minimales connues de tous, sont un élément de réponse à cette perception différente de la qualité par les multiples acteurs.

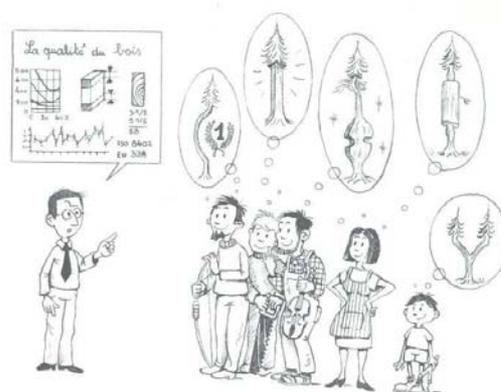


Figure 7 : Différentes perceptions de la notion de qualité (Hébert et al. 2002)

Chaque caractéristique du bois peut contribuer à lui donner des propriétés demandées par un usage particulier. Ainsi toutes les caractéristiques chimiques, physiques et anatomiques du bois peuvent être considérées comme des facteurs potentiels de qualité du bois (Alteyrac 2005). Les principaux facteurs influençant la qualité du bois sont ainsi :

- la proportion de bois juvénile,
- la masse volumique du bois,
- la proportion de duramen,
- les propriétés mécaniques,
- l'angle du fil,
- la présence de nœuds (section des branches incluses dans le bois),
- la présence de bois de compression (*NE*),
- le retrait (*NE*),
- la présence de poches de résine (*NE*),
- l'angle des micro-fibrilles dans la couche S2 (*NE*),
- la longueur des fibres et leur masse linéique (*NE*),
- le pourcentage de lignine et de cellulose, la quantité d'extraits (*NE*).

Les caractéristiques sur lesquelles l'étude s'est focalisée, sont celles liées aux usages en construction bois du matériau. Elles seront présentées dans la suite de l'étude.

Certaines caractéristiques importantes pour les usages en construction non pas pu être étudiées (notées *NE* ci-dessus). Il s'agit :

- de la présence de bois de compression. La formation du bois de compression traduit le fonctionnement de mécanismes complexes permettant aux arbres de conserver ou rétablir l'orientation verticale des troncs. Formé dans la partie comprimée des tiges, la composition

chimique, l'organisation structurelle et les propriétés physiques du bois de compression sont très différentes de celles du bois normal avec des teneurs en lignine, des retraits et un gonflement plus importants et des valeurs de propriétés mécaniques élastiques plus faibles (Keller 1994). Néanmoins son identification est assez difficile et la description de sa localisation dans l'arbre est complexe. Ces questions ont été étudiées dans un projet européen intitulé compression wood, sous la direction de la Forestry commission, de 2003 à 2004, (Gardiner 2005).

- du retrait (radial, tangentiel et longitudinal). Ces propriétés sont bien documentées pour le pin maritime, une nouvelle étude n'a donc pas paru nécessaire (Dumail et al. 1997; Riesco Muñoz et al. 2010; Pinto 2004),
- de la présence de poches de résine. Leur présence est très déclassante pour les usages où l'aspect visuel entre en compte. Elles n'ont pas été étudiées car leur formation peut être consécutive à la blessure des arbres, blessures non directement liées à la sylviculture,
- de l'angle des micro fibrilles. Il s'agit de l'angle des micro fibrilles de cellulose dans la couche S2 de la paroi des trachéides (cf. Figure 8). Cet angle a un impact important sur la résistance mécanique des sciages et sur leur stabilité dimensionnelle au séchage (Cave & Walker 1994). Cette caractéristique n'a pas été étudiée car le coût et la durée de la mesure étaient trop importants.

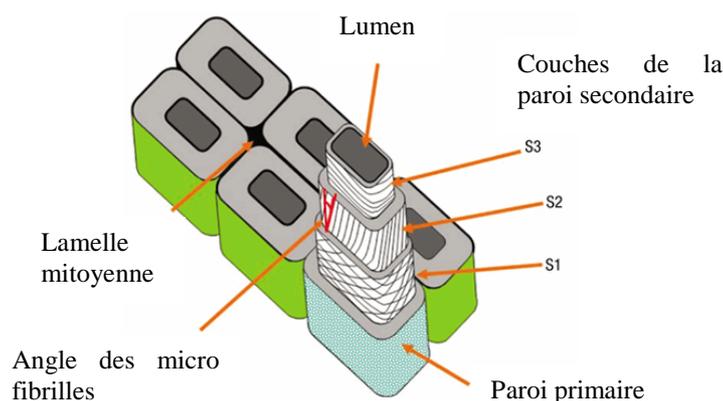


Figure 8 : Orientation des micro fibrilles dans la couche S2 de la paroi cellulaire d'après (Kretschmann 2003)

ii) Le bois juvénile

Les premiers cerne de bois formés par l'assise cambiale, près de la moelle, constituent le bois juvénile. On les distingue des cerne situés près de l'écorce qui constituent le bois adulte (Zobel & Van Buijtenen 1989). Ces cerne présentent des caractéristiques singulières par rapport aux cerne plus âgés (Polge 1964). Le bois juvénile se formerait dans le houppier vivant, tant qu'une branche avec des aiguilles vertes serait située à proximité. La production d'hormone par les méristèmes primaires affecterait le fonctionnement du cambium et expliquerait les propriétés différentes du bois juvénile (Lindström 1996).

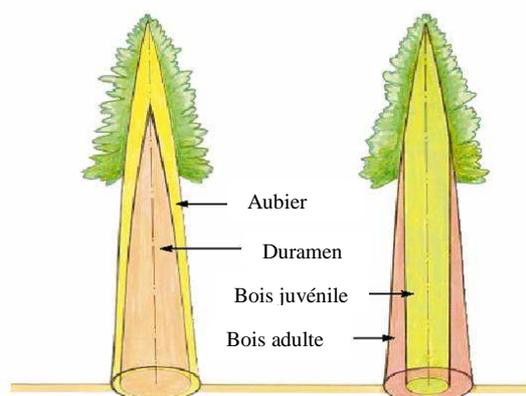


Figure 9 : Représentation schématique de la localisation du bois juvénile et du duramen dans l'arbre (d'après (Jozsa & Middleton 1997))

L'impact de l'effet de l'âge sur les propriétés est difficile à étudier. Il est souvent difficile de le décorréler de l'effet largeur de cerne. Les cerne proches de la moelle sont en effet le plus souvent très larges correspondant à la croissance rapide après l'installation d'un peuplement.

Néanmoins, le bois juvénile aurait une proportion de bois final et une densité moyenne plus faible, des trachéides plus courtes et un angle des micro-fibrilles dans la paroi S2 plus ouvert que le bois adulte. On constate ainsi un retrait plus important et des propriétés mécaniques plus faibles (Larson et al. 2001).

Définir une limite précise dans un arbre entre, d'une part le bois juvénile et d'autre part le bois adulte est assez délicat. Il n'existe pas de matériau bois juvénile à part entière, il s'agit d'une zone où les propriétés du bois sont très différentes de celles du bois adulte et où les variations radiales sont importantes. Deux définitions sont couramment admises, d'une part une limite bois juvénile / bois adulte et d'autre part une limite bois juvénile / bois de transition / bois adulte (Dumail 1996).

Pour caractériser cette transition, il faut analyser les variations radiales de propriétés peu sensibles à l'effet largeur de cerne, avec par exemple la longueur des fibres, l'angle des microfibrilles, la densité minimale du bois dans le cerne (Nepveu 1994).

Ainsi la modélisation du passage bois juvénile / bois adulte, pour le pin sylvestre, en considérant les variations radiales de la densité du bois final donne un âge moyen de passage de 21,77 ans (Mutz et al. 2004).

L'étude de cette transition a pour objectif de déterminer le volume de bois juvénile dans l'arbre et les paramètres qui déterminent ce processus. Le bois juvénile du fait de ses propriétés singulières étant peu désirable, on cherchera à privilégier les scénarios sylvicoles le minimisant.

iii) Paramètres étudiés et impact sur la qualité des bois

(1) Duramen

Le bois de la plupart des essences ligneuses est formé de deux zones physiologiquement différentes : l'aubier et le duramen. L'aubier formé par les cernes extérieurs est constitué de cellules partiellement « vivantes » et actives. La sève brute y circule et les matières nutritives s'y accumulent. Le duramen, partie intérieure plus ancienne est physiologiquement inactif du point de vue de la conduction de l'eau. Au fur et à mesure du vieillissement de l'arbre les cellules de parenchyme meurent et perdent leurs substances de réserve. Le bois s'imprègne progressivement de substances organiques complexes pour ainsi former le duramen. Le duramen se développe aussi bien chez les feuillus que chez les résineux, il peut être facilement identifiable de part un changement de coloration (pin maritime par exemple) ou difficilement détectable (épicéa). Les mécanismes qui régissent cette transformation ne sont pas totalement connus.

L'un des principaux rôles de l'aubier est la conduction de la sève brute, des racines au houppier. Une surface minimale est requise pour alimenter en eau le feuillage. L'aubier est aussi une réserve de cellules de parenchyme pouvant assurer une réponse défensive en cas de blessure (Boddy 1992), cellules consommant une quantité d'énergie importante, entre 5 et 13% de la photosynthèse nette annuelle (Ryan et al. 1995). La formation de duramen pourrait ainsi servir à réguler la conduction et on peut supposer qu'une surface d'aubier excédentaire, pouvant satisfaire une conduction supérieure à la demande foliaire, soit convertie en duramen pour diminuer la demande énergétique (Taylor et al. 2002). Cela est confirmé pour le pin maritime où de fortes corrélations ont été mises en évidence entre la surface d'aubier et la surface foliaire. La formation du duramen sert à maintenir une surface optimale d'aubier fonctionnel, ce qui est un paramètre important pour les essences soumises à des sécheresses régulières (Berthier et al. 2001).

Sur épicéa, des résultats similaires ont été obtenus. La surface de duramen est fortement corrélée à la somme des sections des branches vivantes et à la hauteur relative du houppier (Longuetaud et al. 2006).

D'après d'autres études après un temps d'initiation le duramen se formerait à une vitesse constante, la formation du duramen étant alors liée à l'âge cambial et aux facteurs influençant la vitesse de croissance (Pinto et al. 2004). Pour le pin sylvestre, la maturité de l'arbre, définie comme l'inverse de la vitesse d'accroissement radial serait un meilleur estimateur que l'âge de la proportion de duramen (Kärenlampi & Riekkinen 2002).

La surface de duramen est en général plus importante à la base de l'arbre et décroît avec la hauteur. Un profil conique de duramen à l'intérieur de l'arbre a été mesuré sur *Cryptomeria japonica* (Yang et al. 1994). Néanmoins cela n'est pas le cas pour le pin maritime où il est constaté une augmentation de la surface jusqu'à une hauteur comprise entre 3 et 6 m puis une diminution régulière (Pinto et al. 2004; Knapic & Pereira 2005). Une hypothèse pour expliquer cette variation serait que la conductivité est plus faible à la base de l'arbre, l'aubier serait ainsi plus large pour compenser cette diminution de conductivité (Zimmerman 1984). Ce profil de variation n'est pas spécifique aux pins, le bouleau à papier présente aussi une valeur maximale de duramen, à une hauteur relative de 9% (Giroud 2005). De même, l'étude des variations des proportions de duramen pour des peuplements équiennes de pin gris a montré que la proportion maximale du duramen est observée à une hauteur de 13% de la hauteur totale de l'arbre alors que la proportion minimale est observée à une hauteur de 68% de la hauteur totale de l'arbre (Bouafif 2005).

Pour le pin maritime, où la forme de la section du tronc est irrégulière, principalement elliptique suite à l'action du vent, le nombre de cernes duraminisés est plus important dans la zone comprimée (Stokes & Berthier 2000).

D'un point de vue technologique certaines propriétés du bois duraminisé sont différentes de celles de l'aubier. Pour beaucoup d'essences, la perméabilité du duramen est inférieure à celle de l'aubier. Cela implique une plus grande stabilité dimensionnelle mais aussi un moindre intérêt pour une utilisation en fabrication de pâte chimique ou une perméabilité importante aux liqueurs de cuisson est requise (Yang & Hazenberg 1991). Aussi, l'humidité de stabilisation pour des billons de pin maritime stockés plusieurs mois par immersion est en moyenne de 190% pour les cernes d'aubier extérieurs contre 60% pour les cernes intérieurs duraminisés (Castéra 2004).

Le duramen peut contenir des composés chimiques complexes lui conférant une résistance naturelle à la dégradation plus importante que celle de l'aubier. L'absence de substance de réserve (parenchyme) est aussi un facteur expliquant le plus faible taux d'attaques d'insectes (Taylor et al. 2002).

Les propriétés du bois varient radialement, en particulier la densité et les propriétés mécaniques. Ces variations sont liées à des différences de la structure du bois mais pas au fait que le bois soit duraminisé (Panshin & De Zeeuw 1980). Les propriétés mécaniques (module d'élasticité) du bois de pin maritime ne sont pas significativement différentes entre l'aubier et le duramen (Berthier et al. 2001).



Figure 10 : Pin maritime, Aspect du duramen sur disque et sur sciage

(2) Nodosité

Les nœuds, présents sur les sciages, sont la section des branches englobées progressivement dans le bois au cours de la croissance de l'arbre. La dimension, la fréquence et la nature des nœuds sont des paramètres de base intervenant dans le classement qualitatif des bois, même si le volume global des nœuds dans une grume ne représente pas plus de 1% (Timell 1986).

Les nœuds contribuent à la réduction de la résistance mécanique des pièces (Ivkovic et al. 2006) et ont naturellement un impact important sur l'aspect visuel des sciages. Aussi, le classement visuel d'aspect des sciages résineux est principalement basé sur la nature des nœuds, leur nombre et leur taille. La norme NF EN 1611-1/A1 Mars 2003, donne les critères pour le classement d'aspect des bois sciés de résineux

Dans cette étude, nous nous sommes limités à l'étude de la nature des nœuds, critère le plus discriminant pour l'aspect visuel, sans se préoccuper du diamètre des nœuds. L'influence du diamètre des nœuds est importante sur les propriétés mécaniques mais l'analyse fine de la nodosité n'entre pas dans le champ de cette étude.

Deux grands types de natures de nœuds sont distingués, les nœuds adhérents et ceux non adhérents.

A cours de la croissance d'un arbre, les branches meurent progressivement puis se décomposent et se détachent du tronc, il s'agit de l'élagage naturel. Dans le cas d'un élagage naturel trop lent (vigueur importante des branches vivantes), un élagage artificiel des branches devient nécessaire pour produire du bois sans nœuds.

Les branches vivantes lors de leur « incorporation » par l'arbre donneront des nœuds adhérents (ou verts) lors du débit. Les branches qui étaient mortes, donneront des nœuds sautants (ou noirs). Ces

nœuds peu adhérents au bois se détachent des planches lors du séchage ou du rabotage. Ils sont donc les plus pénalisants dans le classement des sciages.

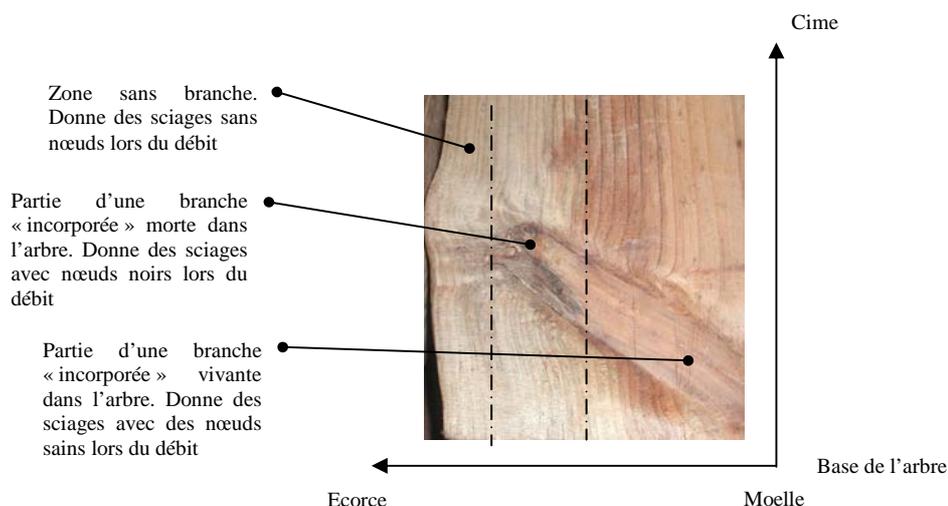


Figure 11 : Pin maritime - coupe transversale d'une branche incluse dans le bois

Pour visualiser les variations de nature des nœuds dans l'arbre, on représente schématiquement une coupe verticale de l'arbre dans la hauteur (Ikonen 2008). On note au centre de l'arbre la zone de nœuds sains (branches vivantes lors de leur incorporation), puis en progressant radialement la zone de nœuds non adhérents et enfin la zone sans nœuds consécutive à l'élagage naturel ou artificiel des branches.

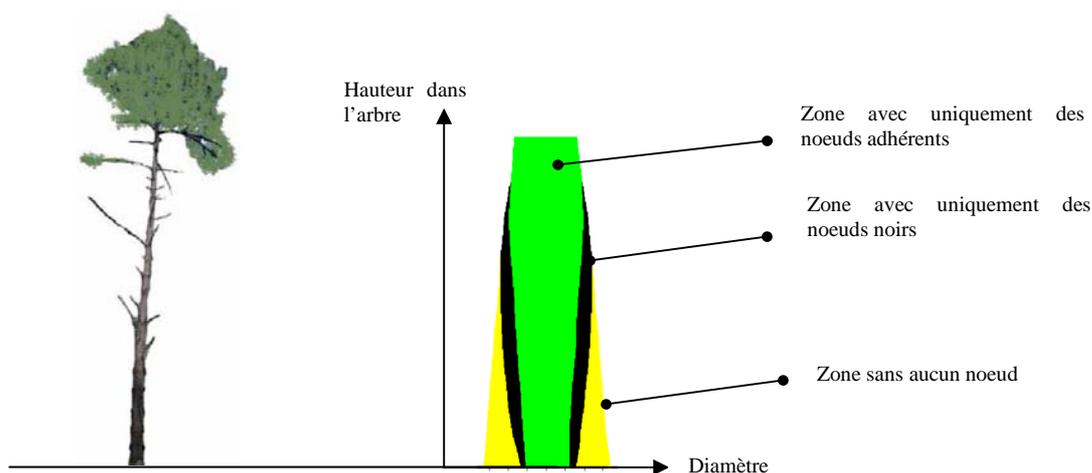


Figure 12 : Représentation schématique d'une coupe longitudinale d'un arbre, nature interne des nœuds (adapté d'Ikonen (2008))

L'objectif de l'analyse de la nature des nœuds intra arbre est de fournir des données pour les simulateurs de sciages des grumes, ouvrant ainsi la possibilité de simuler les propriétés des sciages en fonction de différents paramètres sylvicoles (Moberg 2001). Le développement récent des

tomographes à rayon X dédiés à des billons, permettant entre autre une mesure rapide de la nature des branches, peut nous faire espérer à terme une optimisation directement en scierie des débits des sciages en fonction de la nature des nœuds (Pinto et al. 2003). En laboratoire ces tomographes mesurent déjà de manière automatique la largeur des cernes, le taux de duramen, la position et le diamètre des nœuds (Longuetaud 2005).

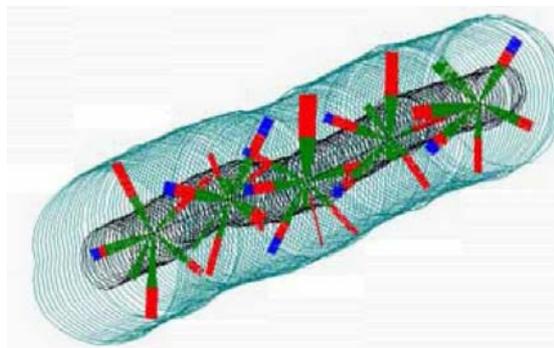


Figure 13 : Image 3D d'un billon de pin maritime reconstituée à partir d'images acquises avec un tomographe RX, montrant la structure interne des branches leur nature et la localisation du duramen (d'après Pinto (2004))

Le deuxième objectif de ces analyses est de rechercher des paramètres extérieurs de l'arbre (hauteur totale, hauteur de la première branche verte, longueur de houppier,...) permettant d'expliquer la description de la nature des nœuds intra-billon. On pourra ainsi orienter les acheteurs bois dans l'estimation qualitative des arbres sur pied avant exploitation. Des études menées sur pin sylvestre ont montré qu'une corrélation existait entre la fertilité de la parcelle et la proportion de nœuds verts dans l'arbre (Björklund 1994). C'est ce type d'approche que nous emploierons ici.

(3) Angle du fil

Le terme angle du fil est utilisé chez les résineux, pour désigner une orientation hélicoïdale des trachéïdes autour de la moelle de l'arbre, donnant ainsi un aspect vrillé au tronc de l'arbre, une fois l'écorce retirée.

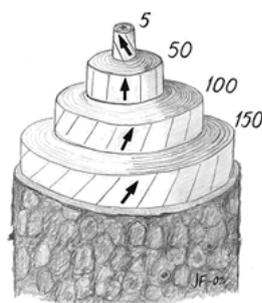


Figure 14 : Représentation schématique de l'angle du fil pour l'épicéa (d'après Säll (2002))

Les variations radiales de l'angle du fil ont été abondamment étudiées. Chez les résineux, l'angle du fil est en général plus important dans le bois juvénile, puis diminue et se stabilise dans le bois adulte.

Pour le pin radiata, l'angle du fil, orienté à gauche, est maximum près de la moelle, diminue rapidement puis se stabilise entre 10 et 15 ans (Roper et al. 2004).

Pour l'épicéa l'angle du fil diminue linéairement quand on s'écarte de la moelle (Gjerdrum et al. 2002). Pour le pin maritime, Keller et al. (1974) constatent une forte variabilité et un profil moyen où l'angle du fil est nul ou très faible dans la moelle, puis augmente à gauche dans un premier temps, passe par un maximum avant de décroître, pour finalement s'annuler puis augmenter progressivement à droite jusqu'à une valeur palier. L'annulation de l'angle et son changement de sens se produiraient entre 40 et 70 ans.

Pour les feuillus, en particulier pour le chêne sessile, l'angle du fil augmente de la moelle vers le cambium dans la plupart des cas. L'angle peut également changer d'orientation dans le bois, il peut également rester constant. L'angle du fil est indépendant de la largeur de cerne moyen, de l'âge et de la circonférence des arbres et du site (Guilley et al. 1999).

Les lois d'évolution de l'angle du fil du bois avec la hauteur semblent moins clairement établies. Plusieurs auteurs émettent l'opinion que l'angle du fil du bois augmente avec la hauteur, d'autres un point de vue inverse (Birot et al. 1979). Ainsi, on observerait la même évolution de l'angle du fil d'un cerne à l'autre, quelle que soit la hauteur d'observation dans l'arbre (Roper et al. 2004).

La vigueur de l'arbre (diamètre et accroissement cumulé de hauteur entre 5 et 9 ans), la densité et la rectitude n'ont pas d'influence sur les variations de l'angle du bois (Arbez et al. 1978). Le bois de compression n'aurait pas non plus d'influence (Radi & Castera 1992; Hansen & Roulund 1998).

D'un point de vue génétique, l'angle du fil du bois juvénile pour le pin radiata a une héritabilité de moyenne à haute (Sorensson et al. 1997). Pour l'épicéa, l'angle du fil du bois est sous contrôle génétique, ce qui permet d'envisager un programme de sélection permettant sa réduction et donc la diminution de la fréquence des sciages vrillés (Hallingbäck et al. 2008; Hannrup et al. 2002). Une sélection sur l'angle du fil a conduit à des prédictions de diminution de l'angle comprises entre 0,5 et 1 degré (Hansen & Roulund 1998).

Les causes de la formation de l'angle du fil ne sont pas parfaitement connues. Il pourrait s'agir d'une stratégie de l'arbre pour distribuer uniformément la sève dans le tronc. La position hélicoïdale des trachéides assurerait une distribution homogène de la sève même en cas d'assèchement d'une partie des racines (Kubler 1991). La formation de l'angle du fil serait aussi une résultante de l'action du vent sur le houppier. Sur le pin sylvestre une corrélation existe entre l'asymétrie du houppier et l'orientation des trachéides (Eklund & Harald Säll 2000). L'angle du fil permettrait aux arbres de mieux résister à l'action de torsion provoquée par le vent (Skatter & Kucera 1997). L'éthylène entre

dans le contrôle de la formation de l'angle du fil. Sur l'épicéa, l'augmentation de la production d'éthylène dans le tronc, provoque la formation d'un bois avec un angle du fil plus élevé (Eklund et al. 2003).

L'angle du fil a un impact très important sur la qualité des produits finis. L'angle du fil mesuré sur un avivé, par rapport à son axe, résulte de l'angle du fil initial du bois mais aussi du plan de sciage utilisé par le scieur. Néanmoins plus l'angle du fil est important sur billon plus il sera élevé sur les sciages.

Un angle du fil élevé peut causer des déformations importantes des sciages et une réduction des propriétés mécaniques (Arbez et al. 1978). La principale déformation est le gauchissement des sciages après séchage. Plus la valeur d'angle du fil est importante, plus le gauchissement après séchage sera important (Johansson & Kliger 2002). La valeur maximale de gauchissement d'un sciage pour qu'il puisse être utilisé dans un procédé de transformation, serait de 4 mm d'écart entre deux coins d'une même extrémité par portion de 100 mm d'épaisseur et 2 m de longueur. Il faudrait ainsi écarter systématiquement les sciages présentant un angle du fil supérieur ou égal à 6° (Tarvainen 2005). Sur l'épicéa, un modèle statistique permet de prédire à partir de la mesure de l'angle du fil sur le cerne extérieur du billon, la déformation des sciages après séchage (Ekevad 2005).

L'impact de l'angle du fil sur la résistance mécanique des sciages est discuté. Sur épicéa, d'après Desh & Dinwoodie (1996), cités par Macdonald & Hubert (2002), il entraînerait une diminution de la résistance à la flexion. Par contre d'après Kliger et al. (1995), l'impact serait mineur.

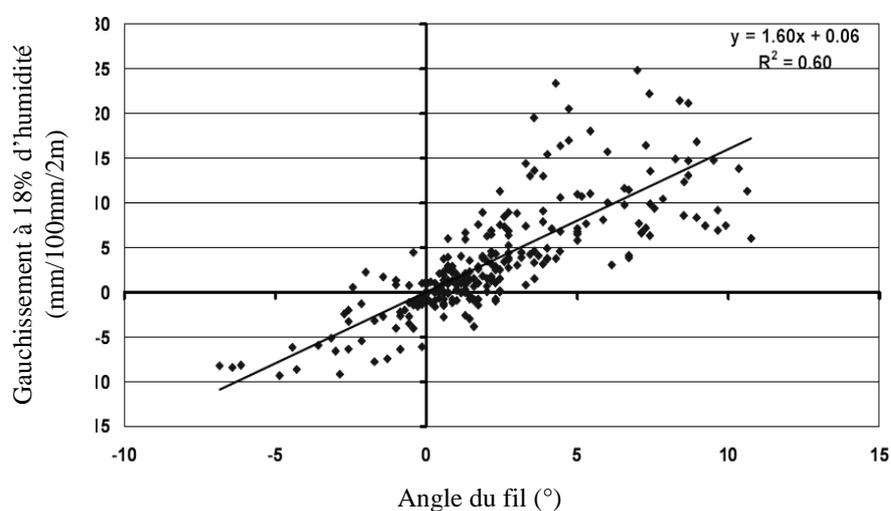


Figure 15 : Gauchissement des sciages en fonction de l'angle du fil mesuré sur le cerne externe des billons après écorçage (d'après Kliger & Johansson (2004))

En scierie, la mesure automatique de l'angle du fil sur le cerne externe du billon est maintenant possible. Ce système est basé sur l'analyse du halo de la projection d'un point laser sur le billon, le halo déviant en fonction de la pente du fil. Ce système est utilisé pour réaliser un tri des billons dans certaines scieries de Suède et pour ajuster le plan de débit à l'angle du fil, voire pour exclure du

procédé de sciage les billons avec un angle du fil trop élevé (Kliger & Johansson 2004; Nyström 2003). La tomographie à rayon X, peut mesurer aussi efficacement les variations d'angle du fil cerne à cerne de manière non destructive (Sepúlveda 2001).

(4) Densité intra cerne

La masse volumique du bois (rapport entre la masse d'un échantillon et son volume à une teneur en eau de 12%), est une caractéristique déterminante car elle conditionne de nombreuses propriétés du matériau bois, notamment ses propriétés mécaniques (Nepveu 1994). Au niveau intra-cerne, elle peut être un moyen de mesure de la transition du bois juvénile au bois adulte (Sauter et al. 1999).

L'étude de la masse volumique peut se faire à différentes échelles ce qui entraîne une grande variabilité de sa mesure (Alteyrac 2005). Au niveau du billon, les mesures réalisées sont des moyennes du bois juvénile, du bois mature et des nœuds présents. Au niveau planche, la mesure regroupe plusieurs cernes eux mêmes constitués de bois final et initial. Finalement à un niveau microscopique la mesure réalisée est celle de la densité de la paroi des trachéides qui est de 1,53.

Le niveau le plus fin pour mesurer les variations de masse volumique est le niveau intra-cerne. Les variations à petite échelle sont liées aux caractéristiques anatomiques du bois. On distingue à l'intérieur du cerne le bois initial ou bois de printemps formé au début de la saison de végétation du bois final (ou bois d'été). L'étude de ces variations a été rendue possible par le développement de la mesure de la densité sur des clichés aux rayons X (Polge 1966).

Les densités maximales et minimales du bois intra-cerne, le type de transition entre ces deux zones (graduelle ou abrupte) et la proportion de bois final sont des paramètres qui influent sur la qualité des bois (Kennedy 1995).

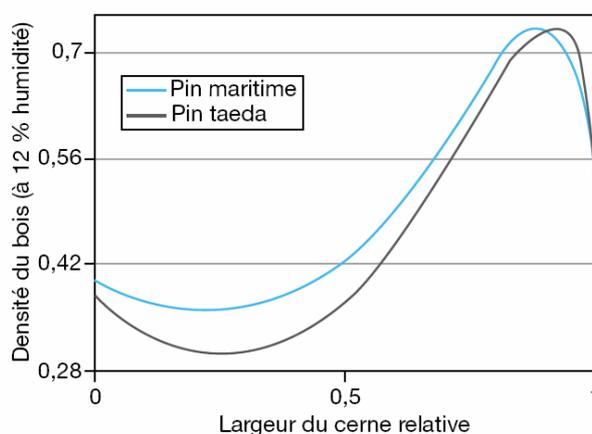


Figure 16 : Exemple de variation de la densité intra-cerne pour pin maritime et pin taeda d'après Doirat et al. (2003)

La densité intra cerne varie en fonction de nombreux paramètres. Les variations radiales et celles en fonction de la hauteur sont influencées par l'âge du cerne observé et par la juvénilité du bois (Deresse & Shepard 1998). Chez les conifères, de la moelle vers l'écorce, la densité du bois final augmente et la densité du bois initial est stable voire diminue. Dumail et al. (1998), observent pour des pins maritimes de 20 ans, une augmentation de la densité de 18,7% du cœur vers l'écorce. La présence de bois de réaction provoque une augmentation locale de la densité. L'effet hauteur dans l'arbre ne semble pas important (Panshin & De Zeeuw 1980; Nepveu 1994).

La densité intra-cerne, est aussi sous l'influence des conditions climatiques. (Vieira et al. 2008) ont étudiés les variations de densité intra cerne pour du pin maritime et ont constaté une influence des conditions climatiques (précipitations automnales, durée d'ensoleillement). Le densité du bois initial des arbres jeunes étant plus sensible aux conditions climatiques, contrairement aux arbres plus âgés ou ces paramètres ont plus d'influence sur le bois final.

(5) Propriétés mécaniques (MOE, MOR)

Dans de nombreuses utilisations, le bois est mécaniquement sollicité (charpente, ossature, menuiserie,...). Ces sollicitations mécaniques sont nommées différemment suivant leur direction d'application : compression et traction pour des efforts à chaque extrémité de la pièce (poteau en compression par exemple), flexion (courbure du matériau) et cisaillement (glissement d'une section du matériau sous l'effet d'efforts tranchants).

Parmi les nombreuses caractéristiques des propriétés mécaniques d'un matériau, les modules d'élasticité (MOE) et de rupture (MOR) en flexion sont les plus utilisés pour déterminer la qualité mécanique d'un bois. Ils correspondent aux exigences des normes d'utilisation des bois en structure en particulier à l'EN338 : conception et calcul des structures en bois (AFNOR 2010), qui ne requiert que le MOE, le MOR en flexion ainsi que la masse volumique pour définir toutes les autres caractéristiques mécaniques nécessaires au calcul de structure du matériau bois.

Les variations intra-arbre de ces caractéristiques mécaniques ont été grandement étudiées. Le bois juvénile influe fortement sur ces propriétés. D'une manière générale le MOE et le MOR augmentent quand on s'éloigne de la moelle et diminuent avec la hauteur (Lundstrom et al. 2007). Pour des pins maritimes de 50 ans, le MOE augmente de 99% quand la distance de la moelle augmente de 10 à 90% (Machado & Cruz 2005). Pour le mélèze d'Europe, le bois juvénile présente un MOE inférieur de 20% et un MOR de 18% par rapport au bois adulte (Charron et al. 2007). A l'intérieur du bois juvénile les variations radiales sont aussi marquées. Pour le pin radiata, le MOE et le MOR sont inférieurs de 50% pour les cernes 1 à 2 par rapport aux cernes 3 à 6 (Ivković et al. 2008).

c) Impact de la sylviculture intensive sur la qualité des bois

L'impact de la sylviculture sur la qualité des bois produits est un sujet très vaste, depuis longtemps analysé mais qui reste complexe et non totalement maîtrisé aujourd'hui.

Le constat initial le plus juste pouvant être fait est que tout ce qui modifie les conditions de croissance ou la forme d'un arbre peut modifier les propriétés du bois (Zobel & Van Buijtenen 1989). Toute la difficulté de l'analyse est dans le « peut », parfois les propriétés sont affectées par les pratiques sylvicoles, parfois elles ne le sont pas (Blair & J. Olson 1984).

Les principales opérations sylvicoles impactant les propriétés du bois sont la densité initiale de reboisement (nombre d'arbre par Ha), les durées de rotation, les différents régimes d'éclaircies, le mode de préparation du sol, la fertilisation et l'élagage. Le tableau ci-dessous regroupe les effets possibles de pratiques sylvicoles intensives pour les résineux (Macdonald & Hubert 2002).

Intervention Sylvicole	Effet sur la qualité du bois
Durée de rotation	La réduction des durées de rotation provoque : - l'augmentation de la proportion de bois juvénile donc une réduction des propriétés mécaniques et de la stabilité au séchage
Densité initiale à la plantation	Une densité initiale plus faible provoque : - l'augmentation de la largeur des cernes du bois juvénile et donc augmentation de sa proportion - des branches plus vigoureuses donc des nœuds plus gros - une exposition au vent plus importante donc une augmentation du bois de compression et probablement des défauts de forme du tronc - l'augmentation de l'angle du fil donc des déformations des sciages
Eclaircies	Les premières éclaircies (avant la fermeture du couvert forestier) provoquent : - les mêmes effets qu'une densité de reboisement initiale faible, plus de bois juvénile et des branches plus grosses Les éclaircies suivantes (après la fermeture du houppier) : - participent à l'augmentation de la rectitude et de la qualité de la branchaison du peuplement
Elagage	La réalisation d'un élagage provoque : - une augmentation de la proportion de bois sans nœud - une accélération de la transition du bois juvénile au bois adulte
Fertilisation	L'apport d'une fertilisation provoque : - une augmentation de la croissance pouvant provoquer une baisse de la densité du bois - une croissance irrégulière pouvant provoquer des déformations au sciage - des problèmes de stabilité liée à l'augmentation de la biomasse foliaire
Préparation du sol	Le labour du sol provoque : - une augmentation et une homogénéisation de la croissance

Figure 17 : Effets de différentes opérations sylvicoles sur la qualité des bois, d'après Macdonald & Hubert (2002)

L'augmentation de la vitesse de croissance des peuplements, consécutive aux opérations sylvicoles, a un impact très variable sur les propriétés du bois.

S.Y. Zhang (1995), a étudié l'impact de la vitesse de croissance sur la densité et les propriétés mécaniques pour 4 catégories d'essences : les résineux avec une transition graduelle du bois initial au bois final (sapin, épicéa), les résineux avec une transition abrupte (mélèze et pins), les feuillus avec des pores diffus (bouleau, peuplier) et les feuillus à zone initiale poreuse (chêne). Chez les résineux à transition graduelle, les propriétés mécaniques du bois diminuent fortement avec l'augmentation de la vitesse de croissance contrairement aux résineux à transition abrupte où l'influence est faible.

Pour Seco & Barra (1996), les variations de la densité du bois, du MOE et du MOR sont mal expliquées par la vitesse de croissance. Pour la plupart des essences, à l'exception du peuplier l'utilisation de la densité du bois à la place de la vitesse de croissance conduit à une meilleure prédiction des propriétés mécaniques des bois.

d) Modélisation de la qualité du bois en fonction de la sylviculture

i) La modélisation en forêt, pourquoi modéliser ?

Un modèle se définit comme « ce qui sert d'objet d'imitation pour faire ou reproduire quelque chose » (Robert 2009). Un modèle est donc une forme de représentation de la réalité et dans les sciences qui traitent de la vie comme de la biologie, c'est une forme imparfaite et limitée par notre degré actuel de connaissance (Raulier et al. 1997).

Deux grands types d'objectifs de la modélisation de la qualité du bois peuvent être distingués (Nepveu 1995) :

- La ressource actuelle: il s'agit d'estimer la qualité d'un peuplement existant. Seules des données de l'état présent du peuplement sont disponibles, certaines peuvent refléter ses conditions de croissance passées mais son historique n'est pas connu. Connaissant le peuplement, ses variables dendrométriques et descriptives, quelle est la qualité du bois et quelle sera la qualité des produits obtenus de ce peuplement ?
- Les ressources futures : il s'agit d'estimer l'évolution de la qualité d'un peuplement en fonction du scénario sylvicole appliqué. Le but est d'orienter le gestionnaire forestier soit dans le choix de la sylviculture lors de l'installation d'un peuplement, soit dans la conduite d'un peuplement déjà en place.

Quatre grandes étapes générales peuvent être considérées pour conduire cette modélisation :

- (1) établissement d'ajustements arbre par arbre ou au niveau d'une population d'arbres donnant les variations des paramètres de qualité étudiés,
- (2) Etude de la variabilité des paramètres : effet « arbre », effet « placette »,...
- (3) Simulation de l'effet de l'application de scénarios sylvicoles sur la distribution des propriétés étudiées dans l'arbre,
- (4) Simulation de la transformation industrielle de l'arbre simulé (sciage, séchage, déroulage,...) et intégration des données dans un logiciel. En France, depuis 1994, les modélisateurs forestiers ont construit un logiciel commun – une plate-forme – dédié à la simulation de la dynamique forestière. La plateforme Capsis permet d'accéder à un grand nombre de modèles pour de nombreuses espèces et dans des situations variées (Meredieu et al. 2009).

Un groupe de travail de l'International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), traite depuis 1994 des liens entre la ressource forestière et la qualité du bois. Le dernier colloque de ce groupe travail, qui s'est tenu en 2008 en Finlande regroupait 3 sessions : l'impact des pratiques sylvicoles sur la croissance et les propriétés du bois et des fibres, les relations entre les propriétés de la ressource et la qualité, les performances et la valeur des produits finis et enfin l'aide à la gestion et l'utilisation de la ressource forestière grâce à des simulations informatiques, confirmant ainsi la pertinence actuelle des principes énoncés ci-dessus.

Au cours de ce colloque 4 grands thèmes d'études nécessaires dans le futur ont été identifiés (Leban & Peltola 2009) :

- mieux comprendre la dynamique de formation du bois afin d'incorporer les bonnes variables d'environnement dans les modèles de croissance et de qualité du bois,
- construire des modèles robustes et étudier la propagation des erreurs lors de l'utilisation de modèles emboîtés,
- gérer les quantités très importantes de données générées par les nouveaux outils d'analyse du matériau bois, en particulier les scanners à RX,
- Incorporer dans la modélisation des propriétés la valeur écologique des différents produits bois.

ii) Exemples de modèles développés sur résineux

De nombreux modèles de propriétés du bois ont été construits. La revue ci-dessous n'est nullement exhaustive, sa seule utilité est de présenter rapidement les variables pertinentes utilisées pour différents résineux.

Sur le pin sylvestre, Ikonen (2008) a développé une série de modèles permettant de simuler l'impact de la sylviculture sur le rendement en sciage et les propriétés du bois scié. Des modèles de croissance des arbres et des modèles d'évolution du houppier (diamètre des branches, mortalité et élagage naturel) dépendant de la densité du peuplement ont été construits. Ils ont ensuite été reliés à un simulateur de sciage pour simuler la qualité visuelle (présence de nœuds) du bois scié. Ces modèles ont été complétés par des modèles de propriétés du bois à l'échelle du cerne : taux de bois de printemps, densité moyenne du cerne.

Liu et al. (2007) ont construit des modèles de prédiction du MOE et MOR pour le black spruce (*Picea mariana*). Les valeurs moyennes de MOE et de MOR d'avivés de 2,5 m de long, obtenus après sciage du billon de base des arbres, ont été modélisés avec des équations linéaires comprenant des caractéristiques parcelles et des propriétés du bois. Des équations avec seulement des paramètres de la parcelle ont aussi été développées.

Sur l'épicéa commun, la chaîne de production du bois a été décrite du plant à la planche par des modèles de croissance des arbres (croissance en hauteur et radiale, forme de la tige) et de propriétés du bois (Leban 1995). Ces modèles ont été adaptés à l'épicéa de sitka pour le Royaume Uni (Leban 2002). Un modèle de variation de l'angle du fil a aussi été établi (Houllier et al. 1994). L'effet arbre est important, l'effet hauteur quoique significatif n'intervient que modérément.

Sur le pin sylvestre et l'épicéa, Wilhelmsson, Arlinger, Spangberg et al. (2002) ont développé des modèles de prédiction des propriétés du bois basés sur le diamètre des arbres, le nombre de cernes mais aussi sur des paramètres climatiques (température).

Sur le pin maritime Castéra et al. (1996), ont établi différents modèles de prédiction du MOE et du MOR à partir de la densité du bois et de la proportion de nœuds des pièces. Des populations de planches ont ensuite été simulées à partir de ces modèles, puis classées.

Essence	Propriétés	Variables	Type de modèle	Auteur
Pin sylvestre	Taux bois de printemps dans le cerne	Ln (largeur de cerne)	Combinaison linéaire variables	Ikonen (2008)
Pin sylvestre	Densité cerne	Taux bois de printemps Âge cambial	Combinaison linéaire variables	Ikonen (2008)
Black spruce	MOE	Circonférence 1,3 m Longueur du houppier Densité du bois	Combinaison linéaire variables	Liu (2007)
Black spruce	MOR	Circonférence 1,3 m Densité du bois	Combinaison linéaire variables	Liu (2007)
Epicea de sitka	Angle du fil	Âge Cambial	$a * AC * e^{-AC/b} + c$	Houllier, (1995)
Epicea de sitka	Densité	Âge Cambial Largeur de Cerne	$e^{aAC} * (b + c * LC)$	Leban (2002)

Figure 18 : Exemple de variables utilisées dans des modèles de prédiction des propriétés du bois

e) Indicateurs de la qualité étudiés

L'objectif principal de l'étude est d'étudier l'influence de la sylviculture du pin maritime sur les caractéristiques du bois. Cela consiste dans un premier temps à établir des modèles de variation radial, de la moelle vers l'écorce, et en fonction de la hauteur de l'arbre, des caractéristiques physiques et mécaniques du bois. Les caractéristiques étudiées sont :

- la surface de duramen en proportion,
- la nature des nœuds,
- l'angle du fil,
- les propriétés mécaniques des sciages.

Les variables retenues pour la construction des modèles, complémentaires de l'âge cambial et de la hauteur dans l'arbre, sont des variables dendrométriques mesurables au niveau arbre ou parcelle. Cela permet ainsi, dans un second temps, d'appliquer les modèles établis à différents scénarios sylvicoles employés dans le cadre de la reconstitution du massif forestier Aquitain. Ces scénarios se distinguent par leur vitesse de croissance moyenne et par le volume des arbres à la coupe rase. Les propriétés du bois seront simulées pour l'arbre moyen de chaque scénario analysé et l'impact des paramètres sylvicoles sera évalué.

Les modèles seront aussi appliqués au niveau du bois récolté sur l'ensemble du massif. Actuellement une réflexion est en cours en Aquitaine pour définir la meilleure stratégie d'exploitation du massif à conduire, pour combler le manque de production de bois par le massif suite aux tempêtes. Doit-on exploiter les arbres âgés en priorité, exploiter plus mais dans toutes les classes d'âge ? Différentes hypothèses de prélèvement seront testées et l'impact sur la qualité moyenne du bois récolté sera analysé.

Enfin les modèles développés sont intégrés à un logiciel pour obtenir une visualisation simple de ces différents modèles et de leur application à différents scénarios sylvicoles.

2) MATERIEL ET METHODES

a) Dispositif expérimental

i) Inventaire des peuplements disponibles

Deux catégories de peuplements ont servi à la collecte des données de cette étude :

- peuplements conduits en ligniculture du réseau d'essai de FCBA. Ces peuplements ont été exploités et analysés dans le cadre de cette étude. Les données recueillies constituent le cœur de cette étude.
- peuplements de régénération naturelle, exploités dans le cadre de projets antérieurs de l'ex-CTBA et de l'ex-AFOCEL. Les données récoltées à l'époque ont été consolidées et analysées. Elles constituent un témoin de la sylviculture passée.

L'Association Forêt Cellulose (AFOCEL, fusionnée en 2007 avec le Centre Technique du Bois et de l'ameublement pour créer l'institut technologique Forêt, Cellulose, Bois construction et Ameublement) a dès sa création en 1962 installé un réseau de parcelles forestières d'essai. Le but de ce réseau était de tester les techniques culturales (conditions d'élevage en pépinière, travail du sol, fertilisation), de nouvelles techniques sylvicoles (types d'éclaircies, fertilisation,), amélioration génétique et aussi introduction d'essences peu ou pas utilisées en France. Au fil des années 2500 dispositifs ont été installés en France, dont 1000 sont régulièrement suivis aujourd'hui (Gastine et al. 2003).

En Aquitaine, 310 essais sont mesurés régulièrement (cf. localisation géographique **Figure 19**). 85 % des essais sont consacrés au pin maritime, l'essence de base de l'économie forestière régionale. Ces essais constituent la base des études de scénarios sylvicoles, de la modélisation de la croissance, des techniques de reconstitution des forêts après la tempête, ...

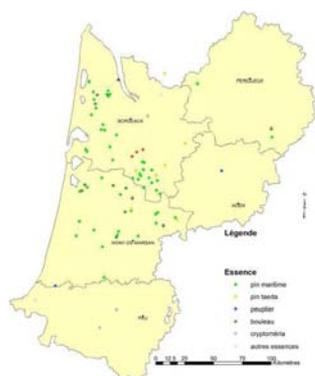


Figure 19 : Localisation géographique des essais forestiers aquitains du réseau FCBA

C'est dans ce réseau que les peuplements conduits en ligniculture étudiés dans cette étude, ont été sélectionnés. Des arbres ont ensuite été identifiés, caractérisés, exploités puis transformés. La rigueur de l'installation des modalités des essais, leur suivi régulier, et l'archivage des données mesurées garantissent la fiabilité des paramètres étudiés.

Le réseau d'essais de FCBA ne contenant pas de peuplement conduit suivant une sylviculture conventionnelle, des données d'études précédentes ont été utilisées pour compléter les parcelles échantillonnées dans ce réseau. Ces études sont les suivantes :

- Peuplements étudiés par l'ex-CTBA qui a conduit à partir du début des années 1980 des études sur le potentiel des bois français et leur valorisation en structure. Dans ces études une traçabilité du peuplement à la planche a été réalisée et les peuplements ont été caractérisés. 3 études concernent des peuplements de régénération naturelle, conduits selon une sylviculture traditionnelle (Reuling 2005). Les données de ces peuplements seront utilisées pour la partie modélisation des aspects mécaniques et désignées par peuplements ex-CTBA,
- Peuplements étudiés dans un projet d'évaluation de la qualité des coupes rases de pin maritime. Une étude visant à apprécier la qualité sur pied du pin maritime conduit en régénération naturelle, a été menée en 2005 par l'ex-AFOCEL (Moreau 2005). Le but de ce projet était d'estimer la qualité sur pied de la ressource existante en termes d'aspect visuel des sciages produits. 14 parcelles de régénération naturelle avaient été identifiées puis caractérisées. Les données recueillies dans ce projet seront utilisées pour les aspects présence de nœuds et de duramen et désignés par peuplements ex-AFOCEL.

ii) Sélection des peuplements

(1) Peuplements conduits en ligniculture

L'un des objectifs principaux de cette étude est de prédire les propriétés technologiques des sciages de pin maritime, en fonction des pratiques sylvicoles. L'idée n'est pas de chercher des peuplements conduits suivant le scénario sylvicole moyen de ligniculture appliqué sur le massif, mais de rechercher les scénarios extrêmes, mais réalistes, afin d'analyser leurs effets sur les caractéristiques du matériau bois.

Suite à la tempête Klaus du 26 janvier 2009, des réflexions ont été engagées en Aquitaine sous l'égide du groupement intérêt public ECOFOR. Un groupe de travail s'est consacré à la problématique de la reconstitution du massif. Différents itinéraires sylvicoles ont été décrits et retenus (ECOFOR 2009).

En se basant sur ces itinéraires, 6 itinéraires sylvicoles réalistes pour la conduite de peuplements en lignicultures ont été définis. Deux niveaux de fertilité (Forte fertilité : F+ et faible fertilité : F-) et trois volumes unitaires lors de l'exploitation sont considérés : 0,6 / 0,9 / 1,1 m³ pour les fortes fertilités et 0,6 / 0,8 / 1,0 m³ pour les faibles fertilités.

On obtient ainsi 6 objectifs d'exploitation pour chacun desquels une ou deux parcelles sont sélectionnées dans le réseau d'essai de l'ex-AFOCEL. Le graphique suivant décrit les itinéraires sylvicoles théoriques pour les deux classes de fertilité considérées.

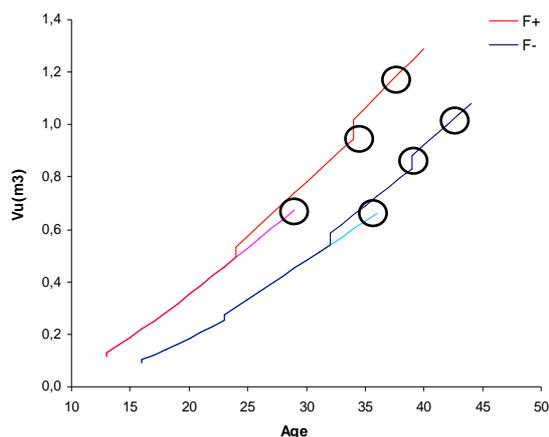


Figure 20 : Scénarios cibles - volume unitaire en fonction de l'âge pour deux indices de fertilité et objectifs d'exploitation (représentés par un cercle)

10 parcelles se rapprochant des itinéraires précédemment décrits ont été identifiées dans le réseau d'essais de FCBA. Pour compléter cet échantillon, une parcelle du réseau de l'INRA, située au Rousset (33), regroupant des arbres de plus de 30 ans à des surfaces terrières exceptionnellement élevées (> 60 m²), offrant un support original pour l'élaboration de modèles dans des conditions de concurrence extrême, a aussi été échantillonnée. Sur cette parcelle jamais éclaircie, 4 modalités de sylviculture peuvent être distinguées : 2 densités initiales de reboisement (1250 et 2500 tiges par hectare) croisées avec 2 motifs de plantation (carré et rectangle).

La localisation de ces parcelles est donnée sur la Figure 21.



Figure 21 : Localisation des parcelles retenues pour l'étude

Le tableau ci-dessous récapitule les données sylvicoles des parcelles retenues.

On peut noter la large gamme de volume unitaire moyen, de 0,5 à 1,34 m³ couvrant les différents itinéraires retenus pour l'étude. On remarque la position atypique des 4 modalités de la parcelle du Rousset jamais éclaircie.

Parcelle	Année de boisement	Âge à l'exploitation	Mode de boisement	Type de Lande	Modalité d'élague	Accroissement en circonférence (cm/an)	Volume unitaire moyen (m ³)
Le Rousset 1	1972	35	Plantation	Mésophile	1 passage	2,49	0,60
Le Rousset 2	1972	35	Plantation	Mésophile	1 passage	2,66	0,69
Captieux	1975	33	Semis	Sèche	1 passage	2,87	0,63
Les Tucs	1973	35	Semis	Sèche	Non	2,73	0,65
Le Nezer	1977	31	Semis	Mésophile	Non	3,05	0,64
Machicq	1977	30	Plantation	Humide	1 passage	3,09	0,70
Le Rousset 3	1972	35	Plantation	Mésophile	1 passage	2,83	0,81
Campo	1971	37	Semis	Humide	1 passage	2,83	0,82
Melet	1968	39	Semis	Mésophile	Non	2,82	0,86
Le Rousset 4	1972	35	Plantation	Mésophile	1 passage	3,02	0,96
Liposthey 1	1969	38	Semis	Humide	1 passage	2,75	0,83
Sore 10	1976	32	Plantation	Humide	2 passages	3,35	0,93
Liposthey 2	1956	51	Semis	Humide	1 passage	2,23	0,92
Sore 1	1967	40	Plantation	Humide	1 passage	3,04	1,34

Figure 22: Caractéristiques des parcelles conduites en ligniculture retenues pour l'étude

La Figure 23 récapitule pour les 14 peuplements retenus l'accroissement moyen en circonférence (en cm/an) mesuré à 1,30 m et le volume unitaire moyen de la parcelle. Les accroissements en circonférence sont compris entre 2.5 et 3.5 cm/an sauf pour la parcelle de Liposthey 2. Cette parcelle a été reboisée en 1950 par semis après un travail du sol et une fertilisation avec des scories de déphosphoration (ou scories thomas), déchets de fabrication de la fonte à partir de minerai de fer phosphoreux. Il s'agit donc d'un essai ancien de ligniculture. La fertilisation ne semble pas avoir d'effet significatif sur cette parcelle. Néanmoins il a été décidé de conserver cette parcelle dans l'analyse car elle permet d'étendre la gamme de vitesse de croissance.

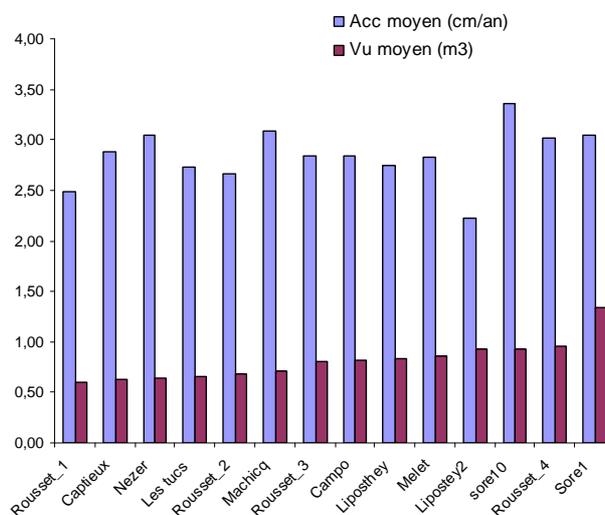


Figure 23 : Ligniculture, parcelles sélectionnées : volume unitaire moyen et accroissement en circonférence

(2) Peuplements conduits en régénération naturelle

(a) Peuplements étude ex-CTBA

Parmi les 3 études complètes menées par l'ex-CTBA, sur la caractérisation de l'arbre à la planche, une a été sélectionnée pour servir à ce projet car étant la plus complète en termes de données traçées (âge de la parcelle, données dendrométriques, hauteur de prélèvement des billons...). Cette étude, de juin 1986, a consisté à caractériser mécaniquement les sciages issus de 6 peuplements de sylviculture traditionnelle. Les caractéristiques de ces peuplements issus de régénération naturelle sont données dans le tableau ci-dessous

Parcelle	Année de boisement	Âge à l'exploitation	Mode de boisement	Type de Lande	Modalité d'élagage	Accroissement en circonférence (cm/an)	Volume unitaire (m ³)
Saint Hélène	1933	53	Rég. naturelle	Humide	Inconnue	2,45	1,19
Saumos	1929	57	Rég. naturelle	Humide	Inconnue	2,17	1,23
Sore plaine	1903	83	Rég. naturelle	Sèche	Inconnue	1,56	1,31
Le sen	1929	57	Rég. naturelle	Humide	Inconnue	2,35	1,68
Vielle	1928	58	Rég. naturelle	Dune	Inconnue	2,58	1,94
Magesq	1914	72	Rég. naturelle	Mésophile	Inconnue	2,20	2,25

Figure 24: Caractéristiques dendrométriques moyennes des parcelles de régénération naturelle sélectionnées dans l'étude ex-CTBA (exploitation en 1986)

Ces peuplements ne proviennent pas d'un réseau d'essai, néanmoins les données dendrométriques recueillies suffisent à les caractériser. On constate une hétérogénéité des vitesses de croissance avec des accroissements moyens en circonférence s'échelonnant de 1.56 à 2.58 cm/an.

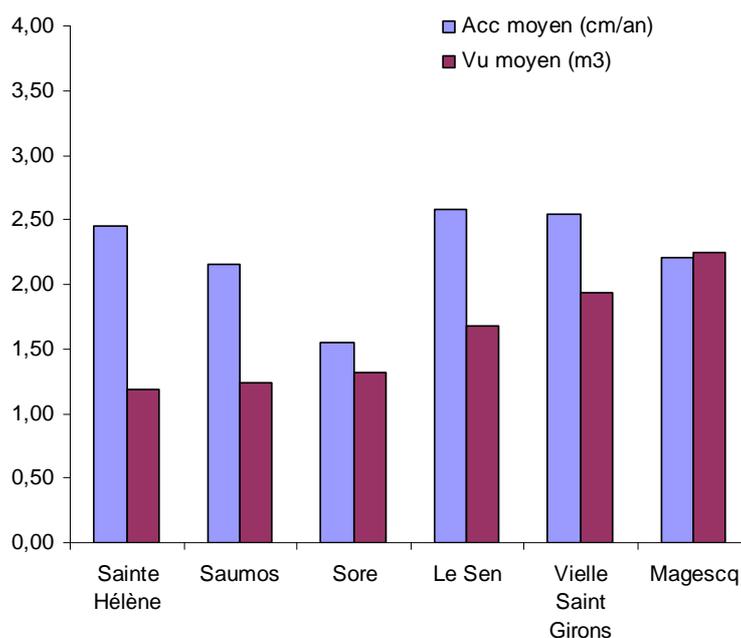


Figure 25: Régénération naturelle, parcelles étude ex-CTBA : volume unitaire moyen et accroissement en circonférence

(b) Peuplements étude ex-AFOCEL

14 parcelles, conduites en ligniculture, réparties sur le massif aquitain avaient été identifiées. Ces parcelles, de volume unitaire moyen compris entre 0,6 m³ et 1,8 m³ avait été sélectionnées, afin de représenter la ressource de type régénération naturelle transformée par les scieries d'Aquitaine.

Parcelle	Année de boisement	Âge à l'exploitation	Mode de boisement	Type de Lande	Modalité d'élagage	Accroissement en circonférence (cm/an)	Volume unitaire (m ³)
Canet	1939	65	Rég. naturelle	Sèche	Inconnue	1,83	1,20
Cestas	1951	53	Rég. naturelle	Mésophile	Inconnue	2,08	0,93
Herm	1956	48	Rég. naturelle	Mésophile	Inconnue	2,65	1,35
Hourtin	1954	50	Rég. naturelle	Humide	Inconnue	2,05	0,62
Lacanau	1949	55	Rég. naturelle	Humide	Inconnue	2,37	1,20
Le Muret	1943	61	Rég. naturelle	Mésophile	Inconnue	2,08	1,31
Lugos	1942	52	Rég. naturelle	Humide	Inconnue	2,88	1,86
Onesse	1950	54	Rég. naturelle	Mésophile	Inconnue	2,81	2,05
Parentis	1952	52	Rég. naturelle	Mésophile	Inconnue	2,29	1,18
Poms	1950	54	Rég. naturelle	Sèche	Inconnue	2,21	1,02
Sabres	1950	54	Rég. naturelle	Mésophile	Inconnue	2,60	1,94
Trensacq	1949	55	Rég. naturelle	Humide	Inconnue	2,35	1,33
Vert	1949	55	Rég. naturelle	Mésophile	Inconnue	2,38	1,56
Villeneuve	1944	60	Rég. naturelle	Mésophile	Inconnue	2,28	1,96

Figure 26: Caractéristiques dendrométriques moyennes des parcelles de régénération naturelles sélectionnées dans l'étude ex-AFOCEL (exploitation en 2004)

De même que pour les parcelles de l'étude ex-CTBA, ces peuplements ne proviennent pas d'un réseau d'essai. On ne possède ainsi que très peu d'information sur leur historique sylvicole. Les modalités d'élagage ne sont pas connues même si a priori il n'y a pas eu d'élagage pratiqué (uniquement un élagage naturel). Les vitesses de croissance moyenne sur la vie du peuplement, sont comprises entre 1,9 et 2,6 cm/an et sont représentatives des peuplements de régénération naturelle.

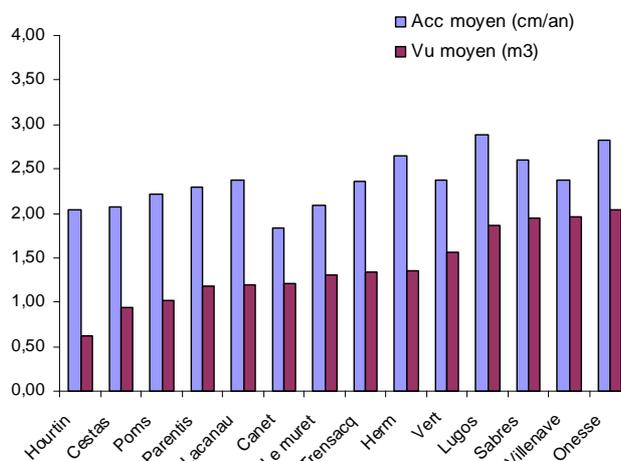


Figure 27: Régénération naturelle, parcelles étude ex-AFOCEL : volume unitaire moyen et accroissement en circonférence

iii) Choix des arbres et mesures réalisées avant exploitation

12 arbres sans défaut majeur ont été échantillonnés sur les peuplements conduits en ligniculture, 10 sur les peuplements de l'étude ex-AFOCEL et 15 sur les peuplements de l'étude ex-CTBA.

Les arbres sélectionnés sont sans défaut majeur. La sélection a été basée sur la stratification de l'inventaire des circonférences des différentes parcelles en 4 classes.

Au total 168 arbres ont été échantillonnés sur les 14 parcelles conduites en ligniculture, 140 pour l'étude ex-AFOCEL régénération naturelle et 96 pour l'étude ex-CTBA.

Sur tous les arbres, la circonférence à 1,30 m et la hauteur totale ont été mesurés.

Sur les arbres conduits en ligniculture ainsi que ceux de l'étude ex-AFOCEL, la hauteur du premier verticille vert (couronne de branches avec plus de $\frac{3}{4}$ des branches vivantes), la hauteur du premier verticille mort (couronne de branches avec plus de $\frac{3}{4}$ des branches mortes) et l'écart à la verticalité à 1,50 m ont été relevés.

Le graphique ci-dessous donne l'accroissement en circonférence en fonction du volume unitaire pour chaque arbre échantillonné. On peut noter la large gamme d'accroissement compris entre 1 et 4 cm/an pour des volumes unitaires compris entre 0,4 et 3 m³.

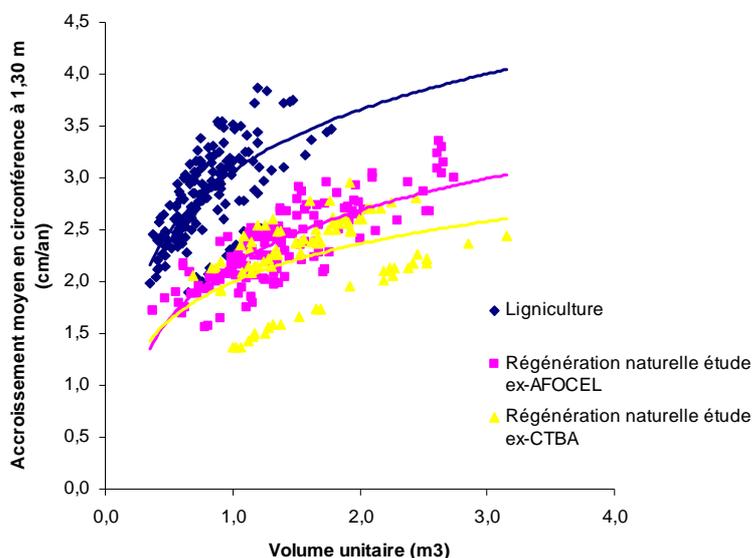


Figure 28 : Arbres sélectionnés - accroissement en circonférence en fonction du volume unitaire

b) Exploitation des arbres, façonnage et sciage

Le protocole décrit ci-dessous, est celui employé pour les parcelles conduites en ligniculture.

i) Exploitation et façonnage

Après abatage manuel des arbres sélectionnés, 2 types de façonnage ont été réalisés :

(1) Arbres débités en disques (4 arbres par parcelle, 1 par classe de circonférence). Ces disques sont réservés pour la mesure des propriétés physiques : surface de duramen, nature des nœuds intra arbre, microdensitométrie (mdm) et angle du fil. Le débit a été réalisé de la manière suivante :

- Pour une unité de croissance sur deux et à la hauteur de 1,30 m, un disque sans nœuds entre 6 et 8 cm d'épaisseur a été prélevé au milieu de l'unité de croissance pour les mesures d'angle du fil et de la surface de duramen (mesure des petit et grand diamètre de la zone duraminisée).
- Pour un verticille sur deux, de la position où l'ensemble des branches étaient vertes jusqu'à la hauteur du premier verticille mort, puis pour tous les verticilles, des disques ont été façonnés au niveau des couronnes de branches pour découvrir progressivement les nœuds et noter le nombre et l'évolution de leur nature.
- Tous les 2,4 m prélèvement d'un disque sans nœud pour les mesures de microdensitométrie.

(2) Arbres billonnés en 2,20 m (8 arbres par parcelle, 2 par classe de circonférence). Les billons sont destinés au sciage puis à la fabrication des avivés pour la mesure des propriétés mécaniques. Les arbres ont été façonnés en billons jusqu'à un diamètre fin bout minimal sous écorce de 16 cm.



Figure 29 : Arbres sélectionnés – façonnage disques et billons

ii) Sciage des billons prélevés

Les billons ont été sciés dans une scierie traditionnelle. Le plan débit utilisé est un débit en tournant autour de la grume ce qui permet d'obtenir majoritairement des avivés sur dosse. Les dimensions des sciages sont de 50*110*2200 mm afin d'obtenir, après séchage et corroyage, des dimensions d'avivés de 40*100*2200 mm (dimensions requises pour les tests mécaniques).

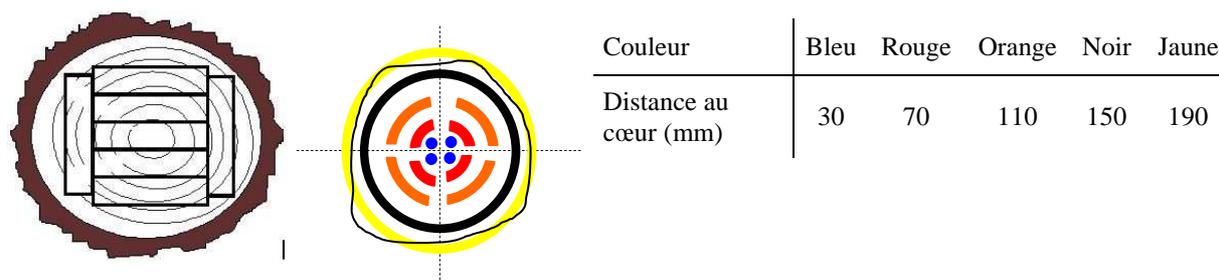


Figure 30 : Plan de débit des billons et code couleur appliqué pour le repérage de la distance au cœur

La position des planches par rapport au cœur du billon est repérée à l'aide d'un système de couleurs appliquées au pochoir et variant radialement (Figure 30).

Le séchage est réalisé en séchoirs à air chaud climatisé, en utilisant la table de séchage habituellement appliquée au pin maritime. L'humidité finale ciblée est de 12%.

c) Méthodes de caractérisation des échantillons prélevés

Tous les échantillons prélevés, qu'ils aient été prélevés pour cette étude ou lors des 2 études précédentes, ont été caractérisés par les mêmes méthodes décrites ci-dessous.

i) Méthode de mesure du taux de Duramen

La présence de duramen a été mesurée visuellement sur les disques prélevés, la couleur du duramen étant pour le pin maritime très différente de celle de l'aubier. Le petit et le grand diamètre de la zone de duramen ont ainsi simplement été mesurés sur les disques prélevés. Le nombre de cerne duraminisé n'a pas été compté car cette mesure était très imprécise à réaliser, le duramen ne suivant pas le contour des cernes. La surface de duramen mesurée a été rapportée à la surface du disque sous écorce pour obtenir un taux de duramen par section.

ii) Méthode de mesure de la qualité des nœuds

Sur 4 arbres par parcelle, des disques ont été façonnés au niveau des couronnes de branches, de la base de l'arbre jusqu'à la première branche verte. Le tronçonnage débute juste au-dessus du verticille, avant les premières traces de nœud. Des disques de 2 à 3 cm d'épaisseur sont réalisés découvrant progressivement les nœuds jusqu'à la fin du verticille.

L'analyse visuelle de chacun des disques permet de déterminer la nature des nœuds intra arbre. La mesure du diamètre de chacune des zones par rapport à la moelle, nous donne leur position interne.

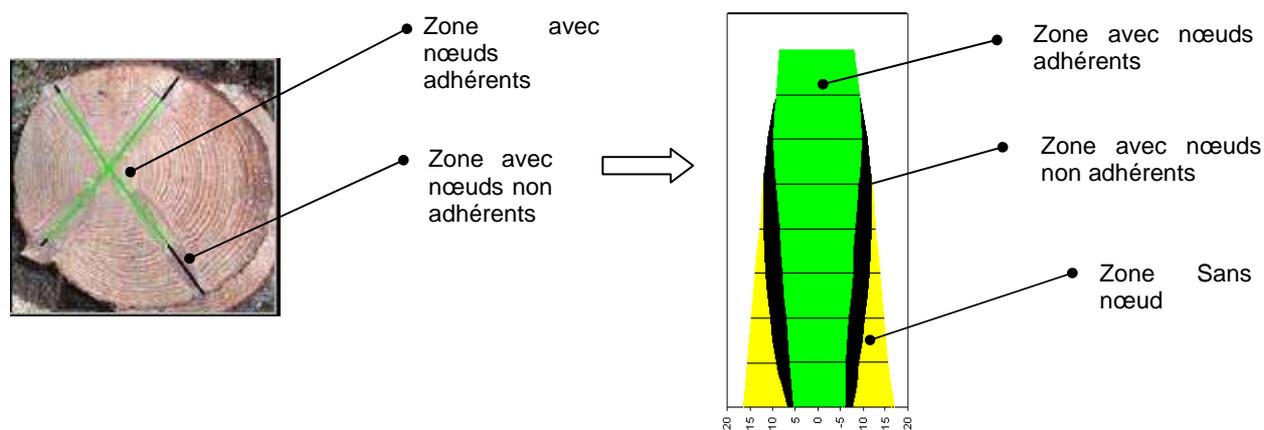


Figure 31 : Méthode de mesure de la nature des nœuds sur rondelle, et profils de nature des nœuds générés

iii) Méthode de mesure des variations radiales de l'angle du fil

La méthode développée par Hannrup et al. (2002) a été utilisée. Des barrettes de 2 cm de largeur centrées sur la moelle, ont été usinées dans les disques prélevés. Le sens de découpe a été choisi de manière à minimiser le bois de compression. L'angle du fil a été mesuré sur bois frais pour éviter qu'un éventuel retrait dû au séchage introduise un biais dans les mesures.

Pratiquement, les cernes externes de chaque barrette sont éliminés successivement avec un ciseau à bois. Tous les deux cernes jusqu'au vingtième, puis tous les cinq cernes, une mesure de l'angle du fil dans le bois initial est réalisée. La direction du fil du bois a été tracée avec une pointe en fer puis l'angle entre le fil et la verticale a été mesuré avec un rapporteur électronique. Pour compenser l'éventuelle inclinaison du cœur de l'arbre dans le cas où la rondelle n'aurait pas été prélevée de manière parfaitement perpendiculaire à l'axe du tronc, la valeur retenue est la moyenne des deux angles du même cerne mesurée de part et d'autre de la moelle, aux deux extrémités de chaque barrette.

Par convention, les angles ouverts à gauche ont été comptés négativement.

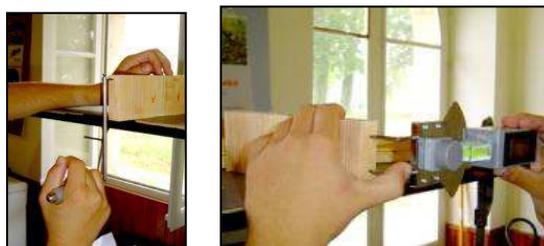


Figure 32 : Mise en évidence l'angle du fil (pointe traceuse) et mesure au rapporteur électronique (spirolyte)

iv) Méthode de mesure de la résistance mécanique des sciages

Après séchage et corroyage, les avivés de dimensions 40x100x2000 mm ont été testés mécaniquement au FCBA Bordeaux. Des essais de flexion statique 4 points des avivés sur chant ont été menés et les modules d'élasticité et de rupture ont été mesurés.

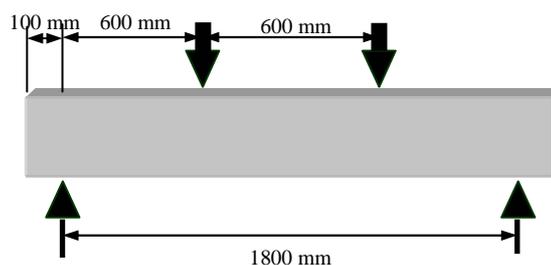


Figure 33 : Essai de flexion de 4 points, photo et schéma

v) Méthode de mesure des variations de densité intra cerne

Les mesures de micro-densitométrie (mdm) ont été réalisées à la plateforme qualité des bois de l'INRA à Cestas-Pierroton. Des barrettes diamétrales, d'environ 3 cm d'épaisseur ont été usinées dans les disques prélevés. Après séchage, elles ont été découpées une nouvelle fois afin d'obtenir des planchettes prête pour la radiographie aux rayons X. Ces planchettes dont l'épaisseur est d'environ 2mm sont obtenues en sciant les barreaux dans le sens de la longueur avec une scie circulaire à lame double.

Après extraction au pentane, afin d'éliminer les résines susceptibles d'altérer la qualité des clichés, les planchettes ont été radiographiées. Celles-ci sont déposées sur un film radiographique avec une cale étalon en acétate de cellulose, présentant des propriétés d'absorption proches de celle du bois.

L'orientation parfaite des fibres par rapport aux rayons X conditionne la netteté de l'image et la définition des limites de cerne.

Les planchettes sont exposées pendant 14 minutes à une distance source-film de 1,6 m. Le flux est réglé à 10 mA pour une tension de 9000V. Ces réglages sont variables en fonction de l'épaisseur des échantillons.

Le développement des radiographies est manuel. Les radiographies sont ensuite numérisées au scanner. La calibration et la mesure des données acquises sont effectuées grâce au logiciel WinDendro Density. Ce logiciel permet la réalisation de profils micro-densitométriques grâce au déplacement d'une fente virtuelle d'exploration optique.

Les profils sont enregistrés sous la forme d'un fichier comportant les valeurs numériques des densités mesurées.

A partir des profils, les données sont importées puis traitées avec le logiciel d'analyses statistiques R.

Les paramètres suivants sont calculés :

- densité minimale du cerne,
- densité maximale du cerne,
- densité moyenne du bois initial (dBI) : le bois initial est défini comme l'ensemble des points du cerne dont la densité est inférieure à la moyenne des valeurs de densité minimale et de densité maximale,
- densité moyenne du bois final (dBF) : le bois final est défini comme l'ensemble des points du cerne dont la densité est supérieure à la moyenne des valeurs de densité minimale et de densité maximale,
- Densité moyenne du cerne,
- proportion de bois final (pBF) : largeur de bois final par rapport à la largeur totale du cerne,
- densité moyenne du cerne : cette valeur est calculée, de la manière suivante $dBI + pBF * (dBF - dBI)$.

vi) Méthode de mesure de l'âge de transition bois juvénile – bois adulte

Pour déterminer l'âge de transition du bois juvénile au bois adulte, nous avons choisi d'analyser les variations radiales de densité du bois final. Cette caractéristique avait été retenue par (Mutz et al. 2004) pour modéliser sur le pin sylvestre cette transition. L'étude en parallèle des variations radiales de l'angle des micro-fibrilles aurait permis une approche plus complète et précise mais nous ne disposons pas de ces données.

La méthode retenue utilise la technique des régressions linéaires segmentées, technique utilisée avec succès sur le douglas (Abdel-Gadir & Kraemer 1993) et sur le pin sylvestre (Sauter et al. 1999).

Le profil habituel pour le pin maritime est une augmentation rapide de la densité avec l'âge cambial (bois juvénile) puis une inflexion avec une augmentation plus lente voire une stabilisation (bois adulte). La régression linéaire par segment est utilisée pour déterminer l'âge de cette transition. Deux régressions linéaires sont calculées, une pour la partie bois juvénile, l'autre pour la partie bois adulte. L'âge de transition est alors déterminé par l'intersection de ces deux courbes. La procédure segmented du logiciel de statistiques R a été utilisée (Muggeo 2008). La figure ci-dessous donne un exemple de l'application de cette méthode de calcul.

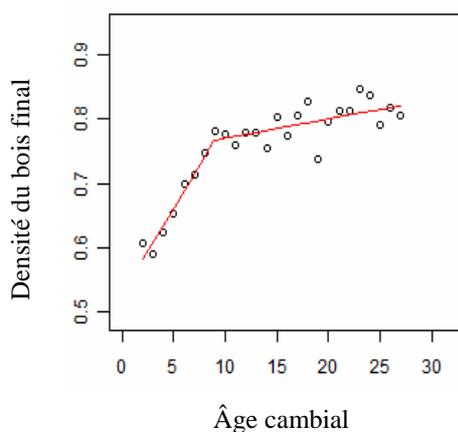


Figure 34 : Variation de la densité du bois final en fonction de l'âge cambial, détermination de l'âge de transition bois juvénile bois adulte par régression linéaire segmentée

Cette méthode est discutable. Elle se base en effet sur uniquement un critère qualitatif pour déterminer l'âge de transition. Malheureusement la densité du bois final est le seul critère dont nous disposons a priori non sensible à la largeur de cerne. De plus cette méthode ne prend pas en compte l'existence d'une zone de transition entre le bois juvénile et le bois adulte. Néanmoins l'âge déterminé permettra de rechercher les paramètres sylvicoles pouvant avoir une influence sur la formation du bois juvénile.

vii) Synthèse des échantillons prélevés et des mesures réalisées

- Peuplements conduits en ligniculture

Toutes les mesures décrites ci-dessus n'ont pas été réalisées sur l'ensemble des échantillons prélevés. Le grand nombre de parcelles sélectionnées, et le nombre important d'échantillons prélevés rendait l'analyse exhaustive des ces échantillons impossible dans le cadre de cette thèse. Ainsi un sous échantillonnage a été réalisé. Il est synthétisé dans le tableau ci-dessous.

- Pour les mesures d'angle du fil, les échantillons prélevés à 2,4m ont été analysés pour 3 arbres par parcelle et ceux prélevés tous les 2,4 m pour un arbre par parcelle
- Pour les mesures mécaniques, l'échantillon a du être réduit à environ 1000 tests. Ainsi des sciages ont été éliminés aléatoirement.

Parcelle	Nb. arbres prélèvement disques	Nb. disques analysés Duramen / Mdm	Nb. disques analysés Angle fil	Nb. arbres prélèvement billons	Nb. de billons façonnés	Nb. d'avivés sciés	Nb. avivés classés visuellement (aspect, déformations)	Nb. avivés testés méca.
Le Rousset 1	4	40	11	8	45	100	100	56
Le Rousset 2	4	49	11	8	42	79	79	46
Captieux	4	40	9	8	43	89	89	52
Les Tucs	4	45	12	8	48	115	115	66
Le Nezer	4	43	11	8	43	96	96	59
Machicq	4	45	12	8	44	106	106	62
Le Rousset 3	4	39	12	8	46	103	103	59
Campo	4	40	17	8	43	124	124	73
Melet	4	53	13	8	48	146	146	78
Le Rousset 4	4	49	12	8	39	72	72	39
Liposthey 1	4	38	10	8	47	135	135	78
Sore 10	4	52	14	8	51	166	166	98
Liposthey 2	4	61	17	8	46	181	181	105
Sore 1	4	56	15	8	59	256	256	146
Total	56	650	177	112	644	1768	1768	1017

Figure 35 : Peuplements conduits en ligniculture – synthèse des échantillons prélevés

- Peuplements conduits en régénération naturelle (étude ex-CTBA)

Parcelle	Nb d'arbres échantillonnés	Nb de billons façonnés	Nb d'avivés sciés	Nb avivés testés mécaniquement
Saint Hélène	15	40	289	188
Saumos	15	47	252	185
Sore plaine	15	42	265	229
Le sen	15	49	307	122
Vielle	15	51	406	124
Magesq	15	61	500	133
Total	90	290	2019	981

Figure 36 : Peuplements de ex-CTBA de régénération naturelle – synthèse des échantillons analysés

- Peuplements étude ex-AFOCEL

Parcelle	Nb. d'arbres échantillonnés	Nb. disques analysés Duramen
Canet	10	146
Cestas	10	133
Hourtin	10	119
Herm	10	66
Lacanau	10	123
Le Muret	10	61
Lugos	10	146
Onesse	10	134
Parentis	10	132
Poms	10	125
Sabres	10	165
Trensacq	10	134
Vert	10	189
Villeneuve	10	138
Total	140	1811

Figure 37 : Peuplements ex-AFOCEL de régénération naturelle – synthèse des échantillons analysés

Le tableau ci-dessous fait la synthèse du nombre d'échantillons analysés pour les différentes caractéristiques du bois étudiées, pour les 3 types de peuplements (ligniculture, régénération ex-CTBA et régénération ex-Afocel).

	Nombre d'arbres analysés	Nombre de disques mesurés surface duramen	Nombre de verticilles analysés nature noeuds	Nombre d'avivés testés méca.	Nombre de disques mesurés micro-densitométrie	Nombre de barrettes mesurés angle du fil
14 parcelles Ligniculture	168	650	683	1 017	650	177
6 parcelles Ex- CTBA	90	-	-	981	-	-
14 parcelles Ex- AFOCEL	140	1811	3026	-	-	-

Figure 38 : Synthèse du nombre d'échantillons analysés pour les 3 types de peuplements étudiés

d) Méthodes d'analyses statistiques

Les données recueillies ont été analysées avec le logiciel R (R Development Core Team 2010).

Dans une première étape l'étude descriptive des données a été réalisée. Les variations des propriétés étudiées, en fonction de l'âge cambial et de la hauteur pour chaque arbre échantillonné, ont été observées graphiquement. Ces observations nous ont permis de sélectionner les formes de modèles paraissant les plus adaptées pour décrire les différentes propriétés.

i. Rappel sur les modèles mixtes (ou à "effets aléatoires")

Les modèles établis sont des modèles de la famille des modèles mixtes. Ces modèles sont constitués d'une partie déterministe commune à l'ensemble des arbres (effets fixes) et d'une partie aléatoire qui structure et quantifie les écarts propres aux arbres et aux parcelles par rapport à la partie déterministe (Guilley 2000).

Ce type de modèle, utilisé par exemple par Wilhelmsson (2001), a été retenu car il nous permet de décomposer la variation totale du paramètre modélisé de la manière suivante :

- variations expliquées par les effets fixes
- variations expliquées par les effets parcelles
- variations expliquées par les effets arbres dans parcelles

Les modèles des propriétés du bois développés sont donc de la forme :

$$P_{ij} = \mu + f(A, B, C, \dots) + \text{parcelle}_i + \text{arbre}_{j(i)} + \varepsilon_{ij}$$

Avec :

μ : constante

P_{ij} : propriété du bois mesurée (duramen, nature des nœuds, angle du fil, propriétés mécaniques, densité) pour l'arbre i de la parcelle j

$f(A, B, C, \dots)$: fonction linéaire ou non linéaire décrivant les variations de la propriété avec A, B, C variables explicatives d'entrée

parcelle_i : effets aléatoires de la parcelle i

$\text{arbre}_{j(i)}$: effet aléatoire de l'arbre j dans la parcelle i

ε_{ij} : termes d'erreur

Les termes d'erreur et les effets aléatoires sont supposés suivre une loi normale et être indépendants. La qualité de l'ajustement des modèles sera contrôlée en vérifiant l'homoscédasticité des résidus (dispersion des résidus homogène sur tout le spectre des valeurs de la prédiction) et la normalité en traçant un graphique dit quantile/quantile permettant de comparer la distribution des résidus à une loi normale.

Les calculs statistiques ont été menés en utilisant la méthode décrite par (Pinheiro & Bates 2000) et les procédures LME (Linear Mixed-Effects library) et NLME (Non-Linear Mixed-Effects library) du logiciel R (Pinheiro et al. 2009).

ii. Méthodes utilisées

La démarche employée pour construire ces modèles est la suivante. Dans un premier temps la partie déterministe du modèle est construite soit par régression linéaire multiple soit par ajustement d'un modèle non linéaire. Dans le cas d'une régression linéaire multiple, une analyse en composantes principales (ACP) a d'abord été réalisée pour explorer graphiquement les variables. L'ACP permet de résumer de manière graphique la matrice de corrélations entre les variables étudiées, et d'examiner les problèmes de colinéarité entre les variables. L'examen du cercle des corrélations, nous permet en première approche d'apprécier graphiquement les corrélations entre variables (sur le cercle, l'angle entre 2 variables, mesuré par son cosinus, est égal au coefficient de corrélation linéaire entre les 2 variables).

Les variables les plus explicatives ont été incorporées pas à pas, d'après la procédure automatique stepwise de R.

Pour l'ajustement d'un modèle non linéaire, la démarche a été la suivante :

- ajustement des paramètres du modèle par arbre,
- observation graphique des variations des paramètres entre arbres et entre parcelles,
- simplification si nécessaire du modèle en fixant des paramètres puis recherche de corrélations entre les paramètres restants et des caractéristiques mesurées sur arbre ou sur parcelle.

Dans un deuxième temps la partie aléatoire a été établie en « mettant » des effets aléatoires sur les paramètres variant entre les parcelles ou entre les arbres. Les effets aléatoires ont été ajustés, s'ils étaient jugés significatifs. Pour comparer deux ajustements le critère d'Akaike (AIC) a été utilisé (Pinheiro & Bates 2000).

Cette procédure utilise la valeur d'information d'Akaike (AIC) pour sélectionner ou supprimer les variables. L'AIC représente un compromis entre le biais (qui diminue avec le nombre de paramètres) et la parcimonie (nécessité de décrire les données avec le plus petit nombre de paramètres possible) (Lancelot & Lesnoff 2005).

Les estimations des paramètres aléatoires ont été obtenues par la méthode du maximum de vraisemblance restreint avec les procédures LME et NLME du logiciel de statistiques R.

L'objectif de la construction de cette partie aléatoire est de décomposer la variabilité résiduelle. On recherche l'origine de cette variation non expliquée ; est-elle liée aux conditions de croissance du peuplement, à un comportement indépendant de l'arbre ou alors est-elle totalement inexpliquée ? Aussi on ne cherche pas une optimisation parfaite de cette partie aléatoire, mais à avoir une juste décomposition des variations non expliquées par le modèle.

Les modèles avec la partie aléatoire ne seront pas utilisés par la suite à des fins d'estimations. Seule la partie fixe sera utilisée. En effet pour pouvoir les utiliser, il faudrait se situer dans le cas de parcelles avec des caractéristiques identiques à celles utilisées pour la construction des modèles ce qui est difficilement réalisable.

3) CONSTRUCTION DES MODELES A PARTIR DE VARIABLES DENDROMETRIQUES

a) Propriétés biologiques du bois

i) Duramen

La variable étudiée est le taux de duramen (en section). Ce taux de duramen est mesuré visuellement sur les disques prélevés à différents niveaux de hauteur des arbres échantillonnés.

Cette analyse est réalisée à partir des données de 14 parcelles conduites en ligniculture (4 arbres échantillonnés par parcelle) et des données des 14 parcelles de régénération naturelle (10 arbres échantillonnés par parcelle, étude ex-AFOCEL).

(1) Description des données

Le tableau ci-dessous donne pour l'ensemble des parcelles analysées le taux de duramen en surface moyen et pour 2 hauteurs d'analyse dans l'arbre, 2,4 m et 10 m. On note un effet de l'âge avec un taux de duramen plus élevé pour les parcelles les plus âgées, en accord avec le mécanisme de formation du duramen.

Mode de reboisement	Âge moyen des parcelles	Surface moyenne de duramen	Ecart type surface moyenne	Surface moyenne de duramen à une hauteur de 2,4 m	Ecart type surface à 2,4 m	Surface moyenne de duramen à une hauteur de 10 m	Ecart type surface à 10 m
Régénération naturelle	55	19%	0,117	29%	0,080	24%	0,084
Ligniculture	37	13%	0,076	20%	0,056	12%	0,053
Toutes parcelles	50	17%	0,111	26%	0,085	19%	0,094

Figure 39 : Taux de duramen sur sections moyen et mesurés à 2,4 et 10 m

Les graphiques pages suivantes donnent la variation en fonction de la hauteur, de la proportion de duramen pour les arbres échantillonnés, sur les parcelles de ligniculture et de régénération naturelle.

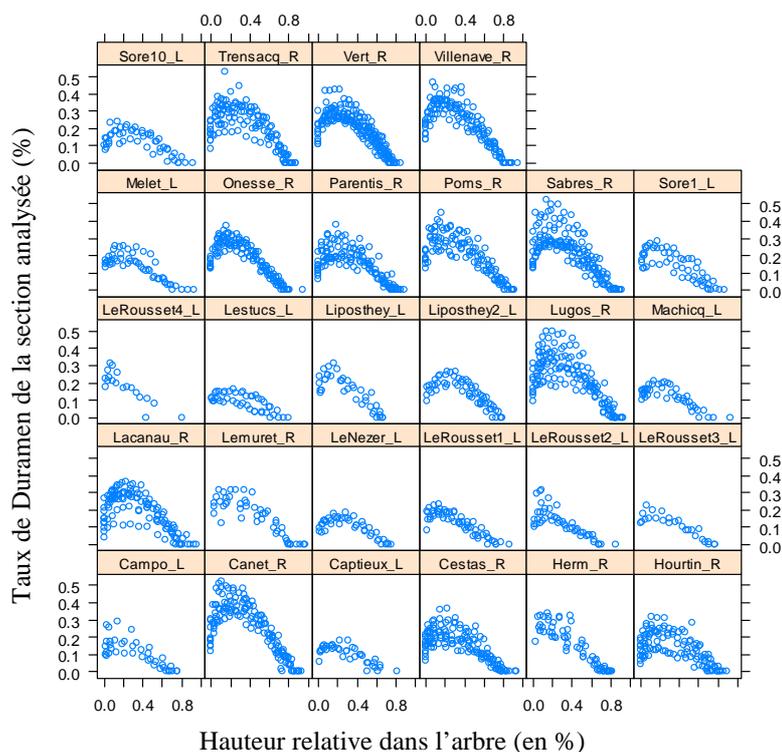


Figure 40 : Taux de surface de duramen en fonction de la hauteur relative pour les 28 parcelles étudiées (indication *_R* pour les parcelles de régénération naturelle et *_L* pour les parcelles de ligniculture)

Ce profil de variation du duramen en hauteur est assez particulier avec, en progressant de la souche vers la cime, une augmentation jusqu'à environ 30% de la hauteur totale puis une diminution de la surface pour s'annuler à environ 80% de la hauteur totale. Cette répartition est souvent rapportée chez le genre *pinus* (Berthier et al. 2001), mais est plus rare chez les autres espèces où la surface de duramen diminue régulièrement de la base vers la cime de l'arbre. Il n'y a pas de différence de profil de variation entre les arbres issus de régénération naturelle et ceux issus de ligniculture. Le maximum de surface de duramen atteint est plus élevé pour les parcelles les plus âgées, mais le profil de variation est le même.

(2) Construction de la partie fixe du modèle

Ce profil de variation ressemble aux profils d'absorption puis d'élimination d'une substance par un organisme dans le temps. On recherche à modéliser ces variations par la dérivée de la courbe de Gompertz. Cette courbe est une courbe de croissance en S dont le point d'inflexion arrive « plus tôt » que sur une courbe logistique, et dont la forme générale est : $f(t) = a * \exp^{(b * \exp^{(c * t)})}$

Elle est utilisée pour modéliser les phénomènes naturels et en particulier l'absorption et l'élimination de substance par un milieu en fonction du temps (Pinheiro & Bates 2000).

La formation du duramen pouvant être conditionné par la production par l'arbre de différentes auxines et d'éthylène (Shain & Hillis 1973), ce type de profil est cohérent.

Pour modéliser cette variation en fonction de la hauteur relative (H_{rel}) un modèle de la forme suivante est ainsi utilisé :

$$\text{Modèle 1 : Taux de surface de duramen} = a * k * \exp^{-\exp^{a*(t_0 - H_{rel})}} * \exp^{a*(t_0 - H_{rel})} + \epsilon$$

Avec H_{rel} : hauteur relative d'observation = hauteur d'observation (m) / Hauteur totale (m)

a, k, t_0 : paramètres du modèle, a et k étant liés à la valeur maximale de taux de duramen atteinte et t_0 à la hauteur relative à laquelle ce maximum est atteint

Les résultats de l'ajustement de ce modèle à l'ensemble des arbres sont donnés dans le tableau suivant :

	Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
a	4,471	0,074	60,57	<2e-16	***
k	0,171	0,002	81,10	<2e-16	***
t_0	0,196	0,003	69,34	<2e-16	***

Sign. : '***' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05

Erreur standard résiduelle	0.074	Degrés de libertés	2418
----------------------------	-------	--------------------	------

Figure 41 : Modèle du taux de surface de duramen, résultats de l'ajustement à l'ensemble des arbres

On cherche dans un premier temps à estimer les paramètres du modèle, a, k, t_0 , pour chaque arbre. Avec ces ajustements « locaux » (arbre par arbre), la moyenne des erreurs standard résiduelles est de 0,029. L'analyse graphique de ces ajustements arbre par arbre est donnée sur la figure ci-dessous.

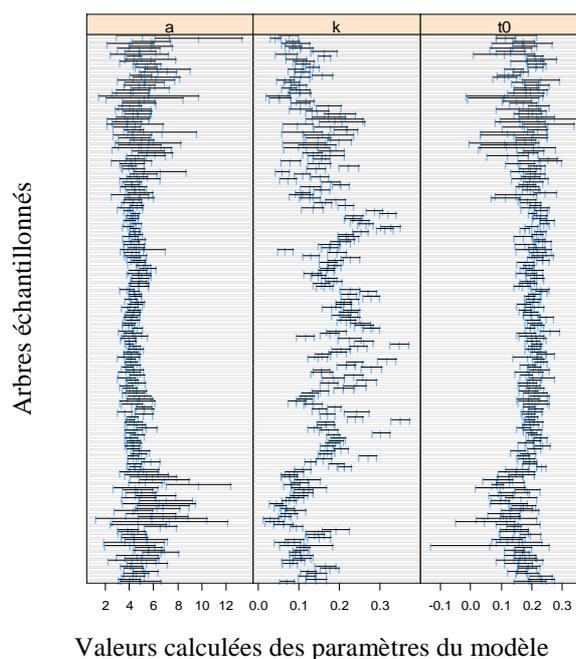


Figure 42 : Représentation graphique des ajustements arbre par arbre des paramètres du modèle Duramen

Les paramètres a et t_0 sont assez peu variables entre arbres. Le paramètre k variant par contre entre arbre, on vérifie l'existence de corrélations entre le paramètre k et les variables dendrométriques mesurées. Les variables retenues sont l'âge en année (AGE), la circonférence à 1,30 m en cm (C130), l'accroissement en circonférence en cm/an (IC), le rapport hauteur totale / diamètre à 1,30m (H/D), la hauteur relative de la première couronne verte (HCV), la longueur du houppier en m (LH), la hauteur relative de la première couronne morte (HCM).

Le graphique ci-dessous donne le cercle des corrélations entre ces différentes variables. La variable k , est considérée comme une variable illustrative, elle n'est pas intégrée dans l'ACP, le cercle des corrélations permet d'identifier les corrélations avec cette variable.

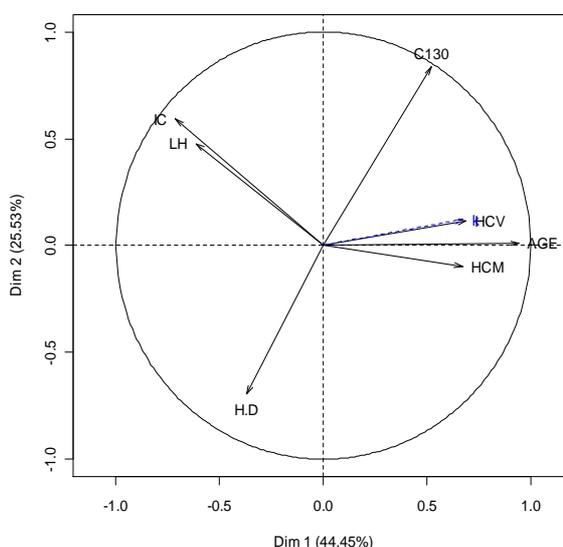


Figure 43 : Cercle des corrélations entre les variables dendrométriques et le paramètre k (en variable supplémentaire), du modèle de taux de duramen

On constate l'existence d'un axe houppier regroupant les variables HCV, HCM, LH, IC et $\hat{A}ge$. Plus la vitesse de croissance est élevée, plus les branches mortes et vertes sont basses et donc plus la longueur du houppier est importante. La vigueur de l'arbre est naturellement corrélée à un développement important du houppier. Plus l'arbre est âgé, plus la vitesse de croissance moyenne est faible et plus les branches mortes et vertes sont élevées ce qui traduit la remontée naturelle du houppier. On note aussi l'existence d'un axe dimension de l'arbre, regroupant les variables H.D et circonférence.

Une sélection progressive des variables explicatives du paramètre k , conduit à retenir $\hat{A}ge$ et LH comme nouvelles variables du modèle.

On retient alors d'ajuster les 2 modèles différents suivants :

$$\text{Modèle 2 : Surface de duramen} = a * (b * AGE) * \exp^{-\exp^{a * (t_0 - Hrel)}} * \exp^{a * (t_0 - Hrel)} + \epsilon$$

$$\text{Modèle 3 : Surface de duramen} = a * (b * AGE + c * LH) * \exp^{-\exp^{a * (t_0 - Hrel)}} * \exp^{a * (t_0 - Hrel)} + \epsilon$$

Les résultats de l'ajustement sont donnés dans le tableau suivant :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle 2	a	4,460e+00	5,583e-02	79,87	<2e-16	***
	b	3,480e-03	3,267e-05	106,50	<2e-16	***
	t0	1,977e-01	2,184e-03	90,56	<2e-16	***
	Erreur standard résiduelle		0,05865	Degrés de libertés		2418
Modèle 3	a	4,458e+00	5,505e-02	80,988	<2e-16	***
	b	3,870e-03	6,707e-05	57,700	<2e-16	***
	c	-3,225e-03	4,810e-04	-6,706	1.01e-08	***
	t0	1,984e-01	2,156e-03	92,056	<2e-16	***
	Erreur standard résiduelle		0,05813	Degrés de libertés		2417
Sign. : '***' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05						

Figure 44 : Modèle de taux surface de duramen, résultats de l'ajustement à l'ensemble des arbres

En considérant le critère AIC ainsi que l'erreur standard résiduelle, on sélectionne le modèle 2 pour décrire les variations en fonction de la hauteur de la surface de duramen avec une erreur standard résiduelle de 0,05865. Les variations expliquées par ce modèle sont alors de 73%.

Le paramètre k étant lié à la valeur maximale de duramen atteinte dans l'arbre, sa corrélation avec l'âge semble pertinente, la formation du duramen étant liée à l'âge cambial. Par contre contrairement à d'autres études, les variables longueur du houppier et vitesse de croissance n'apportent pas de gain de précision significatif au modèle (Berthier et al. 2001; I. Pinto et al. 2004; Longuetaud et al. 2006).

La Figure 45 nous donne les résidus en fonction des valeurs ajustés, ils sont globalement centrés. Par contre la dispersion reste importante. La prédiction des sections sans duramen, composées d'aubier uniquement est assez faible. Cela est lié au fait que le modèle utilisé, converge vers 0 mais ne peut pas prendre de valeur nulle. La dispersion est importante pour les valeurs de taux de duramen élevées, une part importante de la variabilité ne peut donc être expliquée par le modèle. La mesure du nombre de cernes duraminisés, mesure non réalisée lors du prélèvement des échantillons, car trop coûteuse en temps, pourrait permettre d'affiner les prédictions du modèle.

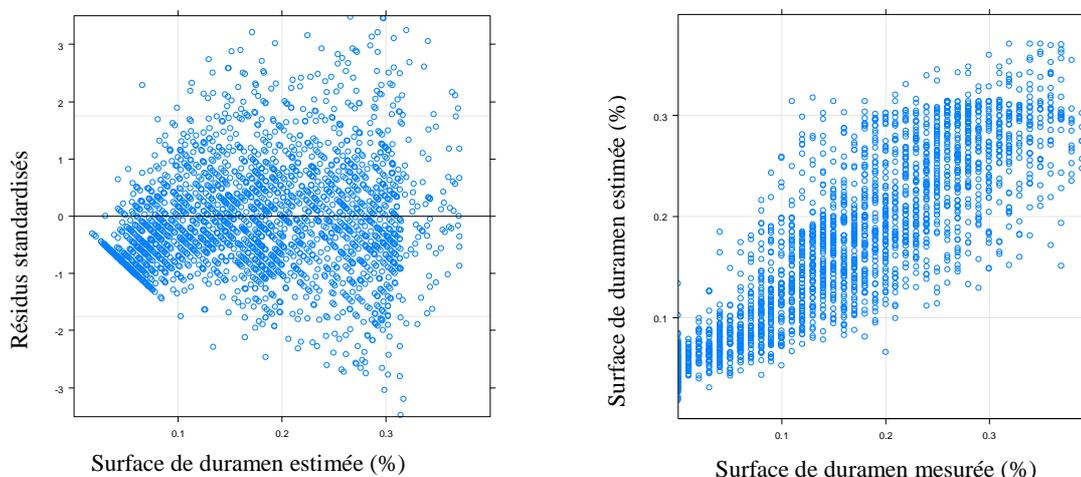


Figure 45 : Résidus en fonction des données ajustées (à gauche) et valeurs prédites en fonction des valeurs mesurées (à droite)

(3) Ajout des effets aléatoires

La seconde étape est la construction de la partie aléatoire du modèle, avec l'application d'effets aléatoires parcelles et arbres sur les paramètres a, b et T0 du modèle, précédemment sélectionné :

$$\text{Modèle 2 : Surface de duramen} = a * (b * AGE) * \exp^{-\exp^{a*(t0-Hrel)}} * \exp^{a*(t0-Hrel)} + \epsilon$$

Les modèles ont été sélectionnés en se basant sur le critère d'Akaike (AIC) et sur l'erreur standard résiduelle.

Seuls les effets arbres sont significatifs, les paramètres du modèle s'expriment alors ainsi :

$$a_i = a + \alpha_i \quad / \quad b_i = b + \beta_i \quad / \quad t0_i = t0 + \tau_i$$

avec a, b, t0 respectivement la valeur moyenne de a_i , b_i , $t0_i$ sur l'ensemble des arbres i, et α_i , β_i , τ_i , les écarts propres à l'arbre, par rapport à leur moyenne.

Les résultats des ajustements du modèle sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre du modèle de duramen	Valeur estimée	Erreur standard
a	4,679	0,043
b	0,003	6,8 e-5
t0	0,192	0,002
Moyenne surface duramen	17%	
Effectif	2429	
Coefficient de détermination moyen	0,73	
$\sigma^2_{\text{arbre}} / \sigma^2_{\text{total}}$	74%	
$\sigma^2_{\epsilon} / \sigma^2_{\text{total}}$	26%	

Figure 46 : Synthèse des paramètres du modèle de variation du duramen

Les effets parcelles ne sont pas significatifs. Les effets fixes expliquent 73% de la variation. Les effets arbres indépendants expliquent 74% de la variance résiduelle soit 20% de la variance totale. Il n'y a pas d'effet parcelle

La Figure 47 nous donne la surface de duramen prédite en fonction de la surface mesurée pour l'ensemble des parcelles analysées.

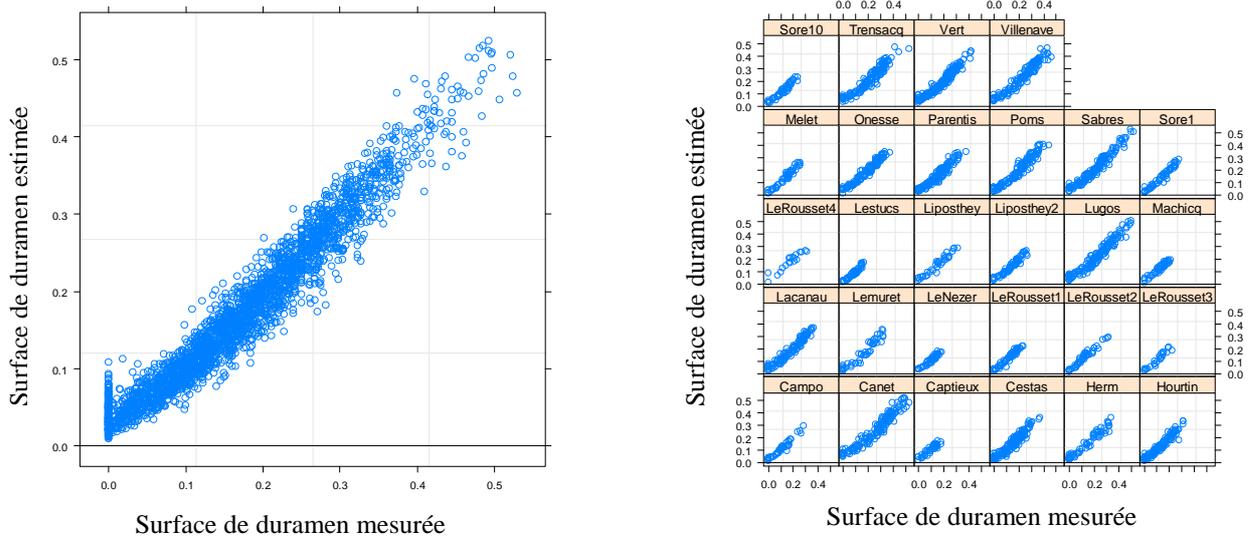


Figure 47 : Surface de duramen, valeurs mesurées / valeurs prédites pour l'ensemble des parcelles (gauche) et détaillé par parcelle (droite)

(4) Qualité de l'ajustement du modèle

Le modèle étant ajusté, on vérifie le respect de l'hypothèse initiale :

- les erreurs résiduelles et les effets aléatoires sont indépendants, de distribution normale et de moyenne 0 entre parcelles et entre arbres.

Les figures suivantes permettent de contrôler la validité de ces hypothèses. Les résidus du modèle sont globalement centrés autour de 0 et ne varient pas en fonction des valeurs prédites. Seules les valeurs nulles de surface de duramen sont toujours sur estimées le modèle tendant vers 0 mais ne pouvant pas s'annuler. Ces résidus sont aussi de distribution normale (Figure 48).

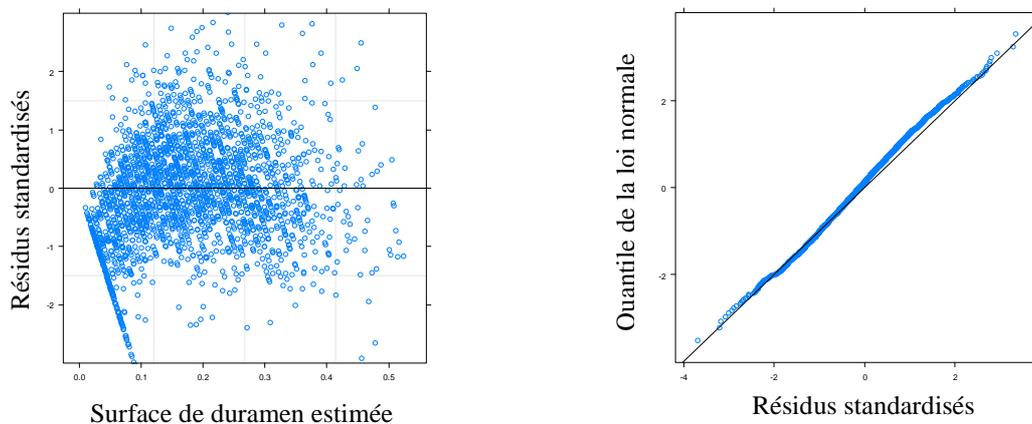


Figure 48 : Contrôle graphique de l'ajustement du modèle de duramen : résidus en fonction des valeurs prédites (à gauche) et normalité des résidus (à droite)

Les effets aléatoires sont de distribution normale de moyenne 0 (Figure 49).

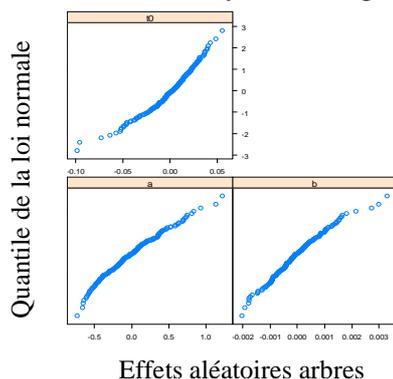


Figure 49 : Contrôle graphique de l'ajustement du modèle de duramen : normalités des effets aléatoires

Le modèle réalisé est donc constitué d'une partie déterministe commune à l'ensemble des arbres (effets fixes) et d'une partie aléatoire qui structure et quantifie les écarts propres aux arbres par rapport à la partie déterministe. Cette partie aléatoire, ne comprend que des effets arbres. Ainsi la part de variabilité non expliquée par le modèle est liée à un comportement de l'arbre, ne pouvant pas être expliqué par les variables retenues. La cause peut être soit génétique, soit liée à des paramètres sylvicoles propres à l'arbre : statut de l'arbre (dominé ou dominant), état de stress (le duramen pouvant être contrôlé par la production d'éthylène (Hillis 1987)), ou effet ponctuel du site (micro relief, zone sèche locale,...).

La Figure 50 présente un exemple de différences d'ajustement du modèle avec les effets fixes et les effets arbres pour 25 arbres. Les points bleus représentent les valeurs de surface de duramen mesurées, la ligne bleue l'ajustement avec uniquement les effets fixes et la ligne rouge l'ajustement avec les effets aléatoires. Si on examine la dernière ligne du tableau, avec un exemple de profils pour les arbres 3, 4, 5, 6 et 7 de la parcelle 116 (Le Rousset), on constate un profil de variation proche pour les arbres 3 et 4 et une différence de maximum marquée pour les arbres 5, 6 et 7.

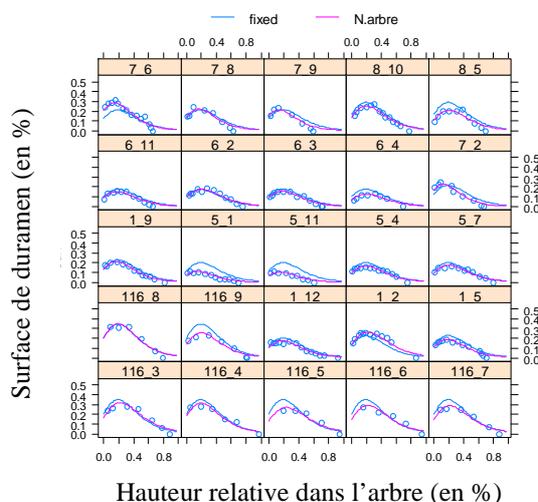


Figure 50 : Taux de duramen, comparaison valeurs réelles (points bleus), valeurs modélisées (effets fixes uniquement en bleu et effets fixes + effets aléatoires arbres en rouge) pour 25 arbres

ii) Nature des nœuds

Les variables étudiées sont les taux de nœud vert, nœud noir et sans nœud (en section). Ces taux sont mesurés visuellement sur les disques prélevés à différents niveaux de hauteur des arbres échantillonnés en rapportant la surface de chaque zone à la surface totale sous écorce de la section analysée.

Pour cette analyse nous disposons de données mesurées sur les parcelles conduites en ligniculture et sur celles conduites en régénération naturelle de l'étude ex-AFOCEL.

(1) Description des données

Le tableau ci-dessous donne pour l'ensemble des parcelles analysées la surface des nœuds de différente nature, en proportion de la surface totale, à une hauteur de 1,30 m. On note un effet important du mode de reboisement et de l'élagage. Les parcelles de ligniculture élaguées artificiellement ont naturellement des taux de bois sans nœuds plus importants, taux liés directement à l'opération. Les parcelles de régénération naturelle ont aussi des taux de bois sans nœud important, taux liés à un élagage naturel des branches qui ne se réalise pas sur les parcelles de ligniculture. Le taux de bois sans nœud pour les parcelles de ligniculture non élaguées est ainsi nul.

Mode de reboisement	Nb. parcelles	Nb. échantillons	Surface de nœud vert à 1,30 m	Ecart type surface moyenne	Surface de nœud noir à 1,30 m	Ecart type surface moyenne	Surface de bois sans nœud à 1,30 m	Ecart type surface moyenne
Régénération naturelle	12	2542	13%	0,06	12%	0,16	76%	0,18
Ligniculture sans élagage	3	141	34%	0,08	66%	0,08	0%	-
Ligniculture élagage 1 passage	9	421	27%	0,12	23%	0,29	50%	0,27
Ligniculture élagage 2 passages	2	24	19%	0,04	0%	-	81%	0,04
Toutes parcelles	25	3128	20%	0,12	22%	0,27	58%	0,32

Figure 51 : Surface des nœuds (en taux par rapport à la surface totale) sur des sections prélevées à 1,30 m pour les parcelles étudiées

La construction des modèles ne sera réalisée que pour les parcelles de ligniculture non élaguées et celles de régénération naturelle. En effet l'opération d'élagage est coûteuse et n'est pratiquement plus pratiquée en Aquitaine. Les futurs scénarios sylvicoles ne prévoient pas la réalisation de cette intervention.

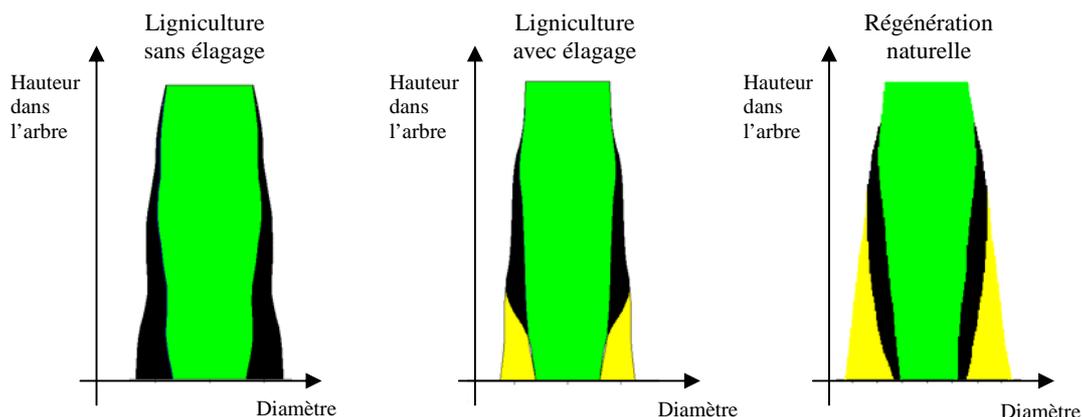


Figure 52 : Représentation schématique d'une coupe longitudinale de l'arbre moyen pour les parcelles de ligniculture et régénération naturelle, nature interne des nœuds (zone verte : nœud vert, zone noire : nœud noir, zone jaune : sans nœud)

La Figure 52 permet de comparer les profils de nature interne des nœuds pour les parcelles de ligniculture (élaguées ou non) et celles de régénération naturelle.

Les parcelles conduites en ligniculture, non élaguées, ont un profil de nature des nœuds assez simple avec une zone centrale de nœuds verts, puis en progressant radialement une zone de nœuds morts dont la surface diminue avec la hauteur. Il n'y a pas de présence de bois sans nœud pour ces arbres, l'élagage naturel ne s'étant pas réalisé. Les arbres sont encore jeunes et la remontée du houppier est plus lente du fait de la vigueur des arbres (Mäkinen 1999).

Si il y a eu élagage (1 ou 2 passages), on note une zone de bois sans nœud à la base de l'arbre dont la hauteur dépend de la hauteur d'élagage. Il n'y a pas de nœud noir à la base des arbres, l'opération d'élagage étant réalisée sur des branches encore vivantes. Pour des hauteurs supérieures, passé la hauteur d'élagage, la zone de bois sans nœud disparaît brusquement. On retrouve ensuite un profil identique à celui des parcelles non élaguées.

Pour les parcelles de régénération naturelle, la surface de la zone de bois sans nœud diminue progressivement avec la hauteur, correspondant à un élagage naturel des branches, progressif dans le temps (remontée naturelle du houppier). L'évolution de la zone de nœud vert est identique à celle des parcelles de ligniculture avec une diminution progressive de la surface de la base vers le sommet de l'arbre.

(2) Parcelles de ligniculture non élaguées

(a) Construction de la partie fixe du modèle

Les données analysées proviennent de 3 parcelles non élaguées (Figure 22). La proportion des zones de différentes natures de nœud intra arbre en fonction de la hauteur relative est donnée sur la **Figure 53**. Ces valeurs sont des proportions de la surface totale de la section du tronc au niveau des hauteurs analysées.

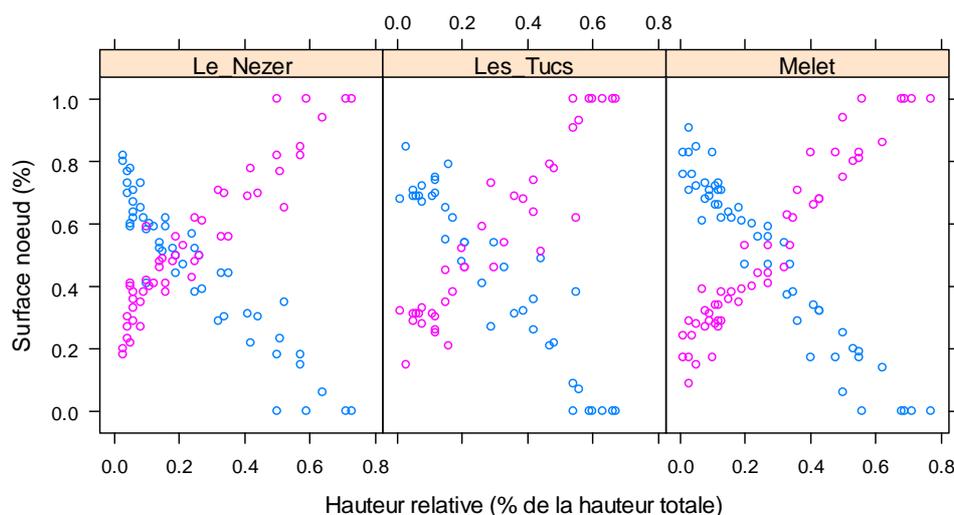


Figure 53 : Surface de nœud vert (en rose) et nœud noir (en bleu) en fonction de la hauteur relative pour les 3 parcelles de ligniculture non élaguées analysées

L'évolution avec la hauteur des proportions de surface pour les nœuds verts et noirs paraît linéaire et à le même profil pour les 3 parcelles.

On retient ainsi de construire un modèle multi linéaire pour exprimer les variations de la proportion de nœud vert en surface (S_{vert}) en fonction de la hauteur relative (H_{rel}). La proportion de nœud noir (S_{noir}) sera exprimée comme étant le complément à 1 de la surface de nœud vert.

Les variables retenues sont l'âge (\hat{AGE}), la circonférence à 1,30 m (C_{130}), l'accroissement en circonférence (IC), le rapport hauteur totale / diamètre à 1,30 m (H/D), la hauteur totale (HT), la hauteur relative de la première couronne de branches vertes (HCV), la longueur du houppier (LH) et la hauteur relative de la première couronne de branches mortes (HCM).

Le graphique ci-dessous, donnant le cercle des corrélations entre ces différentes variables, permet d'identifier les variables qui concentrent l'essentiel de l'information. Les surfaces de nœuds noirs et verts sont introduites en tant que variables supplémentaires.

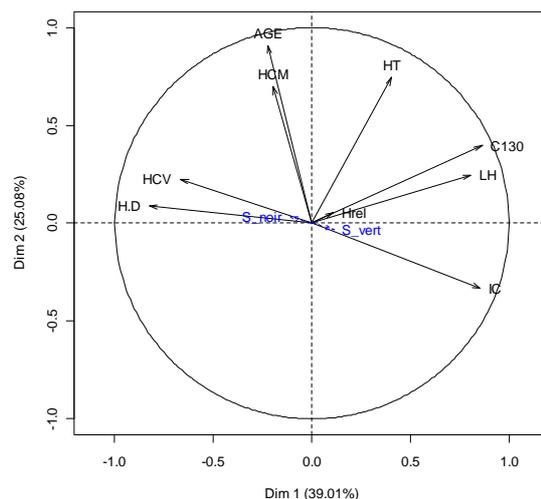


Figure 54 : Cercle des corrélations entre les variables dendrométriques et les surfaces de nœud noir (S_{noir}) et de nœud vert (S_{vert}) pour les parcelles de ligniculture

Les surfaces de nœuds verts et noirs, surfaces complémentaires, sont liées à l'axe houppier. Elles sont corrélées à la hauteur du verticille vert et à la vitesse de croissance. Plus la vitesse de croissance est élevée, plus la hauteur du premier verticille vert est basse et plus la surface de nœud vert est importante.

Une sélection progressive des variables explicatives, nous conduit à retenir HCV comme variable du modèle. On obtient alors :

$$\text{Surface de nœud vert} = a + b * H_{rel} + c * HCV + \epsilon$$

Les résultats de l'ajustement sont donnés dans le tableau suivant :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle nœud vert	a	0,465	0,077	6,021	1,48e-08	***
	b	1,156	0,032	35,606	< 2e-16	***
	c	-0,017	0,005	-3,237	0.001	**
Erreur standard résiduelle		0,080	Degrés de liberté		138	
Sign. : '***' 0,001 ; '**' 0,01 ; '*' 0,05						

Figure 55 : Modèle de taux nœud vert en fonction de la hauteur relative résultats de l'ajustement à l'ensemble des arbres

En considérant les valeurs du paramètre AIC ainsi que l'erreur standard résiduelle, on obtient un modèle avec une erreur standard résiduelle de 0,080. Les variations expliquées par ce modèle sont alors de 90%.

L'effet de la hauteur de la couronne de branches vertes est compréhensible, le profil des zones de nœuds étant lié à la remontée du houppier.

(b) Ajout des effets aléatoires

La seconde étape est la construction de la partie aléatoire du modèle, avec l'application d'effets aléatoires parcelles et arbres sur les paramètres du modèle.

Les résultats des ajustements du modèle sont présentés dans le tableau ci-dessous. Les effets fixes expliquent déjà une grande partie de la variabilité. La variabilité résiduelle est partagée entre les effets arbre et la variabilité non expliquée. Il n'y a très peu de variabilité résiduelle liée aux parcelles. Ce résultat peut être lié au faible nombre de parcelles étudiées (uniquement 3).

Paramètre du modèle de surface nœud vert	Valeur estimée	Erreur standard
a	0,449	0,154
b	1,151	0,030
c	-0,016	0,011

Moyenne surface nœud vert	53%
Effectif	141
Coefficient de détermination moyen	0,90
$\sigma^2_{\text{parcelle}}/\sigma^2_{\text{total}}$	2%
$\sigma^2_{\text{arbre}}/\sigma^2_{\text{total}}$	18%
$\sigma^2_{\varepsilon}/\sigma^2_{\text{total}}$	79%

Figure 56 : Synthèse du modèle de variation de la surface de nœud vert en fonction de la hauteur relative

(c) Qualité de l'ajustement du modèle

Les résidus du modèle sont centrés autour de 0 et ne varient pas en fonction des valeurs prédites. Ces résidus sont aussi de distribution normale (Figure 48).

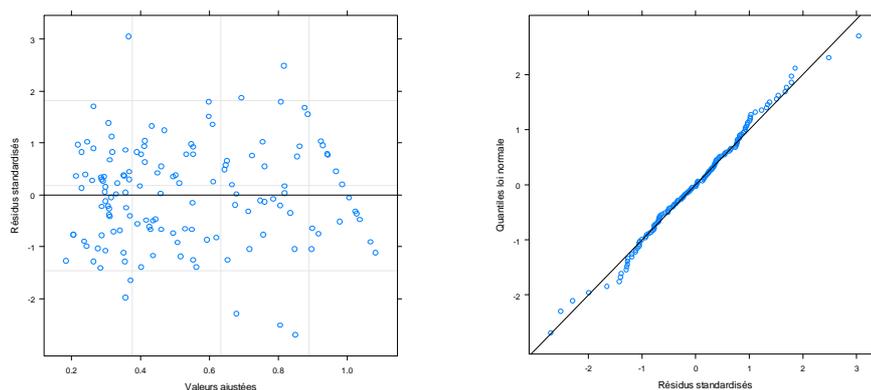


Figure 57 : Contrôle graphique de l'ajustement du modèle de nœud vert : résidus en fonction des valeurs prédites (à gauche) et normalités des résidus (à droite)

Les effets aléatoires sont de distribution normale de moyenne 0 (non présenté).

(3) Parcelles de régénération naturelle

Les données analysées proviennent de 14 parcelles de régénération naturelle. La proportion des zones de différentes natures de nœud intra arbre en fonction de la hauteur relative est donnée sur la Figure 58.

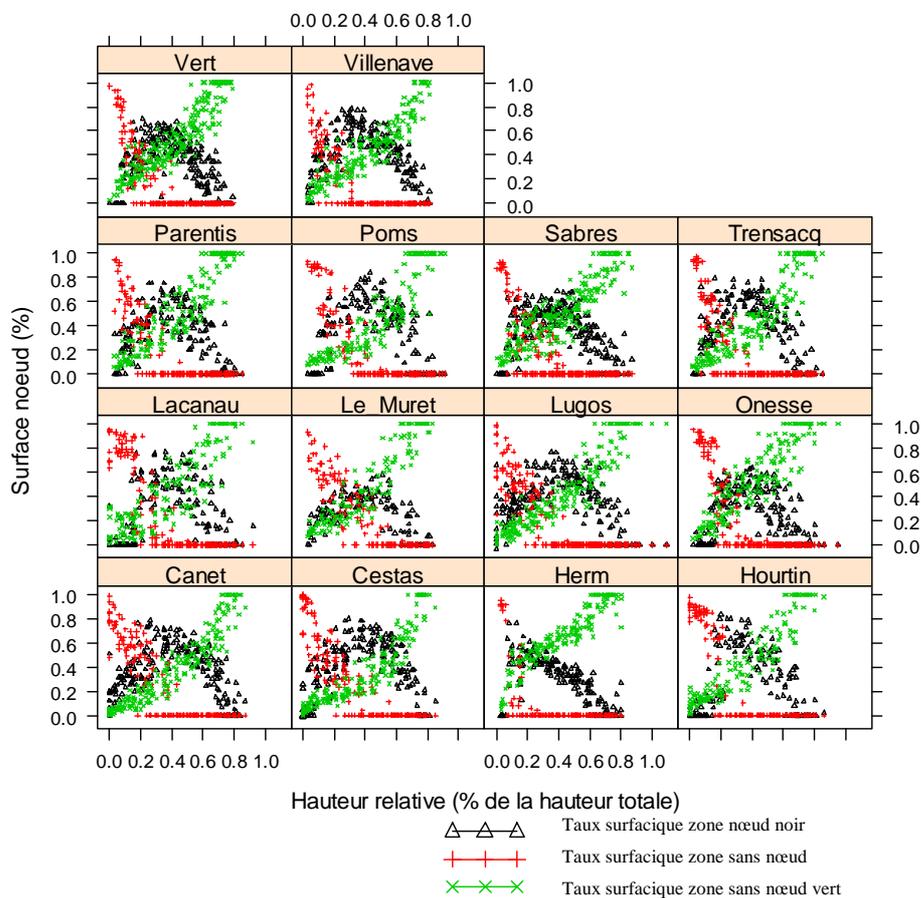


Figure 58 : Surfaces de nœud vert, nœud noir et sans nœud en fonction de la hauteur relative pour les 14 parcelles de régénération naturelle analysées

L'élagage naturel des branches sur ces parcelles de régénération naturelle, a pour conséquence une répartition de la nature des nœuds intra arbre très différente de celle constatée sur les parcelles de ligniculture. Le taux de nœud vert augmente linéairement pour atteindre 100% à une hauteur relative d'environ 80%, le taux de bois sans nœud diminue très rapidement pour s'annuler à une hauteur relative d'environ 20%, et le taux de nœud noir augmente jusqu'à 20% puis diminue jusqu'à s'annuler à 80% de hauteur relative.

(a) Profil de variation de la surface de nœud vert

Le profil de variation du taux de nœud vert en fonction de la hauteur relative est proche du cas des parcelles de ligniculture. Ces variations seront modélisées par un modèle multi linéaire en testant les mêmes variables.

Le graphique ci-dessous donnant le cercle des corrélations entre ces différentes variables, permet d'identifier celles qui concentrent l'essentiel de l'information.

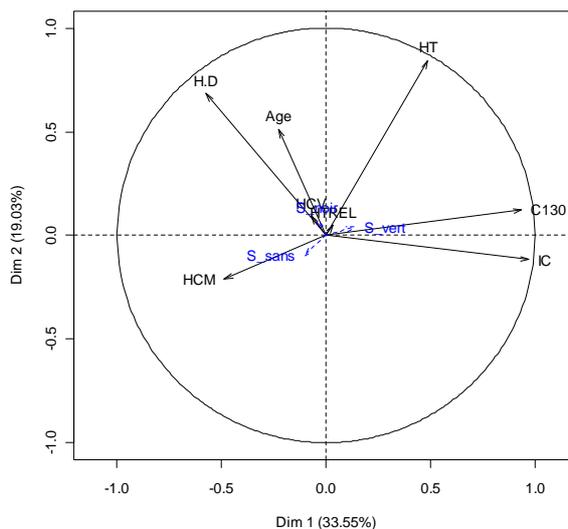


Figure 59 : Cercle des corrélations entre les variables dendrométriques et les surfaces de nœud noir (S_noir), de nœud vert (S_vert) et sans nœud (S_sans) pour les parcelles de régénération naturelle

Une sélection progressive des variables explicatives, nous conduit à retenir HCV comme variable explicative du modèle. On obtient alors le même modèle que pour les parcelles conduites en ligniculture :

$$\text{Surface de noeud vert} = a + b * H_{rel} + c * HCV + \epsilon$$

Les résultats de l'ajustement sont donnés dans le tableau suivant :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle noeud vert	a	0,110	0,022	4,946	8,09e-07	***
	b	1,126	0,011	99,845	< 2e-16	***
	c	-0,124	0,029	-4,246	2,26e-05	***
	Erreur standard résiduelle		0,1346	Degrés de libertés		2539
Sign. : '****' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05						

Figure 60 : Modèle de taux nœud vert en fonction de la hauteur relative, résultats de l'ajustement à l'ensemble des arbres de régénération naturelle

En considérant la valeur du paramètre AIC ainsi que l'erreur standard résiduelle, on obtient un modèle avec une erreur standard résiduelle de 0,1346. Les variations expliquées par ce modèle sont alors de 79,7%.

La variable explicative, la hauteur du premier verticille vert, est la même que celle du modèle ajusté sur les parcelles de ligniculture.

La seconde étape est la construction de la partie aléatoire du modèle. Les résultats des ajustements du modèle sont présentés dans le tableau ci-dessous. La variabilité résiduelle est partagée entre les effets parcelle (30%), arbre (23%) et la variabilité non expliquée.

Paramètre du modèle de surface nœud vertr	Valeur estimée	Erreur standard
a	0,253	0,075
b	1,140	0,020
c	-0,013	-0,004
Moyenne surface nœud vert	48,8%	
Effectif	2542	
Coefficient de détermination moyen	0,80	
$\sigma^2_{\text{parcelle}}/\sigma^2_{\text{total}}$	30,4%	
$\sigma^2_{\text{arbre}}/\sigma^2_{\text{total}}$	23,2%	
$\sigma^2_{\epsilon}/\sigma^2_{\text{total}}$	46,4%	

Figure 61 : Synthèse modèle de variation de la surface de nœud vert

Les résidus du modèle sont centrés autour de 0 et ne varient pas en fonction des valeurs prédites. Ces résidus sont aussi de distribution normale. Les effets aléatoires sont de distribution normale de moyenne 0 (résultats non présentés).

(b) Profil de variation de la surface sans nœud

La surface de bois sans nœud diminue puis s'annule rapidement quand la hauteur relative augmente. Ce profil peut-être décrit par une relation linéaire par intervalle. Un modèle multi linéaire a donc été ajusté sur la partie où la surface de bois sans nœud était non nulle. On obtient le modèle suivant :

$$\text{Surface sans noeud} = a + b * H_{rel} + c * HCM + d * H_{rel} * HCM + \epsilon \quad \text{si } (-a)/(c * HCM + b) > 0$$

$$\text{Surface sans noeud} = 0 \quad \text{si } (-a)/(c * HCM + b) \leq 0$$

Les paramètres du modèle sont résumés dans le tableau suivant :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle surface sans noeud	a	0,73575	0,03962	18,571	< 2e-16	***
	b	-2,61407	0,19395	-13,478	< 2e-16	***
	c	0,21065	0,09656	2,182	0,029378	*
	d	1,65166	0,45656	3,618	0,000313	***
Erreur standard résiduelle		0.1841	Degrés de libertés		978	
Sign. : '***' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05						

Figure 62 : Modèle de taux de bois sans noeud en surface en fonction de la hauteur relative, résultats de l'ajustement à l'ensemble des arbres

L'erreur standard résiduelle est 0,1841. Les variations expliquées par ce modèle sont alors de 64%. Il reste une part importante de variabilité non expliquée. Cela peut être lié à la non connaissance du passé sylvicole de ces arbres issus de régénération naturelle. Certains ont peut être été élagués, d'autres pas, et tous ont connu un élagage naturel. Les critères dendrométriques ne peuvent pas refléter précisément ce passé.

Néanmoins, un critère dendrométriques simple, la hauteur relative de la couronne de branches mortes a été identifié comme ayant une influence sur la surface et donc sur le volume de bois sans noeud. Ce critère est très important car il peut aider les propriétaires et les acheteurs de bois sur pied à mieux estimer la qualité de leurs parcelles. L'influence de ce critère est compréhensible, car la hauteur des premières branches mortes est un indicateur de la vitesse de remontée du houppier. Le même critère a été identifié pour le pin sylvestre comme étant aussi un bon estimateur de la qualité visuelle des sciages issus des billes de pied (Macdonald et al. 2009).

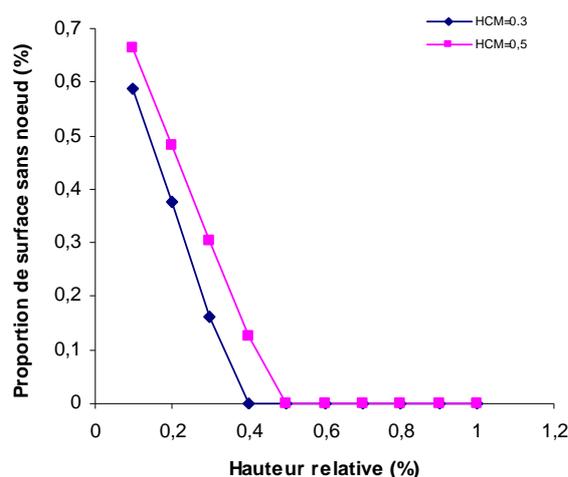


Figure 63 : Exemple de l'influence de la hauteur de la couronne de branches mortes (HCM) sur l'évolution de la proportion de bois sans noeud intra arbre avec la hauteur relative

La seconde étape est la construction de la partie aléatoire du modèle, Les résultats des ajustements du modèle sont présentés dans le tableau ci-dessous. L'effet arbre est plus faible que pour les propriétés analysées auparavant. Le poids des parcelles est important dans la variabilité résiduelle. Cet effet pourrait être lié à l'élagage de la parcelle, élagage dont la réalisation ou non n'est pas connue sur ces peuplements de régénération naturelle.

Paramètre du modèle de surface de bois sans noeud	Valeur estimée	Erreur standard
a	0,729	0,047
b	-2,826	0,186
c	0,267	0,112
d	1,854	0,438
Moyenne surface sans noeud	45%	
Effectif	979	
Coefficient de détermination moyen	0,64	
$\sigma^2_{\text{parcelle}}/\sigma^2_{\text{total}}$	36,7%	
$\sigma^2_{\text{arbre}}/\sigma^2_{\text{total}}$	10,7%	
$\sigma^2_{\text{e}}/\sigma^2_{\text{total}}$	52,6%	

Figure 64 : Synthèse du modèle de variation de la surface de bois sans noeud

Les résidus du modèle sont centrés autour de 0 et ne varient pas en fonction des valeurs prédites. Ces résidus sont aussi de distribution normale. Les effets aléatoires sont de distribution normale de moyenne (résultats non présentés).

Une part importante de la variabilité ne peut pas être expliquée par des effets parcelles ou arbres. Une illustration de cette variabilité résiduelle est donnée sur la Figure 65.

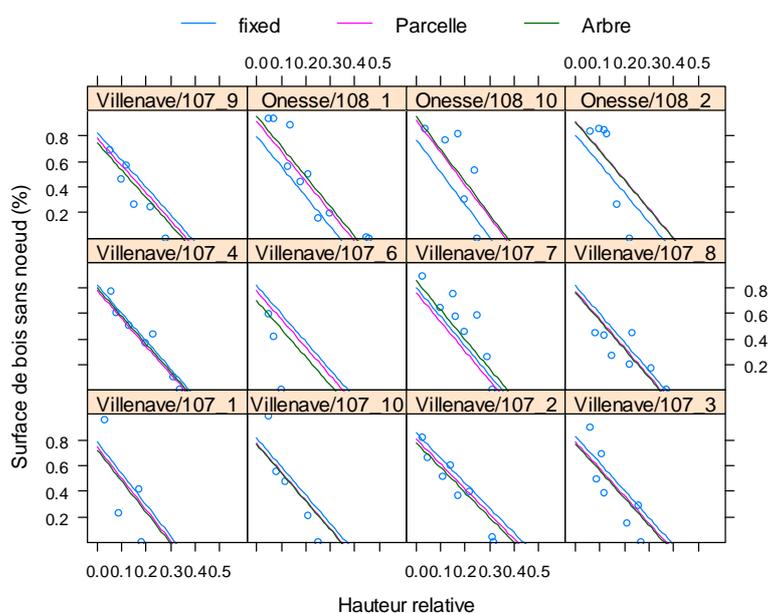


Figure 65 : Taux de bois sans noeud, exemple pour 12 arbres, comparaison valeurs réelles, valeurs modélisées (effets fixes uniquement en bleu ; effets aléatoires parcelles en rouge ; effets arbres en vert)

(c) Profil de la surface de noeud noir

Les variables modélisées étant les taux de surfaces de différentes nature de nœuds intra-arbre en fonction de la hauteur relative, le taux surfacique de nœud noir sera exprimé comme étant le complément à 1, des taux de nœud vert et de sans nœud en surface.

(4) Conclusion

Ces résultats sont intéressants pour estimer le potentiel d'une coupe existante, les modèles sont assez explicatifs (R^2 compris entre 0,64 et 0,9). Il faudrait par contre connaître l'évolution dynamique du houppier en fonction des conditions de croissance pour simuler les zones des différentes natures de nœuds en fonction de la position et de l'état des branches dans le temps. Cette approche dynamique permettrait de connaître plus précisément l'effet de la sylviculture sur la nature des zones de nœuds intra-arbre.

L'approche employée ici, permet d'estimer la nature des zones de nœuds pour un peuplement existant à partir de variables dendrométriques et plus particulièrement de la hauteur de la couronne de branches mortes. Cette approche intéresse plus les gestionnaires et les exploitants forestiers.

iii) Âge de transition bois juvénile bois adulte

L'âge de transition du bois juvénile au bois adulte a été calculé à partir des profils de variation de la densité du bois final en fonction de l'âge cambial.

Pour ces analyses, nous disposons de données mesurées uniquement sur les parcelles conduites en ligniculture. L'âge de transition a été mesuré sur les 14 parcelles analysées, pour 4 arbres sur chaque parcelle et pour 3 niveaux de hauteur : 2,40 m ; 4,80 m et 7,20 m.

Pour des hauteurs supérieures, le nombre de cernes analysés n'était pas suffisant pour déterminer l'âge de transition bois juvénile, bois adulte.

Mode de reboisement	Nombre parcelles	Nb. d'ech. analysés	Nb. de transitions calculées	Âge de transition à 2,40 m	Ecart type 2,4 m	Âge de transition à 4,80 m	Ecart type 4,8 m	Âge de transition à 7,20 m	Ecart type 7,2 m
Ligniculture	14	168	149	8,0	2,57	8,1	2,36	10,5	3,69

Figure 66 : Âge de transition bois juvénile bois adulte pour les 14 parcelles de ligniculture et les 3 niveaux de hauteur analysés

L'âge de transition moyen pour ces 3 hauteurs est de 8,9 ans. Cet âge est plus faible que celui habituellement avancé pour le pin maritime à savoir environ 12 ans, mais est proche des valeurs obtenues par Koubaa et al. (2005) en utilisant la même méthode sur le pin radiata. Cette méthode de détermination reste néanmoins perfectible sur les 168 échantillons analysés, seules 149 transitions ont été calculées, la fonction de calcul « segmented » utilisée n'arrivant pas à ajuster correctement les 2 régressions linéaires, du fait de l'absence d'inflexion dans le profil de variation radial de la densité du bois final.

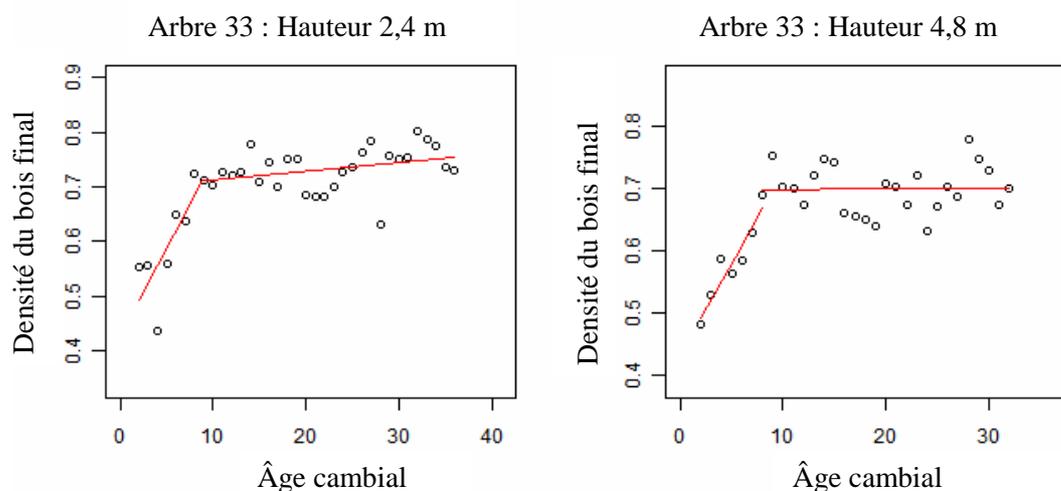


Figure 67 : Exemple de calcul de l'âge de transition pour l'arbre 3 de la parcelle 3 à 2 hauteurs (2,4 m et 4,8 m)

Une analyse de variance de l'âge de transition, réalisée sur les facteurs parcelles et hauteur d'analyse, met en évidence uniquement un effet hauteur.

Source de variation	Df	Mean square	F	Sign.
Parcelle	13	12,341	1,557	ns
Hauteur	2	139,084	17,544	0. 1.395e-07 ***
Parcelle * Hauteur	26	9,491	1,197	ns

Sign. : '***' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05 ; ns non significatif au seuil de 0,05

Figure 68 : Anova de l'âge de transition bois juvénile bois adulte pour les 14 parcelles analysées à 3 niveaux de hauteurs

Cet effet hauteur est inversé par rapport à celui habituellement constaté dans la littérature; l'âge de transition augmente avec la hauteur. Zobel & Sprague (1998) rapportent que l'âge de transition du bois juvénile au bois adulte diminue légèrement avec la hauteur. La zone de bois juvénile intra arbre ayant ainsi plus une forme de cône que de cylindre. Cette différence de résultats provient certainement de la méthode d'identification de la zone de bois juvénile utilisé ici, en ne prenant en compte que les variations de densité.

L'âge de transition calculé sur les 14 parcelles n'est corrélé avec aucune des variables dendrométriques relevées, la vitesse de croissance n'a pas d'effet sur l'âge de transition. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Zobel & Sprague (1998), qui indiquaient qu'en général la présence de bois juvénile n'est pas influencée par la vitesse de croissance ni par des facteurs environnementaux. Le meilleur paramètre pour contrôler le bois juvénile étant la sélection ou la transformation génétique des arbres.

Nous considérons dans la suite de cette étude, que l'âge de transition bois juvénile, bois adulte est fixe et est égal à 9 ans. Cet âge nous permettra en première approche de distinguer pour la présentation des valeurs des propriétés, une zone juvénile de la zone de bois adulte.

iv) Densité intra-cerne

Les variables étudiées sont les densités du bois final (dBF), du bois initial (dBI) et la proportion de bois final (pBF) à l'intérieur d'un cerne en fonction de l'âge cambial. La densité moyenne du cerne (d) peut alors être calculée avec la relation suivante $d = dBI + pBF * (dBF - dBI)$.

Ces caractéristiques ont été mesurées par analyse aux rayons X des échantillons. Les valeurs mesurées sur le premier cerne de tous les échantillons étant très perturbées, elles ont été retirées des analyses statistiques.

Pour cette analyse nous disposons de données mesurées uniquement sur les parcelles conduites en ligniculture.

(1) Densité intra-cerne bois initial et bois final

Le tableau ci-dessous regroupe pour les parcelles conduites en ligniculture les valeurs moyennes de densités intra cerne pour le bois initial et le bois final, pour toutes les hauteurs analysées. En moyenne pour toutes les parcelles, la densité du bois initial est de 0,351 et celle du bois final de 0,660. Les données sont détaillées pour les cernes 1 à 9 (a priori bois juvénile) et les cernes supérieurs.

La densité du bois initial semble stable avec l'augmentation de l'âge cambial contrairement à la densité du bois final dont la valeur moyenne est de 0,613 pour le bois juvénile contre 0,685 pour le bois adulte.

	Nombre de cernes mesurés	dBI	Ecart type dBI	dBF	Ecart type dBF
Ligniculture densité cernes 2 à 9	7 164	0,351	0,040	0,613	0,074
Ligniculture densité cernes supérieurs à 9	13 351	0,351	0,039	0,685	0,072
Ensemble des cernes	20 515	0,351	0,039	0,660	0,070

Figure 69 : Densité intra-cerne bois initial et bois final, parcelles conduites en ligniculture

La **Figure 70**, donne l'évolution des densités mesurées en fonction de l'âge cambial pour les 14 parcelles analysées. Les valeurs sont assez dispersées. On retrouve la relative stabilité de la densité du bois initial et l'augmentation de la densité du bois final. Cette augmentation peut-être rapide puis suivie d'un pallier (parcelles de Campo et des Tucs par exemple), ou continue (parcelles de Machicq et de Mellet par exemple).

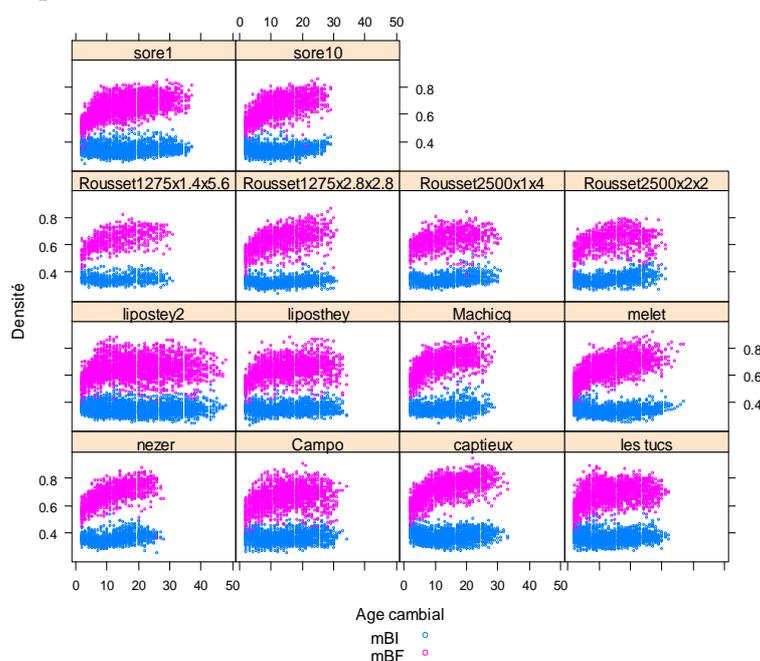


Figure 70 : Densité du bois initial (mBI) et du bois final (mBF) en fonction de l'âge cambial pour l'ensemble des échantillons analysés

La densité du bois initial n'est ni corrélée avec l'âge cambial, ni avec la hauteur dans l'arbre. Pour simplifier la construction du modèle, on la considérera comme constante et égale à la moyenne des échantillons à savoir 0,351. L'erreur standard résiduelle est alors de 0,038.

(2) Construction modèle bois final

Au regard du profil de variation de la densité du bois final en fonction de l'âge cambial (AC) on retient de modéliser ces variations par un modèle multi linéaire à partir des variables dendrométriques utilisées précédemment.

Le graphique ci-dessous donnant le cercle des corrélations entre les différentes variables, permet d'identifier les variables qui concentrent l'essentiel de l'information.

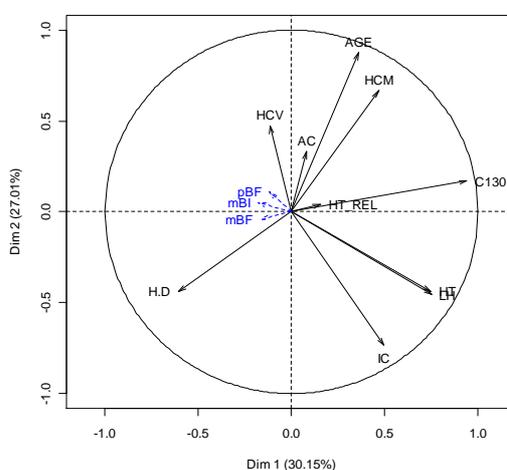


Figure 71 : Cercle des corrélations entre les variables dendrométriques et la densité du bois final intra-cerne pour les parcelles de ligniculture

Une sélection progressive des variables explicatives, nous conduit à sélectionner l'âge cambial, la largeur de cerne et la hauteur relative. On obtient alors :

$$\text{Densité du bois final} = a + b * ac + c * ac^2 + d * ac^3 + e * Ht_{rel} + f * l + \epsilon$$

Avec

ac : âge cambial (année)

Ht_rel : hauteur relative du cerne observé (% de la hauteur totale)

l : largeur du cerne observé (mm)

Les résultats de l'ajustement sont donnés dans le tableau suivant :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle densité bois final	a	5,959e-01	3,811e-03	156,35	<2e-16	***
	b	1,867e-02	5,063e-04	36,87	<2e-16	***
	c	-7,931e-04	2,867e-05	-27,67	<2e-16	***
	d	9,592e-06	4,920e-07	19,49	<2e-16	***
	e	-5,734e-02	2,612e-03	-21,95	<2e-16	***
	f	-6,623e-03	3,278e-04	-20,20	<2e-16	***
Erreur standard résiduelle		0,066	Degrés de libertés		20382	
<i>Sign. : '****' 0.001 ; '***' 0.01 ; '*' 0.05</i>						

Figure 72 : Modèle de densité intra-cerne en fonction de l'âge cambial ; résultats de l'ajustement à l'ensemble des arbres

En considérant le critère AIC ainsi que l'erreur standard résiduelle, on obtient un modèle avec une erreur standard résiduelle de 0,066. Les variations expliquées par ce modèle sont alors de 30%.

L'explication apportée par le modèle est faible. Cela peut être lié à l'absence de données météorologiques dans les données d'entrée, la densité du bois final étant est liée aux paramètres climatiques de la fin de l'été et du début de l'automne (Vieira et al. 2008). La présence de bois de compression dans les échantillons analysés ne peut pas non plus être exclue. Or, la présence de bois de compression provoque des pics de densité qui ne peuvent pas être expliqués par les variables analysées (Lundqvist et al. 2007).

Néanmoins, on note un effet de l'âge cambial, de la hauteur dans l'arbre ainsi qu'un effet largeur de cerne (indépendant de l'âge cambial) sur la densité du bois final.

Cet effet largeur de cerne est assez surprenant et va à l'encontre de la bibliographie ou pour le pin maritime la largeur de cerne n'avait a priori pas d'influence sur la densité. Cet effet est pourtant assez marqué avec une diminution de la densité du bois final de 0,8 à 0,6 en moyenne quand la largeur de cerne augmente de 2 à 10 mm. Cet effet se retrouve sur toutes les parcelles analysées (cf. Figure 73).

La largeur de cerne étant fortement liée aux paramètres météorologiques son impact dans le modèle peut être vu comme une introduction indirecte de l'influence du climat.

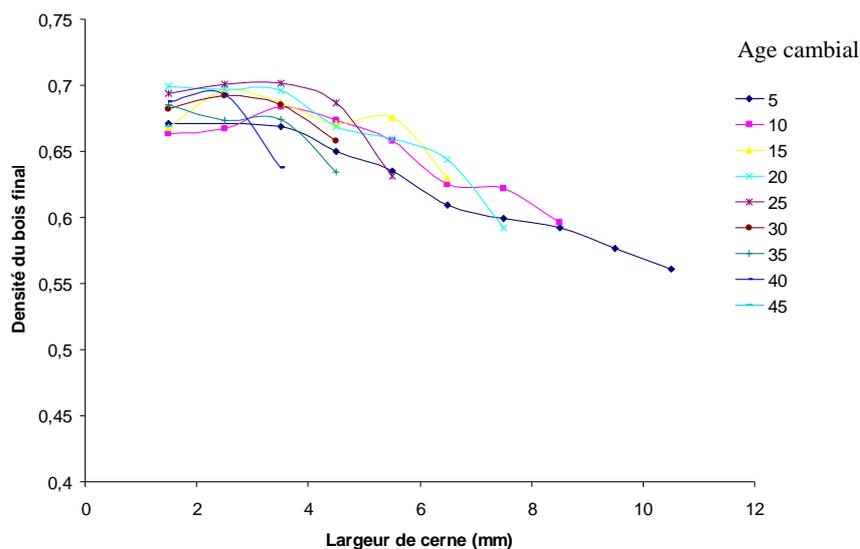


Figure 73 : Densité moyenne du bois final en fonction de la largeur de cerne (mm) pour différents âges cambiaux, pour les 14 parcelles de ligniculture analysées

La seconde étape est la construction de la partie aléatoire du modèle, Les résultats des ajustements du modèle sont présentés dans le tableau ci-dessous. La partie aléatoire n'apporte que peu d'explications de la variabilité résiduelle. 70 % de celle ci reste non expliquée.

Paramètre du modèle de densité du bois final	Valeur estimée	Erreur standard
a	0,593	0,012
b	0,018	4,28e-04
c	-7,68e-04	2,39e-05
d	9,6e-06	4,12e-07
e	-0,049	0,002
f	-0,006	0,001

Moyenne densité bois final	0,660
Effectif	20 356
Coefficient de détermination moyen	0,3
$\sigma^2_{\text{parcelle}}/\sigma^2_{\text{total}}$	13,7%
$\sigma^2_{\text{arbre}}/\sigma^2_{\text{total}}$	16,3%
$\sigma^2_{\text{e}}/\sigma^2_{\text{total}}$	70,0%

Figure 74 : Synthèse modèle de variation de la densité du bois final

Les résidus du modèle sont centrés autour de 0 et ne varient pas en fonction des valeurs prédites. Ces résidus sont aussi de distribution normale. Les effets aléatoires sont de distribution normale de moyenne (résultats non présentés).

(3) Proportion de bois final

Le tableau ci-dessous regroupe pour les parcelles conduites en ligniculture les valeurs moyennes de proportion de bois final (pBF), pour toutes les hauteurs analysées. En moyenne pour toutes les parcelles, la proportion de bois final est de 28,9%. Les données sont détaillées pour les cerne 2 à 9 et les cerne supérieurs.

La proportion de bois final augmente avec l'âge cambial, de 21,4% pour le bois juvénile à 33% pour le bois adulte.

	Nombre de cerne mesurés	de pBF (%)	Ecart type pBF
Ligniculture pBF cerne 2 à 9	7 164	21,4	0,072
Ligniculture pBF cerne supérieurs à 9	13 351	33,0	0,071
Ensemble des cerne	20 515	28,9	0,079

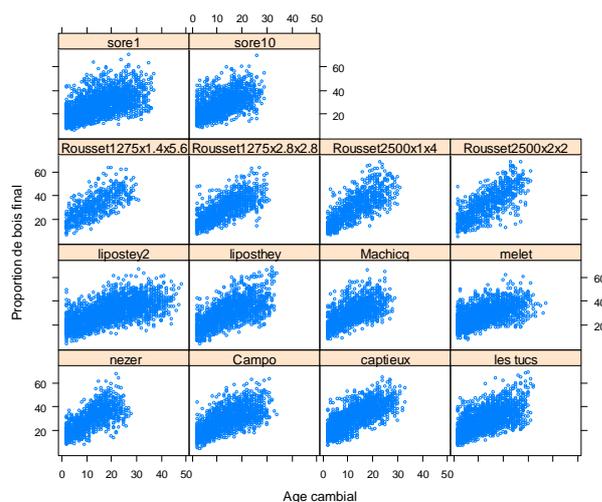


Figure 75 : Proportion de bois final, parcelles conduites en ligniculture

La variable étudiée est le pourcentage de bois final dans le cerne. Pour éviter des problèmes liés aux hypothèses sur la résiduelle (variance résiduelle non homogène, prédiction de pourcentages négatifs) la transformation de variable suivante a été réalisée :

$$\left\{ \begin{array}{l} f : [0;1] \rightarrow \mathbb{R} \\ pBF : \rightarrow f(pBF) = \log\left(\frac{pBF}{1-pBF}\right) \end{array} \right\}$$

Une sélection progressive des variables explicatives, nous conduit à la construction du modèle suivant :

$$f(pBF) = a + b * \log(1/ac) + c * Ht_{rel} + d * \log(l) + \epsilon$$

Avec

ac : âge cambial (année)

Ht_rel : hauteur relative du cerne observé (% de la hauteur totale)

l : largeur du cerne observé (mm)

Les résultats de l'ajustement sont donnés dans le tableau suivant :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle de proportion de bois final	a	-0,636	0,010	-64.61	<2e-16	***
	b	-0,147	0,002	-57.50	<2e-16	***
	c	-0,130	0,007	-19.43	<2e-16	***
	d	-0,074	0,003	-24.79	<2e-16	***
Erreur standard résiduelle		0.1715	Degrés de libertés		19707	
Sign. : '***' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05						

Figure 76 : Modèle de densité de la proportion de bois final en fonction de l'âge cambial ; résultats de l'ajustement à l'ensemble des arbres

L'erreur standard résiduelle du modèle est de 0,1715. Les variations expliquées sont de 42,8%.

L'explication apportée par le modèle est de nouveau assez faible. Cela peut être lié une nouvelle fois à l'absence de données météorologiques dans les données d'entrée.

On constate un effet de la largeur de cerne, avec une diminution de la pBF quand la largeur de cerne augmente. L'augmentation de la largeur de cerne a donc une influence sur la densité du bois final mais aussi sur sa proportion dans le cerne. L'effet hauteur est aussi significatif avec une diminution de la proportion de bois final avec la hauteur relative.

La seconde étape est la construction de la partie aléatoire du modèle, Les résultats des ajustements du modèle sont présentés dans le tableau ci-dessous. Comme pour la densité du bois final, une grande partie de la variabilité résiduelle reste non expliquée.

Paramètre du modèle proportion de bois final	Valeur estimée	Erreur Standard
a	-0,661	0,013
b	-0,156	0,002
c	-0,105	0,007
d	-0,071	0,003
Moyenne proportion bois final	28,9%	
Effectif	19707	
Coefficient de détermination moyen	0.428	
$\sigma^2_{\text{parcelle}}/\sigma^2_{\text{total}}$	3%	
$\sigma^2_{\text{arbre}}/\sigma^2_{\text{total}}$	11%	
$\sigma^2_e/\sigma^2_{\text{total}}$	86%	

Figure 77 : Synthèse modèle de variation de proportion de bois final

(4) Conclusion

Il reste une forte variabilité non expliquée pour les 3 modèles développés ci-dessus, modèles des composantes de la densité du bois (densité bois initial, densité bois final, et proportion de bois final).

Les résultats obtenus sont néanmoins proches de ceux de Wilhelmsson, Arlinger, Spangberg et al. (2002), obtenus sur pin sylvestre sans l'utilisation dans les modèles de données météorologiques.

Les valeurs de densité mesurées sont en accords avec celles mesurées par Dumail et al. (1998) :

- augmentation de la densité moyenne de l'ordre de 20% entre le bois juvénile et le bois adulte,
- mise en évidence d'un effet hauteur faible.

v) Angle du fil

(1) Description des données

La variable étudiée est l'angle du fil par rapport à la moelle en fonction de l'âge cambial.

Pour cette analyse nous disposons de données mesurées uniquement sur les parcelles conduites en ligniculture à 2,4 m pour 4 arbres par parcelle et tous les 2,4 m pour un arbre par parcelle.

Le premier cerne analysé pour tous les échantillons, présente de nombreuses valeurs aberrantes et un effet opérateur significatif. Ces erreurs sont liées à des difficultés de mesure du premier cerne, du fait des faibles dimensions de l'échantillon. Le premier cerne a donc été éliminé des analyses.

	Nombre de cernes mesurés	Angle du fil (°)	Ecart type
Ligniculture angle du fil cernes 2 à 9	700	-6,0	1,9
Ligniculture angle du fil cernes supérieurs à 9	1857	-3,6	2,6
Ensemble des cernes	2557	-4,2	2,7

Figure 78 : Valeurs moyennes d'angle du fil et écart type pour les parcelles de ligniculture à une hauteur de 2,4 m

La **Figure 79** présente les variations radiales de l'angle du fil à une hauteur de 2,40 m pour l'ensemble des parcelles analysées. On constate que l'angle du fil est en moyenne ouvert à gauche (donc négatif par convention). Pour une hauteur fixée, il diminue quand on progresse radialement. L'angle est maximum en valeur absolue proche de la moelle, puis il diminue régulièrement quand on progresse vers l'écorce pour tendre vers 0°, voire vers des valeurs positives.

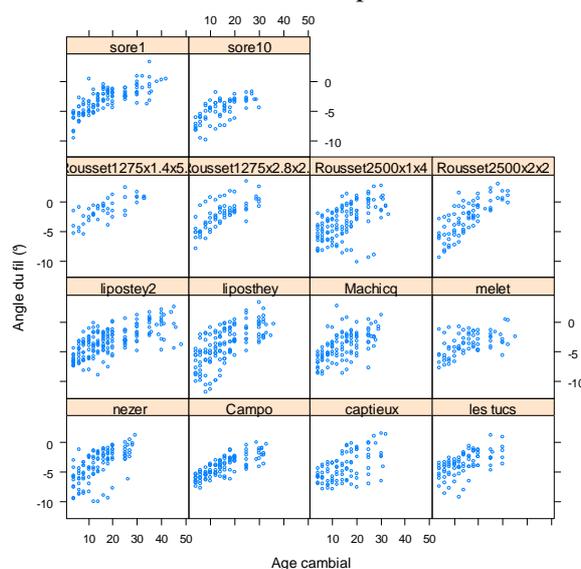


Figure 79 : Evolution radiale de l'angle du fil à une hauteur de 2,40 m pour les parcelles de ligniculture

La figure ci-dessous donne les valeurs moyennes pour toutes les parcelles de l'angle du fil en fonction de la hauteur de prélèvement et de la distance à la moelle. On retrouve l'effet de l'âge cambial et on peut noter l'effet hauteur.

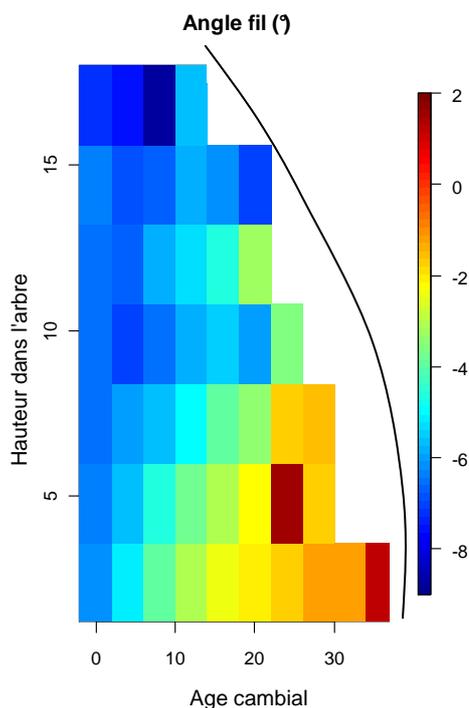


Figure 80 : Angle du fil (°) profil de variation intra-arbre

(2) Construction du modèle

Une sélection progressive des variables explicatives, nous conduit à la construction du modèle suivant :

$$\text{Ange du fil} = a + b * ac + c * Ht_{rel} + \epsilon$$

Avec

ac : âge cambial (année)

Ht_rel : hauteur relative du cerne observé (% de la hauteur totale de l'arbre)

Les résultats de l'ajustement sont donnés dans le tableau suivant :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle angle du fil	a	-5,717	0,111	-51,70	<2e-16	***
	b	0,167	0,005	32,46	<2e-16	***
	c	-4,878	0,241	-20,21	<2e-16	***
Erreur standard résiduelle			2,092	Degrés de libertés	2522	
Sign. : '****' 0.001 ; '***' 0.01 ; '**' 0.05						

Figure 81 : Modèle d'angle du fil intra-cerne en fonction de l'âge cambial ; résultats de l'ajustement à l'ensemble des arbres

Le modèle obtenu a une erreur standard résiduelle de 2,092. Les variations expliquées par ce modèle sont de 41%. Cette faible explication est liée à une grande dispersion des variables entre arbres (Figure 79), dispersion ne pouvant être expliquée par les variables dendrométriques mesurées. Pour certains arbres, l'angle du fil reste élevé quelque soit l'âge cambial. Houllier et al. (1994) avaient trouvé lors de la modélisation de l'angle du fil sur l'épicéa un effet arbre important. L'effet hauteur relative est faible.

La seconde étape est la construction de la partie aléatoire du modèle. Les résultats des ajustements sont présentés dans le tableau ci-dessous. Ils confirment la grande part de la variabilité due aux effets arbres, ce qui rendra très compliquée l'amélioration des modèles d'angle du fil. Il n'y a pas d'effet parcelle.

Paramètre du modèle angle du fil	Valeur estimée	Erreur standard
a	-6,092	0,208
b	0,182	0,008
c	-3,205	0,822
Moyenne angle du fil	-4,45	
Effectif	2301	
Coefficient de détermination moyen	0,41	
$\sigma^2_{\text{arbre}}/\sigma^2_{\text{total}}$	69%	
$\sigma^2_{\varepsilon}/\sigma^2_{\text{total}}$	31%	

Figure 82 : Synthèse modèle de variation de l'angle du fil

b) Propriétés Technologiques : MOE, MOR

Les variables étudiées sont les modules d'élasticité et les modules de rupture en flexion.

Pour cette analyse nous disposons de données mesurées sur les avivés pour les parcelles conduites en ligniculture et sur celles conduites en régénération naturelle de l'étude ex-CTBA.

i) Description des données

Le tableau ci-dessous donne pour l'ensemble des parcelles analysées les valeurs de MOE et MOR. On note un effet important du mode de reboisement, de la distance à la moelle et de la hauteur. Les valeurs de propriétés mécaniques pour les parcelles de régénération naturelle sont systématiquement supérieures à celles des parcelles de ligniculture. Pour une hauteur donnée le MOE et le MOR augmentent radialement, de la moelle vers l'écorce et diminuent avec l'augmentation de la hauteur, de la base vers la cime.

Mode de reboisement	Nombre parcelles	Nombre éch.	MOE moyen 2,4 m	EC MOE moyen 2,4m	MOE moyen 7,2 m	EC MOE moyen 7, 2m	MOR moyen 2,4 m	EC MOR moyen 2,4m	MOR moyen 7,2 m	EC MOR moyen 7, 2m
Régénération naturelle cernes 2 à 9	6	186	13,3	3,9	10,5	2,6	50,4	24,3	34,4	14,3
Régénération naturelle cernes supérieurs à 9	6	218	13,9	2,5	12,0	2,7	59,8	17,6	38,1	20,5
Ligniculture cernes 2 à 9	14	389	8,6	2,8	9,4	2,3	39,2	14,8	32,5	13,6
Ligniculture cernes supérieurs à 9	14	460	10,4	2,5	9,4	2,3	52,4	16,2	36,2	16,7

Figure 83 : MOE (en GPa) et MOR (en MPa) moyen, à 2,5 m, à 7,2 m et écart type (EC)

Les Figure 84 et Figure 85 représentent l'évolution moyenne pour toutes les parcelles analysées du MOE et du MOR en fonction de la hauteur de prélèvement et de la distance à la moelle.

Pour la ligniculture, à la base de l'arbre, le MOE moyen est de 8 GPa au cœur contre 12 GPa pour le 40^{ème} cerne. Au cœur de l'arbre le module varie de 8 GPa à la base, à 5 GPa à 15 m de hauteur. Pour le MOR, le module moyen est de 40 MPa au cœur contre 60 MPa pour le 40^{ème} cerne. Au cœur de l'arbre le module varie de 40 MPa à la base, à 20 MPa à 15 m de hauteur.

Pour les parcelles de régénération naturelle, à la base de l'arbre, le MOE moyen est de 13 GPa au cœur contre 16 GPa pour le 40^{ème} cerne. Au cœur de l'arbre le module varie de 13 GPa à la base, à 8 GPa à

15 m de hauteur. Enfin, pour le MOR, le module moyen est de 52 MPa au cœur contre 82 MPa pour le 40^{ème} cerne. Au cœur de l'arbre le module varie de 52 MPa à la base, à 23 MPa à 15 m de hauteur.

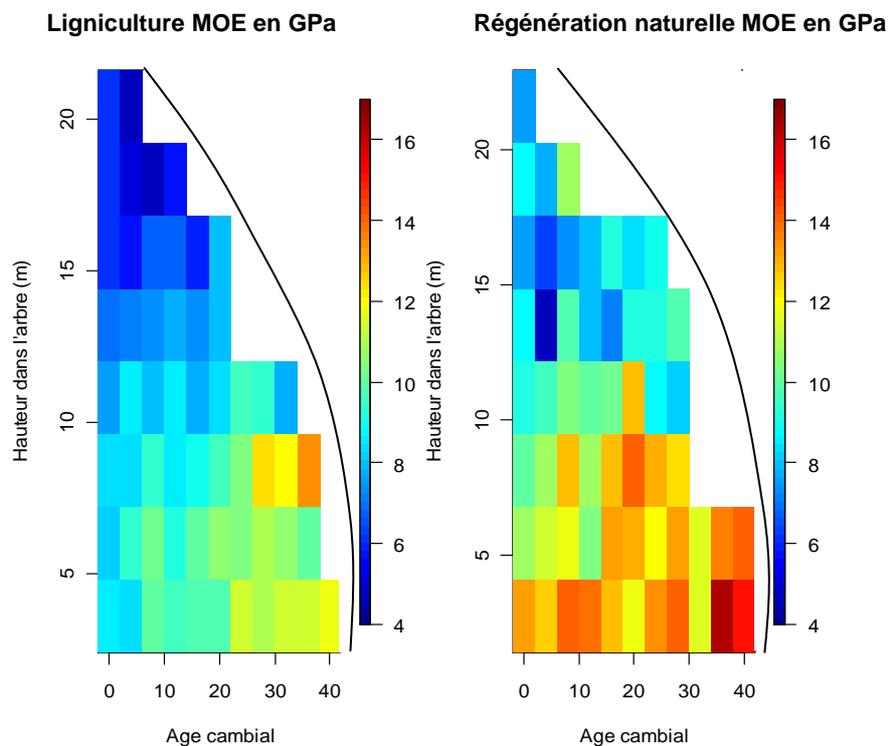


Figure 84 : MOE, profils de variation intra-arbre (toutes parcelles)

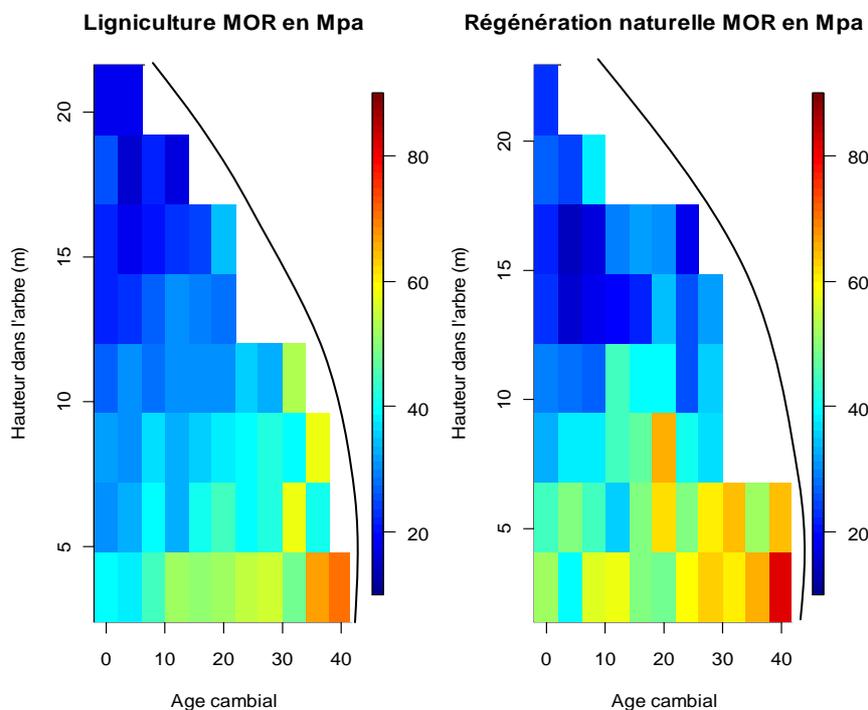


Figure 85 : MOR, profils de variation intra-arbre (toutes parcelles)

ii) Construction des modèles

On retient d'ajuster un modèle multi-linéaire sur l'ensemble des parcelles, régénération naturelle et ligniculture. Les variables communes aux deux études sont les suivantes : âge de l'arbre (AGE), circonférence à 1,30 m (C130), hauteur de prélèvement du billon (prise comme étant la hauteur de l'extrémité fin bout du billon, Ht_prel), largeur de cerne moyenne de l'avivé testé (I), croissance moyenne radiale de l'arbre (IC) et âge cambial (AC).

Une analyse de variance sur les valeurs de MOE et MOR, réalisée sur le facteur élagage, met en évidence que celui-ci n'est pas significatif. Le facteur élagage n'est testé que sur les parcelles de ligniculture, car pour les parcelles de régénération naturelle celui-ci n'est pas connu. Ceci peut expliquer l'absence d'effet, les parcelles de ligniculture étant jeune, la production de bois sans nœud reste faible et donc l'impact de l'élagage limité.

iii) Analyse des corrélations entre variables

La Figure 86 présente le cercle des corrélations entre les différentes variables étudiées.

On peut noter l'existence d'un axe propriétés mécaniques regroupant le MOE, le MOR, l'âge cambial, la largeur de cerne et dans une moindre mesure la hauteur de prélèvement dans l'arbre. L'âge cambial et le MOR sont positivement corrélés et le MOE et la largeur de cerne sont corrélés négativement. L'effet de la hauteur de prélèvement est plus important sur le MOR que sur le MOE

Le deuxième axe est l'axe croissance des arbres regroupant la vitesse de croissance moyenne en circonférence, la circonférence à 1,30 m et l'âge de l'arbre. Plus l'âge est élevé plus la circonférence est forte et aussi plus la vitesse de croissance moyenne est élevée plus la circonférence est l'âge sont faible. Cela reflète que plus les arbres sont coupés jeunes plus leur vitesse de croissance en moyenne est élevée (plus fort poids de la croissance juvénile).

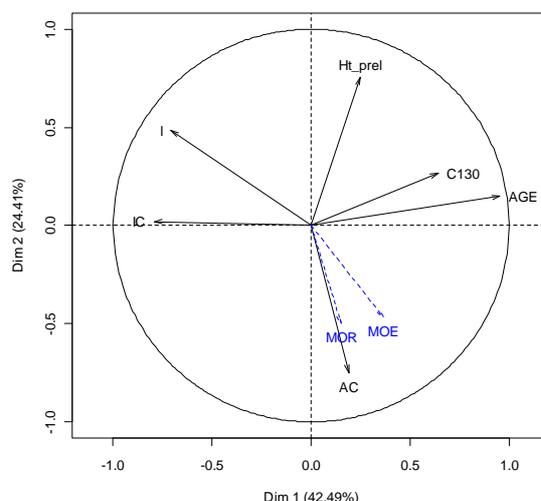


Figure 86 : Cercle des corrélations entre les variables dendrométriques et le MOE et le MOR (en variables supplémentaires) pour les parcelles de ligniculture et de régénération naturelle

iv) Construction modèle de prédiction du MOE

Une sélection progressive des variables explicatives, nous conduit à retenir comme variables la largeur de cerne mesurée sur avivé, l'âge cambial et la hauteur de prélèvement. On obtient alors :

$$\text{MOE} = a + b * Ht_{\text{prel}} + c * ac + d * \ln(l) + \epsilon$$

Avec

ac : âge cambial (année)

l : largeur de cerne moyenne de l'avivé (mm)

Ht_prel : hauteur de prélèvement de l'avivé (m)

Les résultats des ajustements sont donnés dans le tableau ci-dessous :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle MOE	a	16,225	0,406	39,941	< 2e-16	***
	b	-0,206	0,015	-13,975	< 2e-16	***
	c	0,022	0,007	3,141	0,00173	**
	d	-3,529	0,212	-16,610	< 2e-16	***
Erreur standard résiduelle		2,211	Degrés de libertés		1197	
<i>Sign. : '***' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05</i>						

Figure 87 : Modèle de variation du MOE pour l'ensemble des parcelles (ligniculture et régénération naturelle)

L'erreur standard résiduelle est de 2,211, 36% de la variation est ainsi expliquée. La largeur de cerne a donc un effet non négligeable sur le MOE. Le modèle est de la même forme que celui obtenu pour la densité du bois final. L'effet de la largeur de cerne peut expliquer les différences de MOE constatées entre les parcelles de régénération naturelle et celles de ligniculture. La **Figure 88** compare l'évolution de la largeur de cerne en fonction de l'âge cambial pour les parcelles de ligniculture et de régénération naturelle. L'écart de croissance entre ces 2 modes de reboisement est classiquement très marqué durant les premières années, correspondant à l'effet de la fertilisation sur les parcelles de ligniculture.

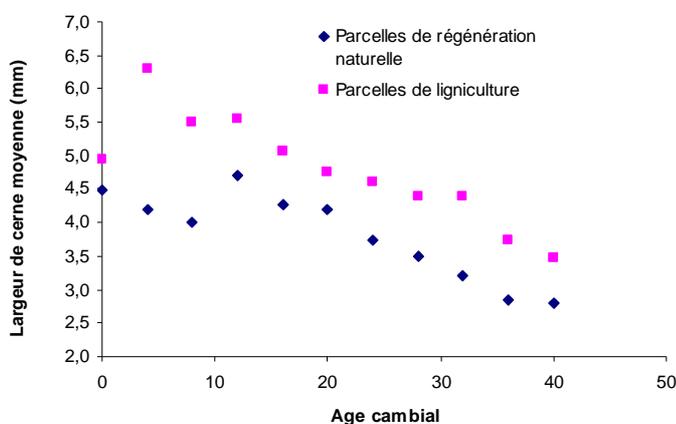


Figure 88 : Largeur de cerne moyenne à une hauteur de 2,40m en fonction de l'âge cambial pour les parcelles de régénération naturelle et de ligniculture

La seconde étape est la construction de la partie aléatoire du modèle, les résultats des ajustements sont présentés dans le tableau ci-dessous. 64% de la variabilité reste non expliquée. Les effets parcelles et arbres sont assez faibles (respectivement 21 et 14%), ce qui laisse des perspectives quant à l'amélioration du modèle.

Paramètre du modèle MOE	Valeur estimée	Erreur standard
a	12,881	0,956
b	-0,254	0,030
c	0,041	0,140
d	-1,282	0,531
Moyenne MOE	9,31	
Effectif	1201	
Coefficient de détermination moyen	36%	
$\sigma^2_{\text{parcelle}}/\sigma^2_{\text{total}}$	21%	
$\sigma^2_{\text{arbre}}/\sigma^2_{\text{total}}$	14%	
$\sigma^2_{\epsilon}/\sigma^2_{\text{total}}$	64%	

Figure 89 : Synthèse modèle de variation du MOE

v) Construction modèle de prédiction du MOR

Une sélection progressive des variables explicatives, nous conduit à retenir un modèle de la forme et avec les mêmes variables que celui utilisé pour le MOE.

$$\text{MOR} = a + b * Ht_{\text{prel}} + c * ac + d * \ln(l) + \epsilon$$

Avec

ac : âge cambial (année)

l : largeur de cerne moyenne de l'avivé (mm)

Ht_prel : hauteur de prélèvement de l'avivé (m)

Les résultats de l'ajustement sont donnés dans le tableau ci-dessous :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle MOR	a	63,483	2,727	23,277	< 2e-16	***
	b	-1,678	0,099	-16,940	< 2e-16	**
	c	0,265	0,047	5,617	2,42e-08	***
	d	-10,876	1,426	-7,625	4,95e-14	***
Erreur standard résiduelle		14.84	Degrés de libertés		1197	
Sign. : '***' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05						

Figure 90 : Modèle de variation du MOR pour l'ensemble des parcelles (ligniculture et régénération naturelle)

L'erreur standard résiduelle est de 14,84, 31% de la variation est ainsi expliquée.

La seconde étape est la construction de la partie aléatoire du modèle, Les résultats des ajustements sont présentés dans le tableau ci-dessous. 88% de la variabilité reste non expliquée, il reste une marge d'amélioration potentielle pour le modèle.

Paramètre du modèle MOR	Valeur estimée
a	55,432
b	-1,822
c	0,284
d	-5,428
Moyenne MOR	36,2
Effectif	1201
Coefficient de détermination moyen	31%
$\sigma^2_{\text{parcelle}}/\sigma^2_{\text{total}}$	4%
$\sigma^2_{\text{arbre}}/\sigma^2_{\text{total}}$	8%
$\sigma^2_{\epsilon}/\sigma^2_{\text{total}}$	88%

Figure 91 : Synthèse modèle de variation du MOR

vi) Construction modèle de prédiction du MOR fractile à 5%

La norme française NF EN 338 qui précise les modes de calcul pour les classes de résistance du bois de structure, indique que le MOR à prendre en compte dans les calculs est le fractile à 5% de la population (MOR5). Pour simuler un classement mécanique structurel des avivés en fonction des scénarios sylvicoles, cette valeur est nécessaire. Pour se rapprocher de cette exigence, le fractile à 5% des valeurs de MOR a été calculé par niveau de hauteur et par distance à la moelle pour l'ensemble des arbres de chaque parcelle. Le nombre d'avivés testés était trop faible pour mener ce calcul arbre par arbre.

Un nouveau modèle a été développé pour prédire le MOR5 en fonction de l'âge cambial de la hauteur dans l'arbre et de paramètres dendrométriques.

Le modèle obtenu est de la forme :

$$\text{MOR5} = a + b * Ht_{\text{prel}} + c * ac + d * \ln(IC) + \epsilon$$

Avec

ac : âge cambial (année)

IC : Accroissement moyen en circonférence (cm)

Ht_prel : hauteur de prélèvement de l'avivé (m)

Les résultats de l'ajustement sont donnés dans le tableau ci-dessous :

		Valeur estimée	Ecart type	t value	Pr(> t)	Sign.
Modèle MOR5	a	43,272	3,246	13,330	< 2e-16	***
	b	-1,169	0,124	-9,407	< 2e-16	***
	c	0,446	0,055	8,152	4.28e-15	***
	d	-11,154	2,779	-4,014	7.07e-05	***
Erreur standard résiduelle		11.27	Degrés de libertés		415	
Sign. : '***' 0.001 ; '**' 0.01 ; '*' 0.05						

Figure 92 : Modèle de variation du fractile à 5% du MOR pour l'ensemble des parcelles (ligniculture et régénération naturelle)

Le modèle obtenu est de la même forme que celui développé pour la moyenne du MOR. Cependant l'impact de la vitesse de croissance n'est plus apporté par le paramètre largeur de cerne, mais par l'accroissement moyen en circonférence.

c) Conclusion

La **Figure 93** ci-dessous regroupe l'ensemble des modèles développés. La provenance des données utilisées pour la construction des modèles est indiquée par une lettre : R pour régénération naturelle et L pour ligniculture.

L'âge cambial et la hauteur relative ont une influence importante sur les paramètres mesurés ce qui était attendu d'après la littérature. Par contre, l'influence de la vitesse de croissance sur la densité du bois et les propriétés mécaniques est un élément nouveau pour le pin maritime. Les données de la littérature, montraient plutôt un non impact de la vitesse de croissance sur ces propriétés.

Certains modèles ont une bonne prédiction, comme le duramen et la nature des nœuds. A contrario les modèles de propriétés mécaniques sont moins bons la variabilité résiduelle est très importante. Il y a un potentiel d'amélioration des ces modèles.

La variabilité non expliquée par les modèles de duramen et d'angle du fil est pour 70% liée à des effets arbres indépendants. Il n'y a pas d'effet parcelle. Ces modèles seront donc difficiles à améliorer. Pour la nature des nœuds, la décomposition de la variabilité non expliquée dépend du mode de régénération. Elle est principalement liée aux arbres pour les parcelles de ligniculture, cela étant peut être lié au faible nombre de parcelles utilisées. Elle est plus liée aux parcelles pour les parcelles de régénération naturelle dont l'élagage n'est pas connu.

Même si la prédiction de certains modèles est assez faible, ils seront utilisés dans la partie suivante, pour simuler la qualité du bois produits par différents scénarios sylvicoles et les comparer ainsi entre eux.

Modèles	Type de peuplement	Variables utilisées							R ² moyen	$\sigma^2_{parcelle}/\sigma^2_{total}$	$\sigma^2_{arbre}/\sigma^2_{total}$	$\sigma^2_{\epsilon}/\sigma^2_{total}$
		Âge	Acc. radial moyen	Âge cambial	Ht_rel / Ht_prel	Lg cerne	H C V	H C M				
Duramen	R/L	x			x				0,73	0	74%	26%
Surface nœuds verts	L				x			x	0,90	2%	18%	79%
Surface nœuds verts	R				x			x	0,80	30%	23%	46%
Surface sans nœud	R				x			x	0,64	37%	11%	52%
Angle du fil	L			x	x				0,41	0%	69%	31%
Densité bois final	L			x	x	x			0,30	14%	16%	70%
Proportion de bois final	L			x	x	x			0,43	3%	11%	86%
MOE	R/L			x	x	x			0,36	21%	14%	64%
MOR	R/L		x	x	x				0,31	4%	8%	88%

Figure 93 : Bilan des modèles développés

d) Introduction de nouvelles variables dans les modèles

Les modèles développés précédemment, sont basés sur l'âge cambial, la hauteur relative dans l'arbre et sur des variables dendrométriques telles que largeur de cerne ou les hauteurs de branches. La limitation à ces variables dendrométriques est liée à la volonté de pouvoir utiliser ces modèles pour estimer l'impact de la sylviculture sur les propriétés du bois. Néanmoins la précision des modèles est potentiellement améliorable en utilisant d'autres variables. Ainsi, pour les propriétés mécaniques du bois (MOE et MOR), les caractéristiques suivantes ont été aussi mesurées : masse volumique des sciages, largeur des cernes, diamètre du plus gros nœud sur les faces et les rives.

L'introduction de ces nouvelles variables, peut permettre d'estimer la précision du classement visuel des sciages tel qu'il est pratiqué actuellement en scierie. La précision supplémentaire apportée par les variables dendrométriques utilisées précédemment peut alors être calculée et l'amélioration potentielle du classement visuel estimée. Ainsi des nouveaux modèles, combinaison linéaire de variables, ont été établis pour le MOE et le MOR.

i) MOE et nouvelles variables

Dans un premier temps la construction des modèles est réalisée en utilisant uniquement des variables utilisées dans le classement visuel structure des sciages : la largeur des cernes, le diamètre maximal des nœuds sur les faces et les rives des avivés. Les variables dendrométriques hauteur de prélèvement et distance de la moelle sont ensuite ajoutées et enfin un modèle complet avec la masse volumique des planches est établi. La distance de la moelle est utilisée en remplacement de l'âge cambial qui ne peut pas être connu en scierie. Les données sont regroupées dans la **Figure 94**.

Les variables largeur de cerne et diamètre maximal des nœuds sur les faces et rives permettent d'estimer 33% de la variabilité. Cette valeur assez faible, peut venir du fait que dans le classement visuel structure, tel que définit par la norme NF B 52-001, d'autres variables sont utilisées (nombre de nœud, fentes, poche de résine, pente de fil, écorce,...). Néanmoins l'ordre de grandeur est celui habituellement rencontré lors du classement visuel du pin maritime.

En ajoutant des variables dendrométriques, la hauteur dans l'arbre et la distance de la moelle, on obtient un R^2 pour la prédiction du MOE de 0,40 et en ajoutant la masse volumique un R^2 de 0,46. L'amélioration de la prédiction est donc nette, particulièrement grâce à l'ajout de la masse volumique.

Modèles	Variables utilisées						Erreur standard résiduelle	DDL	R ² moyen
	Diamètre maxi nœud face	Diamètre maxi nœud rive	Largeur de cerne	Distance moelle	Ht. Prélèv.	Masse volumique			
MOE variables classement visuel							2,02	825	0,33
MOE variables classement visuel + dendrométriques							1,912	823	0,40
MOE variables classement visuel + dendrométriques + MV							1,812	822	0,46

Figure 94 : MOE – Introduction de nouvelles variables

ii) MOR et nouvelles variables

Le même traitement a été réalisé pour le module de rupture. Les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Modèles	Variables utilisées						Erreur standard résiduelle	DDL	R ² moyen
	Diamètre maxi nœud face	Diamètre maxi nœud rive	Largeur de cerne	Âge cambial	Ht_prel	Masse volumique			
MOR variables classement visuel							13,85	825	0,35
MOR variables classement visuel + dendrométriques							12,9	823	0,44
MOR variables classement visuel + dendrométriques + MV							12,5	822	0,48

Figure 95 : MOR – Introduction de nouvelles variables

La prise en compte du diamètre des nœuds dans les modèles, les améliore fortement. Par rapport au modèle développé précédemment, basé uniquement sur des variables dendrométriques, l'ajout du diamètre maximal des nœuds de faces et des nœuds de rives, permet d'expliquer 44% de la variabilité. Avec l'ajout de la masse volumique on atteint un R² de 0,48.

iii) Conclusion

En scierie, la connaissance de la hauteur de prélèvement des billons, de la position des sciages par rapport à la moelle et de leur masse volumique permet d'obtenir un niveau de prédiction de la qualité mécanique des sciages bien supérieur à celui obtenu, par l'application d'un classement visuel structurel.

La mise en place d'une traçabilité des billons jusqu'en scierie, permettant de connaître la hauteur de prélèvement du billon scié, couplée à une simple pesée des planches pour connaître leur masse volumique, permet d'approcher les résultats des machines de classement automatiques les plus anciennes utilisées dans certaines scieries. Néanmoins, la mesure de la masse volumique des sciages doit être réalisée sur des sciages secs, ce qui est assez contraignant pour de nombreux scieurs.

Le classement restera toujours moins bon que celui réalisé avec les meilleures machines de classement qui utilisent actuellement des capteurs à rayon X, des mesures vibratoires et des mesures visuelles des sciages. Néanmoins pour le classement d'un faible volume de sciage, cette méthode peut représenter une bonne alternative pour un coût faible.

4) CAS CONCRETS D'UTILISATION DES MODELES DEVELOPPES

a) Impact de scénarios sylvicoles contrastés sur la qualité des sciages produits

i) Scénarios sylvicoles retenus (contexte reconstitution)

Trois scénarios sylvicoles ont été retenus. Ils sont issus des travaux d'un groupe de travail d'experts forestiers aquitains. Ces experts s'étaient réunis, sous l'égide du GIP ECOFOR, suite à la tempête de janvier 2009, pour définir les scénarios sylvicoles à employer pour reconstituer le massif Aquitain. Leurs travaux ont abouti à la publication de 6 scénarios : un scénario haute qualité à révolution longue et croissance modérée, un scénario standard classiquement appliqué sur le massif avant la tempête, deux scénarios courtes révolutions avec une coupe rase comprise entre 25 et 30 ans et enfin deux scénarios biomasse.

Quelle que soit la nature de ces scénarios, ils visent tous à répondre à quatre critères essentiels :

- une espérance de gain pour le sylviculteur,
- une certaine réversibilité pour s'adapter à des situations économiques fluctuantes,
- une recherche de la limitation des risques face aux catastrophes climatiques,
- la possibilité de conserver ou d'introduire de la diversité dans les peuplements.

Parmi les 6 scénarios développés, 3 scénarios sont étudiés ici, ceux destinés à produire du bois d'œuvre : le scénario haute qualité, le scénario standard et un des scénarios courte révolution. Les données sylvicoles des différents scénarios sont regroupées ci-dessous.

	Haute Qualité	Standard	Courte révolution
Âge de coupe rase	52	44	34
Objectif de production	Bois d'œuvre de qualité	Bois d'œuvre	Petits sciages
Volume unitaire à la coupe rase	1,56 m ³	1,24 m ³	0,74m ³
Circonférence à 1,30 m	132 cm	122 cm	102 cm
Hauteur totale	26,2 m	24,3 m	20,9 m
Accroissement en circonférence moyen	2,5 cm / an	2,8 cm / an	3,0 cm / an
Nombre d'éclaircie	5	4	3

Figure 96 : Scénarios sylvicoles étudiés adapté d'après (ECOFOR 2009)

La **Figure 97**, donne l'évolution de la largeur de cerne à 1, 30 m pour les différents scénarios.

La vitesse de croissance initiale est identique pour les 3 scénarios. Ces scénarios sont basés principalement sur une méthode de reboisement artificielle, d'où des croissances initiales très proches. La différenciation se fait ensuite sur l'âge à la coupe rase et le nombre d'éclaircies.

Ces scénarios se veulent flexibles. Aussi, le scénario de base est identique puis à partir de 20 ans environ, soit une éclaircie est réalisée et l'étape suivante est la poursuite du scénario vers une nouvelle éclaircie, soit aucune éclaircie n'est réalisée et le peuplement évolue vers la coupe rase.

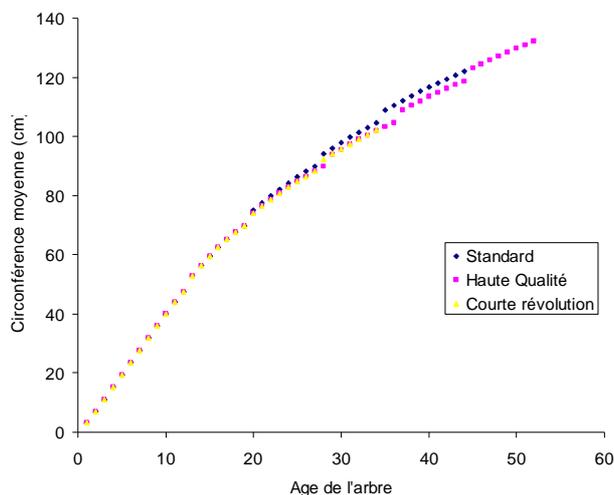


Figure 97 : Circonférence moyenne à 1,30 m en fonction de l'âge pour les 3 scénarios étudiés

La forme de l'arbre à la coupe rase est simulée en appliquant l'équation de forme établie par Najjar (2001) pour du pin maritime conduit en ligniculture. Cette équation (propriété du FCBA) donne la circonférence sous écorce à une hauteur donnée, à partir de la hauteur totale de l'arbre et de la circonférence à 1,30 m.

Enfin, la hauteur de la couronne de branches vertes qui intervient dans les modèles de nature des noeuds a été calculée pour chaque scénario en utilisant l'équation établie par Battle (2007).

$$\text{Hauteur couronne branches vertes} = 8,947 + 0,201 * AGE + 0,805 * HT - 4,040 * \ln(C130) + \epsilon$$

Pour chaque scénario, les paramètres dendrométriques de l'arbre moyen lors de la coupe rase sont ainsi décrits.

ii) Simulation billonnage et sciage des arbres

Les différents modèles établis dans la partie précédente sont appliqués à l'arbre moyen lors de la coupe rase pour chaque scénario. Les variations des propriétés en fonction du rayon et de la hauteur sont ainsi connues. Cet arbre moyen est alors virtuellement billonné puis scié. Le classement des produits obtenus est ensuite réalisé par billon, permettant de connaître la qualité potentielle du billon. Ce classement est important en Aquitaine, les industriels achetant principalement les arbres billonnés, en courte longueur, regroupés par qualité.

Le billonnage des arbres a été simulé pour des longueurs de 2,40 m correspondant à une dimension habituellement utilisée en Aquitaine et jusqu'à un diamètre sous écorce fin bout de 14 cm.

La simulation du sciage des billons est réalisée à l'aide du logiciel Optiscie (édité par P. Mauchamp). Les dimensions des avivés débités sont de 40x100x2400 mm. Le débit est réalisé en tournant autour du billon. Le logiciel optimise la découverte (épaisseur de la dosse, non sciée), en fonction du diamètre des billons. La courbure des billons n'est pas prise en compte.

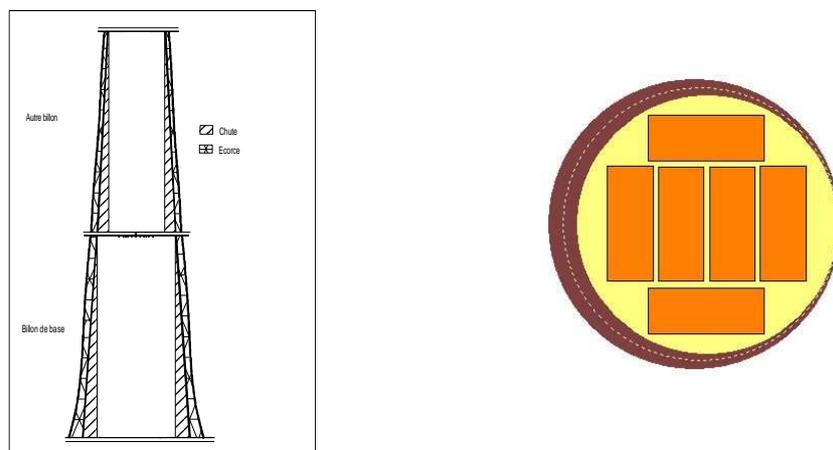


Figure 98 : Représentation schématique du billonnage et du sciage par débit tournant de l'arbre simulé

iii) Propriétés technologiques des produits

(1) Duramen

La répartition du duramen intra arbre a été simulée pour les 3 scénarios sylvicoles retenus.

La **Figure 99**, donne une illustration de la répartition du duramen intra arbre pour l'arbre moyen à la coupe rase des 3 scénarios,

L'effet de l'âge sur la proportion de duramen est marqué en particulier pour les billons de base. La diminution de l'âge de la coupe rase entraînant une diminution de la proportion de bois duraminisé.

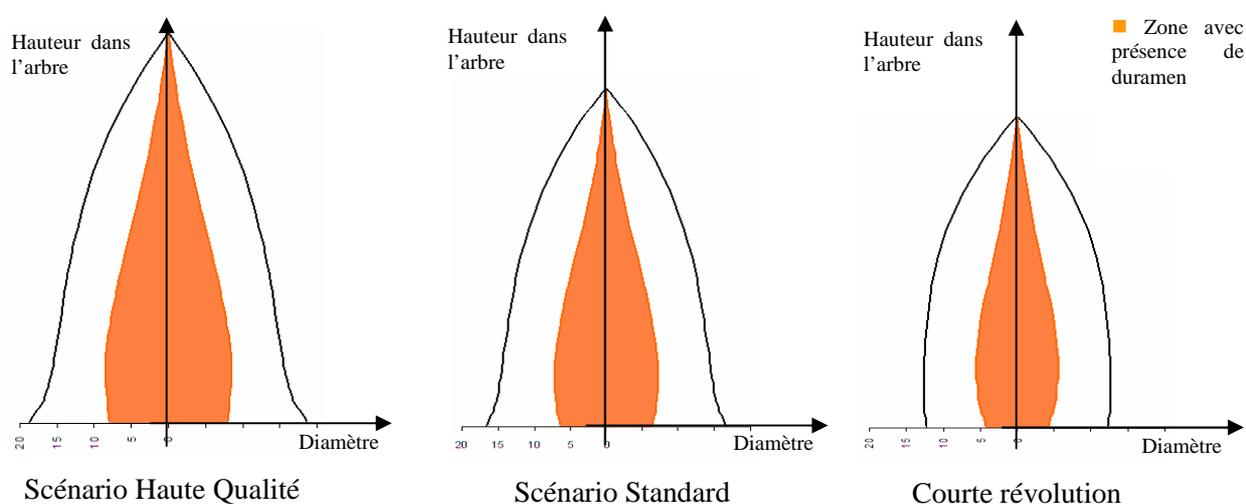


Figure 99 : Duramen, représentation schématique du profil de l'arbre simulé pour les 3 scénarios

Après conversion des arbres en billons, puis en avivés, l'application du modèle permet d'estimer la proportion d'avivés avec et sans duramen. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

	Hauteur de prélèvement du billon (m)							Moyenne arbre
	0 -2,4	2,4 - 4,8	4,8 - 7,2	7,2 - 9,6	9,6 - 12	12 - 14,4	14,4 -16,8	
Haute qualité	26%	30%	33%	24%	18%	14%	10%	25%
Standard	22%	25%	27%	18%	14%	10%	7%	19%
Courte rotation	18%	19%	20%	12%	8%	5%	Non sciable	15%

Figure 100 : Taux d'avivés avec duramen pour les 3 scénarios après simulation du sciage des billons

Les parties périphériques des billons, les dosses constituées d'aubier, sont principalement transformées en plaquettes. La proportion d'avivés avec du duramen est donc légèrement plus élevée que le taux

surfaccique calculé sur les sections. Plus de 30% des sciages pour les deuxième et troisième billons du scénario haute qualité sont duraminisés. On note l'impact de l'âge de la coupe rase avec des taux plus faibles pour le scénario courte rotation mais aussi l'impact particulier du profil du duramen avec des taux plus élevés dans les deuxième billons que dans les premiers. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus par Pinto et al. (2005) sur du pin maritime ou les taux de sciages duraminisés étaient les plus importants dans les deuxième et troisième billons. Les utilisations actuelles du pin maritime (lambris, parquet, charpente,...), ne prennent pas en compte la présence ou l'absence de duramen. Néanmoins, les projets d'utilisation futurs du pin maritime, chimie verte par exemple, nécessiteront peut être un taux d'extraits et donc un taux de duramen élevé. L'impact de l'âge de rotation sera ainsi à prendre en compte.

(2) Nature des nœuds intra arbre

Les zones de différentes natures de nœuds ont été simulées. Le modèle utilisé est celui établi à partir des données des parcelles conduites en ligniculture non élaguées. D'après ce modèle, il n'y a pas de production de bois sans nœud. L'influence des différents scénarios, se fait donc sur la proportion de nœud noir qui augmente avec l'âge de la coupe rase.

Le modèle établi pour les parcelles de régénération naturelle, n'est pas adapté, même pour le scénario haute qualité, car il a été construit avec des données de parcelles qui ont été peut être élaguées. Son utilité est surtout de mettre en évidence l'existence d'un critère prédictif de la présence de bois sans nœud, la hauteur de la première branche morte.

Néanmoins, la non simulation de bois sans nœud par le scénario haute qualité, n'est pas totalement satisfaisante. Il faudrait analyser des parcelles plus anciennes de ligniculture et contrôler l'absence de bois sans nœud.

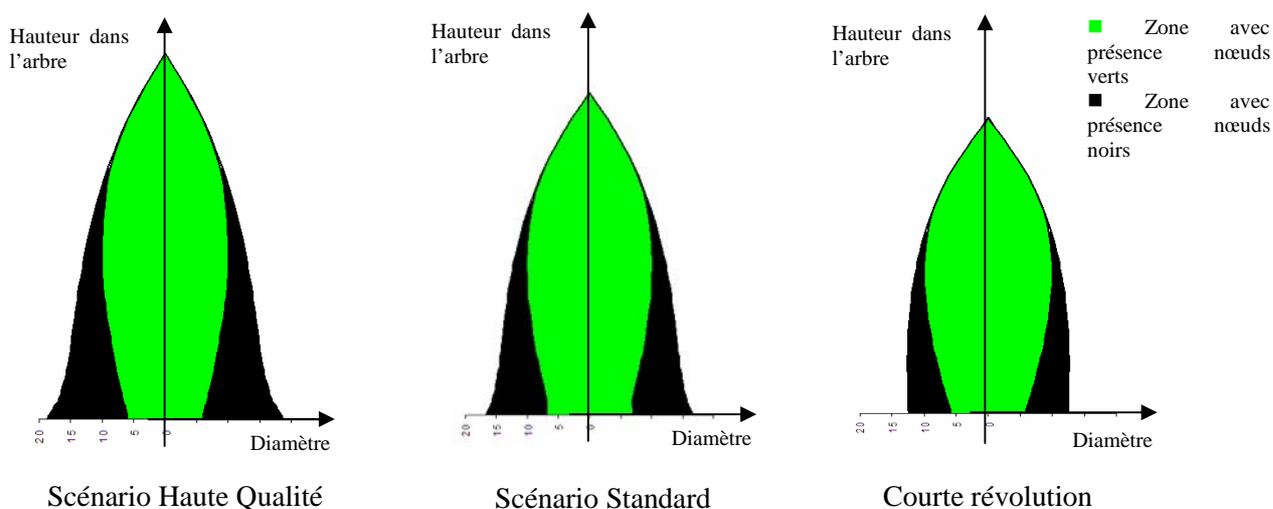


Figure 101 : Nature des nœuds, représentation schématique du profil de l'arbre simulé

Après conversion des arbres en billons, puis en avivés, l'application du modèle permet d'estimer la proportion d'avivés avec présence de nœuds verts et nœuds noirs.

		Hauteur de prélèvement du billon (m)								Moyenne arbre
		0 -2,4	2,4 4,8	- 4,8 7,2	- 7,2 9,6	- 9,6 12	- 12 14,4	- 14,4 16,8	-	
Haute qualité	Taux NN	86%	77%	66%	54%	40%	24%	0%	60%	
	Taux NV	14%	23%	34%	46%	60%	76%	100%	40%	
Standard	Taux NN	80%	71%	59%	45%	29%	9%	0%	50%	
	Taux NV	20%	29%	41%	55%	71 %	91%	100%	50%	
Courte rotation	Taux NN	78%	65%	49%	31%	8%	0%	Non	47%	
	Taux NV	22%	35%	51%	69%	92%	100%	sciable	53%	

Figure 102 : Taux de sciages avec nœuds noirs (NN) et noeuds verts (NV) pour les 3 scénarios étudiés

La présence de nœuds noirs sur les avivés est très déclassante, ces nœuds non adhérents, se détachant de la pièce lors des opérations de rabotage.

On constate que le scénario haute qualité est celui qui présente le taux d'avivés avec des noeuds noirs le plus important. Ainsi d'après cette simulation, en ne considérant que la nature des nœuds, le scénario haute qualité est celui de moindre qualité. Par opposition, les scénarios à courte révolution, produisent plus de sciage avec nœuds verts, nœuds adhérents, et peuvent être potentiellement plus intéressants pour l'industrie.

Ces résultats doivent être nuancés. D'une part le diamètre des nœuds n'est pas pris en compte, alors que l'impact est important dans le classement d'aspect des sciages. D'autre part, on considère ces parcelles non élaguées. Or même si cette opération n'est actuellement plus pratiquée sur le massif aquitain, elle sera peut être réalisée pour ce scénario haute qualité, permettant ainsi la production de bois sans noeud.

Enfin le modèle a été développé à partir de parcelles conduites en ligniculture, d'âge maximal de 39 ans. On ne connaît pas l'occurrence ou non d'un élagage naturel sur des vieux peuplements conduits en ligniculture comme ceux simulés ici (coupe rase à 52 ans). Néanmoins même si un élagage naturel se produit, il sera tardif (après 40 ans) et le bois sans nœud produit sera localisé dans les dosses et donc a priori non transformé en sciages.

(3) Angle fil

La **Figure 103**, donne une illustration, pour l'arbre moyen à la coupe rase, des variations intra arbre de l'angle du fil en fonction de l'âge cambial et de la hauteur.

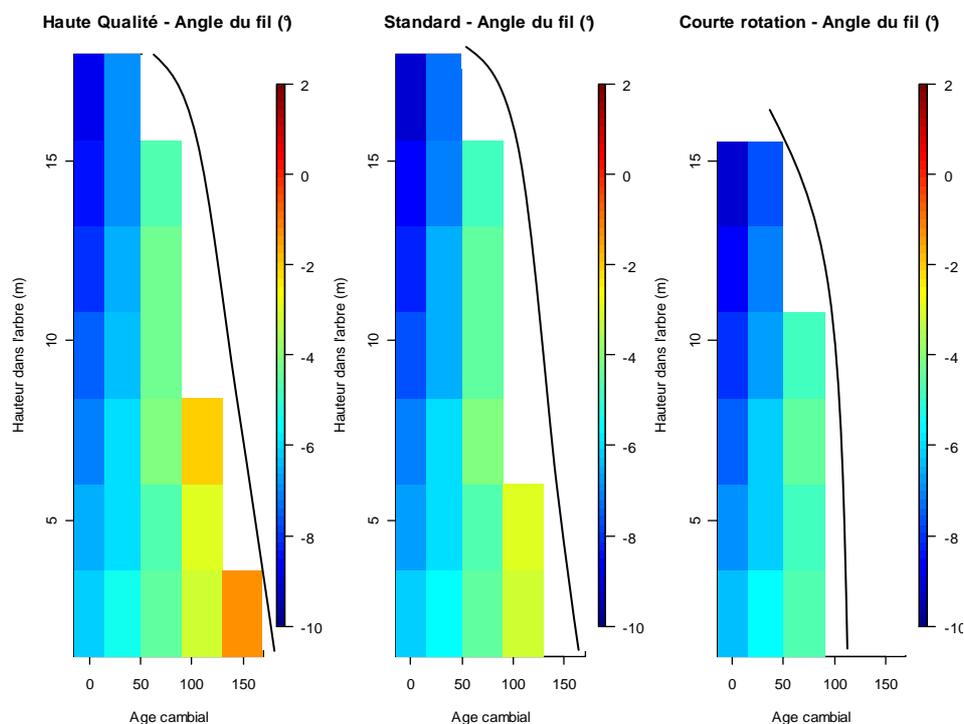


Figure 103 : angle du fil, représentation schématique du profil de l'arbre simulé pour les 3 scénarios

L'impact du scénario sylvicoles est fort, avec pour le scénario courte rotation des valeurs d'angle du fil inférieure à -4° pour l'ensemble de l'arbre, alors que pour le scénario haute qualité, le bois produit en périphérie, à un angle du fil ouvert, supérieur à -2° .

Le billonnage et le sciage ont été simulés et les avivés ont été classés en 2 catégories : angle du fil inférieur ou supérieur à -8° .

Cette limite a été fixée d'après Kliger & Johansson (2004), qui ont constaté sur épicéa que 89% des avivés avec un angle du fil inférieur à -8° étaient déclassés suite à un gauchissement trop important après séchage.

		Hauteur de prélèvement du billon						Moyenne arbre	
		0 -2,4	2,4 - 4,8	4,8 - 7,2	7,2 - 9,6	9,6 - 12	12 - 14,4		14,4 - 16,8
Haute qualité	Angle moy. :	-2,9°	-4,0°	-3,3°	-5,0°	-5,0°	-5,5°	-7,2°	-4,1°
	Angle <-8° :	0%	0%	0%	0%	5%	5%	16%	3%
Standard	Angle moy. :	-4,0°	-4,0°	-4,8°	-5,1°	-5,2°	-5,7°	-7,6%	-4,8°
	Angle <-8° :	0%	0%	0%	0%	5%	5%	16%	3%
Courte rotation	Angle moy. :	-4,9°	-5,3°	-5°	-5,5°	-7,3°	-7,8°	Non	-5,35°
	Angle <-8° :	0%	0%	0%	5%	6%	100%	sciable	13%

Figure 104 : angle du fil moyen par billon et taux de sciage avec un angle inférieur à -8° pour les 3 scénarios sylvicoles analysés

Pour le scénario courte rotation, le taux de pièces avec un angle du fil inférieur à -8° est important pour des hauteurs supérieures à 7,20 m. 100% des sciages issus des billons façonnés à des hauteurs supérieures à 12 m ont un angle du fil inférieur à -8°. Pour les scénarios haute qualité et standard, les proportions de sciage avec un angle du fil inférieur à -8° restent faibles jusqu'à une hauteur de 14 m. Des programmes de séchage adaptés devront être employés. Nyström (2003), a montré sur pin sylvestre que le tri des sciages en fonction des valeurs d'angle du fil, puis un séchage sous chargement des avivés avec un angle du fil élevé (application d'une masse élevée sur la pile), permettait de réduire fortement les déformations.

(4) Module d'élasticité en flexion (MOE)

La **Figure 105**, donne une illustration des variations intra arbre du MOE en fonction de l'âge cambial et de la hauteur intra arbre.

On retrouve l'impact positif de l'âge cambial avec des valeurs de MOE élevées pour les sciages éloignés de la moelle. Ainsi, le scénario haute qualité, de fort volume unitaire à la coupe rase, produit naturellement des sciages avec des MOE plus élevés. Tous les sciages issus du scénario courte rotation ont un MOE moyen inférieur à 10 GPa.

L'effet hauteur est aussi important, au delà de 12 m pour le scénario haute qualité et 7,2 m pour le scénario standard, les MOE moyens sont inférieurs à 9 GPa (cf. **Figure 106**).

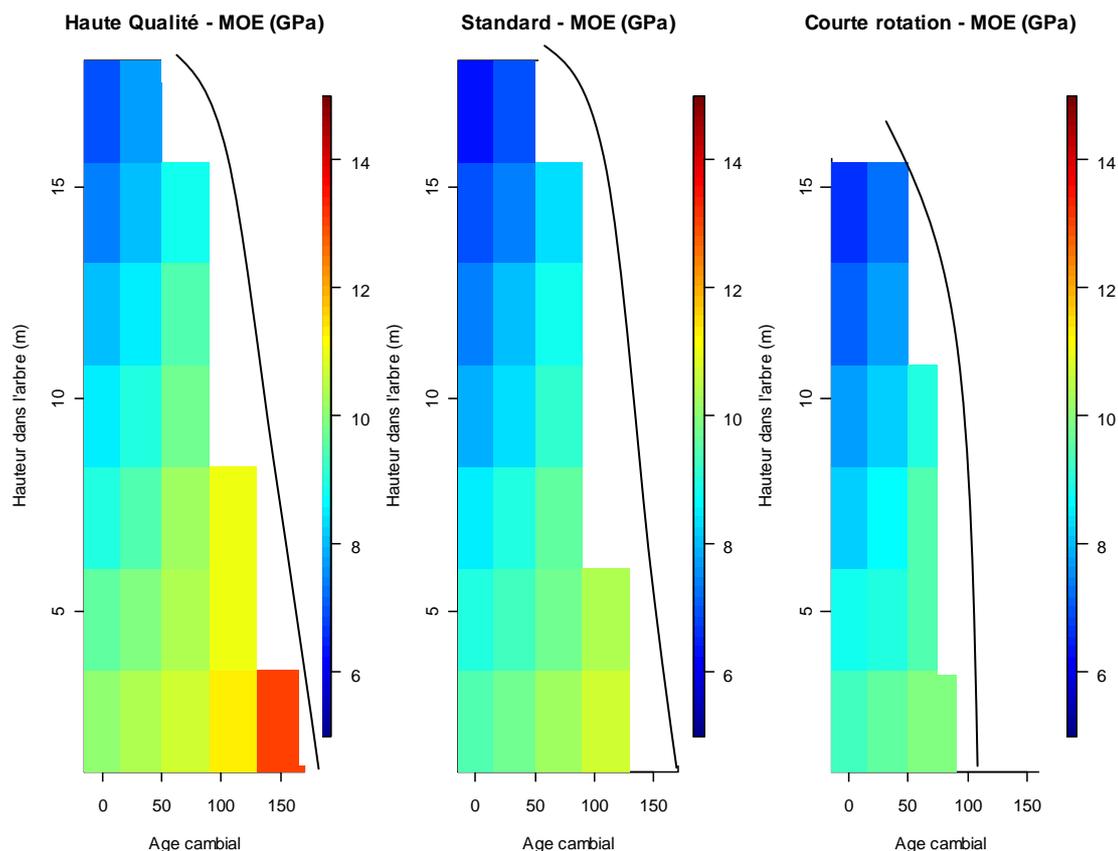


Figure 105 : MOE en flexion (GPa), représentation schématique du profil de l'arbre simulé pour les 3 scénarios

On aurait pu s'attendre à de plus grandes différences entre les scénarios. Mais, ces scénarios n'ont pas une croissance initiale très différente. La différenciation des scénarios se fait principalement sur l'âge à la coupe rase, donc sur la qualité du bois produit durant les dernières années.

Un scénario à croissance initiale lente, permettant de contraindre le volume du bois juvénile avec des propriétés faibles, permettrait certainement d'améliorer plus fortement les caractéristiques mécaniques.

	Hauteur de prélèvement du billon (m)							Moyenne arbre
	0 -2,4	2,4 - 4,8	4,8 - 7,2	7,2 - 9,6	9,6 - 12	12 - 14,4	14,4 -16,8	
Haute qualité	11,8	10,6	10,5	9,5	9,1	8,6	7,6	9,9
Standard	10,4	10,0	9,4	8,9	8,5	8,0	6,9	9,1
Courte rotation	9,8	9,4	9,1	8,7	7,7	7,1	Non sciable	8,3

Figure 106 : MOE moyen (GPa) pour les 3 scénarios après simulation de sciage des billons

(5) Classes de résistance mécanique

Les propriétés de base du matériau ayant été simulée, il est possible d'estimer la qualité du bois produit pour un usage en construction. Le module d'élasticité en flexion présenté ci-dessus n'est qu'une composante du classement mécanique des sciages. La norme NF EN 338 (Bois de structure – Classe de résistance) donne les différentes propriétés à prendre en compte. Les différentes propriétés sont les suivantes :

- module de rupture en flexion, calculé au fractile de 5%,
- module d'élasticité en flexion, valeur moyenne,
- masse volumique à 12 % d'humidité, calculé au fractile de 5%.

Une propriété supplémentaire a été rajoutée, l'angle du fil des sciages. Les pièces avec un angle du fil inférieur à -8° ont été considérées comme non utilisables. Des classes de résistance sont alors définies, en fonction des valeurs des différents paramètres.

Classes de résistance mécanique	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Module de rupture à la flexion (MPa), fractile à 5%	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Module moyen d'élasticité axiale (GPa), valeur moyenne	7	8	9	9.5	10	11	12	12	13	14	15	16
Masse volumique moyenne (kg/M3), valeur moyenne	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550

Figure 107 : Classes de résistance mécanique définies selon la norme NF EN 338

Les classes retenues pour la majorité des bois français sont :

- C14, C18, en général pour des emplois en charpentes traditionnelles,
- C24, en général pour des emplois en charpentes industrielles (fermettes) et lamellées- collées,
- C30, en général pour des pièces de forte résistance mécanique destinées à des emplois en lamellé-collé.

A partir des modèles de propriétés, les distributions intra arbre des valeurs moyennes de MOE, du fractile à 5% du MOR et de la densité à 12 % ont été simulées pour les trois scénarios. Les arbres ont été virtuellement billonnés puis sciés et les sciages ont été classés parmi les quatre classes définies ci-dessus, en accord avec les classes de résistance définie dans la norme NF EN 338.

Le classement mécanique obtenu est optimal. En effet, les modèles ont été établis à partir de valeurs mécaniques obtenues par des essais destructifs réels sur les échantillons. Or si la pièce n'est pas cassée, ce qui se passe quand on veut l'utiliser pour une structure, on ne connaît pas cette valeur réelle, mais juste une estimation à partir d'un classement non destructif réalisé manuellement (visuellement)

ou par machine de classement. Ce classement n'étant qu'une estimation, il a tendance à dégrader plus ou moins les valeurs. Les valeurs théoriques annoncées ci-dessous doivent donc être considérées comme le potentiel maximal du bois.

Hauteur billon	Scénario sylvicole	C14	C18	C24	C30	Non classé
0 – 2,40 m	Sc. Haute Qualité		28%	30%	42%	
	Sc. Standard		48%	52%		
	Sc Courte rotation		100%			
2,40 m – 4,80 m	Sc. Haute Qualité		48%	52%		
	Sc. Standard		100%			
	Sc Courte rotation	5%	95%			
4,80 m – 7,20 m	Sc. Haute Qualité		48%	52%		
	Sc. Standard	31%	69%			
	Sc Courte rotation					
7,20 m – 9,60 m	Sc. Haute Qualité	5%	95%			
	Sc. Standard	31%	69%			
	Sc Courte rotation	95%				5%
9,60 m – 12 m	Sc. Haute Qualité	31%	69%			
	Sc. Standard	100%				
	Sc Courte rotation	84%				16%
12 m - 14,40 m	Sc. Haute Qualité	95%				5%
	Sc. Standard	95%				5%
	Sc Courte rotation					100%
14,40 m – 16,80 m	Sc. Haute Qualité	84%				16%
	Sc. Standard	84%				16%
	Sc Courte rotation	Non sciable				
Moyenne arbre toutes hauteurs	Sc. Haute Qualité	17%	43%	25%	10%	2%
	Sc. Standard	38%	48%	11%	0%	2%
	Sc Courte rotation	28%	53%	0%	0%	13%

Figure 108 : Classes de résistance mécanique pour les 3 scénarios en fonction de la hauteur de prélèvement

Les différences sont très marquées entre scénarios. Seul le scénario haute qualité, permet la production de sciages de classes mécaniques égales ou supérieures à C24 pour les 3 premiers billons, soit jusqu'à une hauteur de 7,2 m (de 72% pour le premier billon, à 52% pour le troisième billons).

Pour des hauteurs supérieures à 15 m le classement mécanique des sciages chute fortement avec l'apparition de pièces rejetées et de sciages classés principalement en C18 et C14, dont l'usage est limité aux charpentes traditionnelles de plus fortes sections ou à la fabrication de produits recomposés permettant d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques (aboutage, bois massif reconstitués,...).

Le scénario standard permet aussi la production de sciages de classes C24 mais uniquement pour le premier billon.

Le scénario courte rotation conduit à la production de sciages classés principalement C18 ou C14. Ce scénario, bien que n'ayant pas une vocation à la production de bois d'œuvre de qualité structurel, peut fournir des sciages avec des classes mécaniques minimales.

La Figure 109 illustre ces résultats.

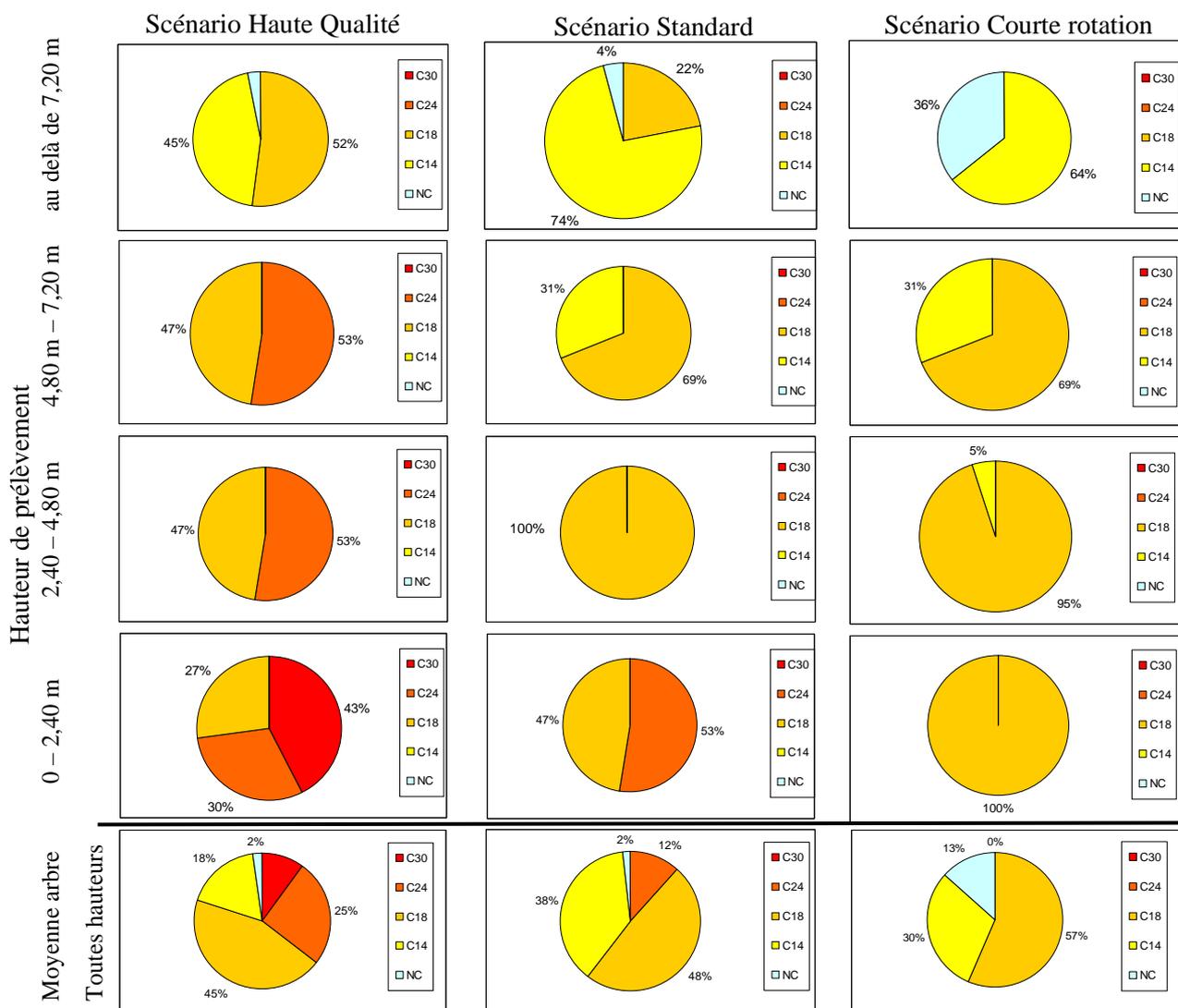


Figure 109 : Classes de résistance mécanique par billon, en fonction de la hauteur pour les 3 scénarios

iv) Conclusion

Les scénarios à croissance rapide produisent donc des bois avec des propriétés mécaniques plus faibles que celles des bois de scénarios à croissance plus lente. La vitesse de croissance influe sur la proportion de bois juvénile et sur la densité du bois. Ces résultats sont en accord avec la littérature (Clark et al. 1996). Ces bois auront un angle du fil plus élevés et donc se déformeront plus au séchage. Par contre du fait de la vigueur plus importante des arbres, le volume de sciage avec des nœuds verts est plus élevé, ce qui est un point positif, ces nœuds ayant un meilleur comportement au rabotage. Pour chaque scénario, la valeur moyenne des différents paramètres a été calculée pour les sciages obtenus lors du débit de l'arbre moyen à la coupe rase (cf. Figure 110). Le scénario haute qualité produit des sciages avec une meilleure résistance mécanique, un taux de duramen plus élevé, un angle du fil plus faible mais des nœuds noirs en plus forte proportion que les scénarios à croissance plus rapide.

	Taux de sciages classés C30	Taux de sciages classés C24	Taux de sciages avec duramen	Taux de sciages avec angle du fil <math>< -8^\circ</math>	Taux de sciages avec nœud noirs	Taux de sciages avec nœuds verts
Scénario Haute Qualité	10%	25%	25%	3%	60%	40%
Scénario standard	0%	11%	19%	3%	50%	50%
Scénario courte rotation	0%	0%	15%	13%	47%	53%

Figure 110 : Propriétés moyennes des sciages obtenus les 3 scénarios à la coupe rase

L'intérêt des scénarios à croissance rapide et à courte rotation est de faire face au trou de production causé par le passage des tempêtes de 1999 et de 2009 et également de limiter les risques face aux éventuelles catastrophes climatiques. Ces scénarios sont donc nécessaires à la reconstitution du massif, mais la production de bois à forte valeur mécanique devra être assurée par d'autres scénarios.

b) Impact sur le classement mécanique des bois de différentes hypothèses de récolte du massif aquitain

Avant la tempête Klaus de janvier 2009 la forêt de pin maritime en Aquitaine couvrait une surface de plus de 800 000 Ha pour un volume total de bois sur pied de 124 millions de m³. Après le passage de cette tempête les volumes sur pied sont estimés à 87 millions de m³. La production annuelle de la pinède (quantité de bois que la forêt produit par an) qui était d'environ 8 millions de m³ avant tempête, se situera pour les prochaines années autour de 6 millions de m³. Le potentiel de production de la pinède est fortement amputé, alors que les estimations de besoins en bois des industriels aquitains n'ont pas diminué et qu'elles se situent entre 7,6 et 8,6 millions de m³.

Pour pallier cet écart entre la production du massif et la demande industrielle plusieurs hypothèses de prélèvements de la ressource ont été établies. Il est intéressant d'estimer si celles-ci auront une influence sur la qualité moyenne des bois récoltés.

En Aquitaine, suite aux tempêtes, les analyses de ressource forestière sont sensibles. La situation évolue de plus très rapidement, les nombreuses attaques de scolytes (principalement *Ips sexdentatus*) durant l'été 2010, sur les pin épargnés par la tempête, augmentent l'imprécision de ces études de ressource (CRPF Aquitaine 2010).

Basée sur de nombreuses hypothèses, cette simulation se veut surtout illustrative du potentiel d'utilisation des modèles développés.

i) Méthodologie

(1) Estimation de la ressource disponible

La ressource actuelle en pin maritime en Aquitaine est connue grâce aux inventaires réalisés par l'inventaire forestier national (IFN).

A partir de cet état des lieux, qui comprend entre autres les surfaces par classes d'âge, les circonférences et les hauteurs des peuplements, la croissance moyenne du massif peut être simulée. A partir d'hypothèses sur la croissance, sur les reboisements et enfin d'hypothèses sur la récolte de bois, on peut estimer la disponibilité de celle-ci pour une date donnée.

En première approche, le potentiel de la ressource est estimé pour les années 2015 et 2020. On s'affranchit ainsi des hypothèses sur le reboisement (surfaces reboisées, sylviculture adoptée,...). En

effet, les peuplements actuellement reboisés ne produiront pas de bois à destination du sciage avant 2025.

Le volume produit par le massif est calculé de manière simplifiée en fonction de la surface terrière et de la hauteur des arbres. Les accroissements en surface terrière sont fonction de l'âge du peuplement, et sont considérés comme étant constants sur la période et identiques à ceux avant tempête.

Les hypothèses de prélèvements, réalisées pour les années 2015 et 2020, sont basées sur celles créées dans le cadre d'une réflexion menée avec les industriels du massif aquitain (Cavaignac 2010). Elles ont été établies en prenant en compte les besoins futurs en bois des industriels du massif en intégrant les demandes de bois énergie et les dégâts subit par le massif forestier et donc la diminution de sa capacité de production.

D'après un groupe de travail du GIP Ecofor (ECOFOR 2010), les besoins estimés en bois ronds pour l'Aquitaine pour les dix prochaines années se situent entre 3 et 4 millions de m³ pour le sciage, à 3,6 millions de m³ pour les bois d'industrie et à environ 1 millions de m³ pour l'exportation.

Les hypothèses de prélèvement testées sont les suivantes :

- hypothèse 1 : taux d'exploitation de bois identiques à ceux de l'année 2008, mais volume prélevé plus faible, les surfaces récoltables ayant diminué. Ceci correspond à un fort prélèvement dans les peuplements anciens, ainsi que dans les peuplements à croissance rapide dont l'objectif est la production de bois d'œuvre. Ce scénario permet la reconstitution du massif mais pas de répondre à la demande des industriels en volume. En 2015, la production moyenne du massif est comprise entre 5 et 6 millions de m³ et le volume total des arbres sur pied est supérieur à 100 millions de m³.
- hypothèse 2 : accentuation des prélèvements sur les peuplements anciens, la ressource sur pied de peuplements âgés étant assez importante. Cette hypothèse permet de répondre à la demande industrielle avec une légère reconstitution du stock de bois sur pied. En 2015, la production moyenne du massif est comprise entre 7 et 8 millions de m³ et le volume sur pied est compris entre 90 et 100 millions de m³.
- hypothèse 3 : accentuation des prélèvements sur toutes les classes d'âge pour répondre à la demande de bois. Ce scénario permet de répondre à la demande industriel, mais entraîne un déséquilibre des classes d'âge du massif (trop de peuplements âgés et donc vulnérables). En 2015, la production moyenne du massif est comprise entre 7 et 8 millions de m³ et le volume sur pied est de l'ordre de 100 millions de m³.

L'application de ces hypothèses de prélèvement aux données d'estimation du volume de la ressource permet d'estimer les volumes de bois d'œuvre et de bois d'industrie, récoltés en coupe rase et en éclaircie pour les années 2015 et 2020.

Connaissant les classes d'âge des peuplements récoltés et leur vitesse de croissance, on peut simuler les propriétés des bois produits et ainsi leur classement structurel.

(2) Estimation du volume de sciages et classement

Les volumes de bois rond simulés sont transformés en volume de sciage en appliquant un rendement matière (rapport entre le volume de sciage obtenu par rapport au volume du billon sur écorce scié). Ce rendement matière dépend du diamètre de l'arbre transformé. Les données utilisées proviennent d'une simulation réalisée avec le logiciel de simulation de débit Optiscie. Les rendements matière s'échelonnent de 47% (pour des diamètres de 40 cm) à 30% (pour des diamètres inférieurs à 20 cm). Ces rendements matière sont cohérents avec ceux calculés par les scieurs du massif aquitain (Chantre et al. 2005).

Aux sciages obtenus, est attribuée une classe mécanique en se basant sur les résultats des simulations précédentes. Ce classement est optimal, c'est le classement théorique parfait. Il doit donc être dégradé. Dans l'industrie, le classement des sciages pour un usage structurel peut être réalisé soit visuellement soit automatiquement à l'aide de machine de classement. Pour cette simulation, nous avons considéré que les sciages étaient classés à l'aide d'une machine automatique et nous avons donc utilisé le potentiel de classement moyen de cette machine à partir des résultats de son homologation réalisée par le FCBA. La machine dont nous avons utilisé les résultats classe les sciages en 2 classes : C24 et rejet. Nous utiliserons donc par la suite uniquement ces 2 classes.

ii) Résultats

La *Figure* 111 présente pour les 3 hypothèses de prélèvement les volumes de bois d'œuvre pin maritime récoltés sur le massif aquitain, regroupés par classe d'âge pour les coupes rases et les éclaircies.

	Année récolte	Coupe rase : volume prélevé par classe d'âge				Eclaircie : volume prélevé par classe d'âge				Total prélèvements pour le massif aquitain
		20	30	40	50 ans	14	19	25	37	
		ans	ans	ans		ans	ans	ans	ans	
Hypothèse 1	2015	89.0	176.1	388.3	2 176.5	42.0	131.9	201.6	185.4	3 391.1
	2020	112.3	172.4	338.8	1 914.8	46.0	144.2	204.3	159.5	3 092.3
Hypothèse 2	2015	88.7	212.6	389.5	3 528.8	42.0	131.9	199.0	189.2	4 781.7
	2020	112.3	201.9	570.7	3 027.4	46.0	144.2	204.3	156.4	4 463.2
Hypothèse 3	2015	282.9	488.5	663.6	2 618.0	42.0	131.9	197.7	170.0	4 594.6
	2020	420.5	452.8	543.9	2 252.7	46.0	144.2	159.8	118.0	4 137.7

Figure 111 : Volumes de bois d'œuvre pin maritime (billons de sciage), prélevés sur le massif aquitain en fonction des 3 hypothèses de récolte (milliers de m³)

Les prélèvements de bois d'œuvre s'échelonnent de 3 à plus de 4,5 millions de m³ suivant l'hypothèse de prélèvement appliquée. On note pour l'hypothèse 2, les prélèvements importants dans les peuplements de classe d'âge 50 ans avec plus de 3 millions de m³ prélevés.

Les 3 hypothèses permettent de respecter les objectifs de prélèvements du groupe de travail Ecofor à savoir une récolte de bois d'œuvre comprise en 3 et 4 millions de m³.

Ces volumes prélevés sont convertis en volume de sciages par application des rendements matières, variables suivant le diamètre des billons. Le classement mécanique optimal des sciages est alors calculé grâce à l'utilisation des modèles développés précédemment.

L'application du déclasserement lié aux machines de tri, nous permet d'obtenir pour chacune des hypothèses de prélèvement, le volume de sciage dans chacune des classes de résistance mécaniques retenues.

	Année de récolte	Volume de sciages récoltés	Volume de sciages classés C24
Hypothèse 1	2015	1 488,0	402,5
	2020	1 346,3	353,2
Hypothèse 2	2015	2 137,2	619,4
	2020	1 973,4	539,9
Hypothèse 3	2015	1 967,9	481,1
	2020	1 744,5	406,9

Figure 112 : Aquitaine, pin maritime, volume de sciages total et par classe de résistance mécanique en fonction des 3 hypothèses de récolte (milliers de m³)

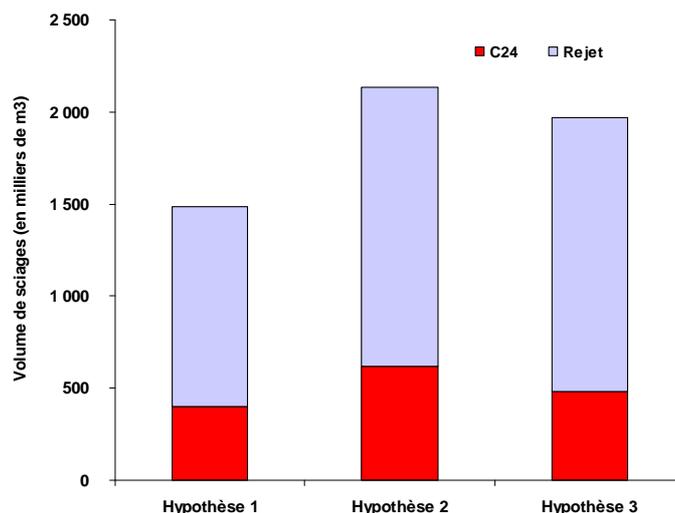


Figure 113 : Aquitaine, pin maritime, volumes sciages par classe de résistance mécanique en fonction des 3 hypothèses de récolte (milliers de m³)

On constate le fort impact de l’augmentation des prélèvements dans les peuplements anciens sur le volume de sciages classés en C24. L’hypothèse 2 permet, en 2015, d’augmenter de près 55% le volume de sciages classés en C24 par rapport à l’hypothèse 1 et avec un prélèvement total de bois sur le massif aquitain inférieur à l’accroissement biologique (donc permettant une légère augmentation du volume total de bois sur le massif).

La fédération des industries du bois d’Aquitaine (FIBA), prévoit pour 2015 une consommation de sciage en pin maritime d’un peu plus de 1,4 millions de m³ dont 174 000 m³ pour en usage en construction (Imberty et al. 2010).

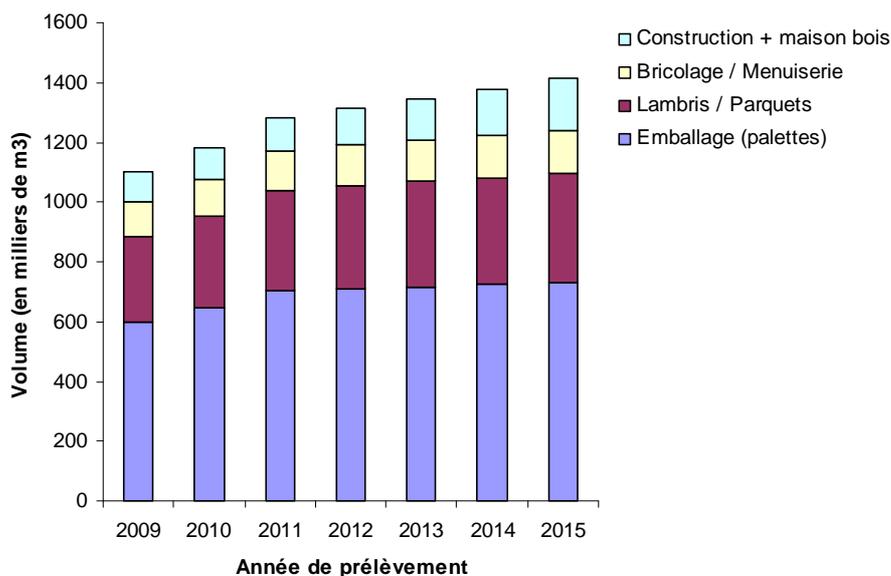


Figure 114 : Scénario d’évolution de la production de sciages de pin maritime de 2009 à 2015 d’après Imberty et al. (2010)

D'après les résultats de la simulation les volumes de sciages classés en C24 varient de 353 000 m³ à 619 000 m³ suivant les hypothèses de prélèvement. Le massif aquitain serait en mesure en 2015 de fournir le volume de sciage requis. Dans les scénarios de prélèvements appliqués, le volume de sciage C24 est apporté principalement par les coupes rases des peuplements anciens, issus de régénération naturelle. Les caractéristiques des bois prélevés à partir des années 2030 dépendront fortement de la sylviculture appliquée aux reboisements réalisés suite aux tempêtes.

c) Evaluation économique du système de production

L'objectif est ici de mettre en évidence l'impact économique du scénario sylvicole sur la transformation des bois. L'approche retenue est de chercher à estimer le coût de revient prévisionnel de différents types de sciages, produits par les arbres en coupe rase, en fonction de scénarios appliqués à l'échelle du peuplement.

Les données économiques utilisées proviennent d'une étude des scieries aquitaines réalisées en 2007 (Chantré et al. 2005). Les coûts de revient annoncés sont donc uniquement indicatifs et ne sont nullement représentatifs de la situation économique actuelle de la filière bois dans un contexte post tempête.

i) Méthode

On considère une scierie qui transforme annuellement 10 000 m³ de bois rond. Trois cas d'approvisionnement sont distingués : l'ensemble de l'approvisionnement est constitué de billons provenant de parcelles conduites suivant le scénario haute qualité, le scénario standard ou le scénario courte rotation. Seuls les premiers et deuxièmes billons sont approvisionnés. Les billons sont ensuite convertis en sciages puis classés d'après les résultats des modèles.

Les coûts de revient utilisés sont répartis en différentes sections analytiques : 3 sections principales (approvisionnement bois, sciage, opérations aval) et 2 sections auxiliaires (entretien, administration) (cf. Figure 115). Les coûts des deux sections auxiliaires ont été imputés à ceux des sections principales en fonction du temps pour l'entretien et du coût pour l'administration.

Les résultats sont exprimés en €/m³ scié et répartis en différents postes de coûts :

- coût d'achat des bois ronds rendus scierie,
- coût de personnel,
- coût des immobilisations et de leur financement,
- autres coûts (intrants, impôts et taxes,...).

Le produit de la vente des produits connexes de scierie (écorce, sciure et plaquettes) est déduit du coût total de production des sciages bruts.

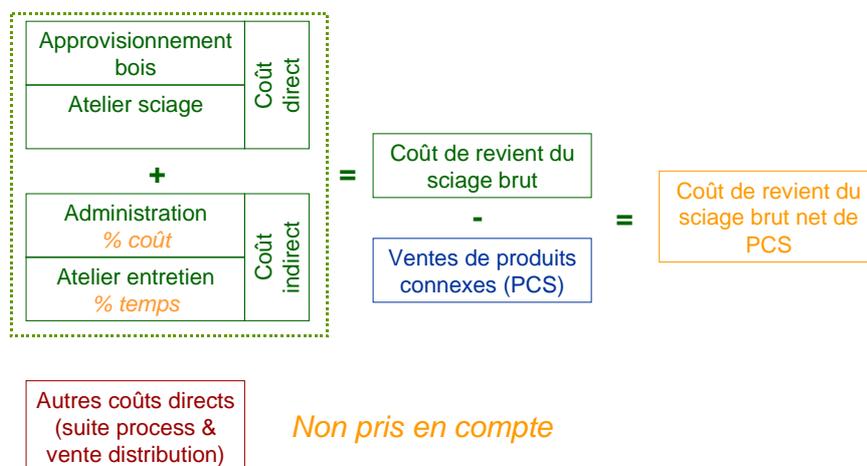


Figure 115 : Méthode de calcul du coût de revient du sciage brut

Les coûts de sciage sont très différents suivant l’âge du matériel utilisé par la scierie. Les scieries qui ont réalisé des investissements récents (dans les cinq dernières années) doivent supporter des charges d’amortissement, contrairement à celles qui exploitent un outil de production largement amorti (peu d’investissements réalisés les dix dernières années). Les coûts de sciage peuvent varier du simple au double quand on passe d’une scierie ancienne amortie en totalité ou presque à une scierie moderne en cours d’amortissement. Le surcoût lié à l’augmentation des amortissements et des frais financiers étant compensé par une hausse de productivité et une baisse du coût des frais d’entretien et réparation (Chantre et al. 2005).

Par simplification, les coûts utilisés ici seront identiques pour les 3 cas d’approvisionnement distingués, l’objectif étant de mettre en évidence l’influence de l’approvisionnement en bois.

ii) Résultats

Les caractéristiques de l’approvisionnement de la scierie pour les 3 cas étudiés, sont données dans le tableau ci-dessous.

Bois ronds	Cas 1 : Courte rotation	Cas 2 : Standard	Cas 3 : Haute qualité
Diamètre moyen fin bout 2 premiers billons	25 cm	29 cm	31 cm
Volume unitaire moyen 2 premiers billons	0,189 m ³	0,261 m ³	0,305 m ³
Rendement matière moyen 2 premiers billons	43,5 %	47,9 %	49,8 %
Volume total approvisionné	10 000 m ³	10 000 m ³	10 000 m ³
Volume de sciages produit	4 348 m ³	4 786 m ³	4 980 m ³

Figure 116 : Caractéristiques de l’approvisionnement scierie pour les 3 cas étudiés

Le diamètre des billons ayant un fort impact sur le rendement, l’approvisionnement de billons en provenance de parcelles conduites selon le scénario haute qualité permet la production d’un volume de sciage supérieur de 14% par rapport au cas n°3 ou les billons provenant de parcelles de courte rotation sont de volume unitaire plus faible.

En moyenne, les résultats font apparaître un coût de revient net de PCS de 143 €/m³ scié (**Figure 117**). Les produits connexes réduisent le coût de revient du sciage de 30 €/m³ scié. Près de 65 % du coût de production est constitué par l’achat de bois ronds. Le reste représente le coût de sciage.

	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Moyenne des 3 cas	Répartition Moyenne
Bois ronds rendus usine	35 €/m ³	46 €/ m ³	50 €/ m ³	44€/ m ³	
Rendement matière	43,5 %	47,9 %	49,8 %	47,0 %	
Bois ronds	80 €/ m ³ scié	95 €/ m ³ scié	100 €/ m ³ scié	92 €/ m ³ scié	64,3 %
Personnel	19 €/ m ³ scié	13,3 %			
Capital	10 €/ m ³ scié	7%			
Autres	22 €/ m ³ scié	15,4 %			
Total	131 €/ m ³ scié	146 €/ m ³ scié	151 €/ m ³ scié	143 €/ m ³ scié	
Produits connexes	30 €/ m ³ scié				

Figure 117 : Coûts de revient du sciage en €/m³ scié pour les 3 cas

L’analyse des variations des coûts fait apparaître l’impact des scénarios d’approvisionnement. Dans le cas n°1, les billons approvisionnés sont de faibles diamètres, avec un rendement matière assez faible, leur prix est par contre plus faible que pour les autres scénarios.

La différence de rendement matière étant plus faible que la différence de prix, le prix de revient total du m³ scié est plus faible pour le cas n°1 que pour les autres scénarios. Il est de 131 €/m³ scié contre 146 € pour le cas n°2 et 151 € pour le cas n°3. La **Figure 118** illustre la décomposition des coûts entre les différents postes analysés.

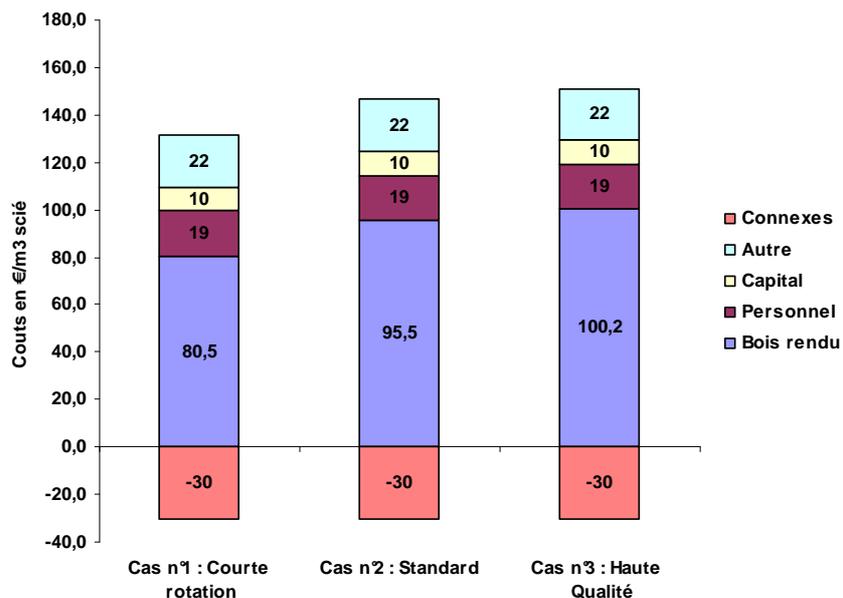


Figure 118 : Coûts de revient du sciage en € / m³ scié pour les 3 cas

Ainsi, si on omet de prendre en compte la qualité des produits obtenus, un approvisionnement constitué de billons de faibles diamètres, provenant de parcelles à croissances rapides, permet la production de sciages dont le coût de revient au m³ est inférieur de 8% par rapport à un approvisionnement constitué de billons de diamètre plus important.

La réalité n'est pas aussi simple, la différence d'approvisionnement ayant une forte influence sur la qualité des sciages produits. L'application des modèles développés, permet de simuler le classement mécanique des sciages.

Le tableau ci-dessous donne le volume de sciage obtenu et les taux de sciages par classe de résistance mécanique pour chacune des 3 modalités (en se basant sur un approvisionnement de 10 000 m³ de bois rond.)

	Cas 1 : Courte rotation	Cas 2 : Standard	Cas 3 : Haute qualité
Taux de sciages classés C24 billons approvisionnés	0%	30%	63%
Taux de sciages hors classement billons approvisionnés	100%	70%	37%
Volume de sciages classés C24 (m ³)	0	1 435	3 137
Volume de sciages hors classement (m ³)	4 348	3 350	1 842

Figure 119 : Qualité mécaniques des sciages produits pour les 3 modalités d'approvisionnement

Les classes de résistance sont des classes simulées, d'après un classement machine donnant uniquement 2 classes : la classe C24 et le rejet.

L'approvisionnement de billons en provenance de parcelles conduites suivant le scénario haute qualité permet d'obtenir plus de 60% de sciages classés C24. Seuls 37% des sciages obtenus ne sont pas classés et doivent être utilisés pour d'autres usages. Les sciages obtenus sont donc relativement homogène et la recherche d'autres débouchés par le scieur limitée.

Le cas d'approvisionnement n°2 permet d'obtenir 30% de sciages classés C24. Plus de 2/3 des sciages ne sont pas classés mécaniquement et enfin avec un approvisionnement constitué de billons provenant de parcelles conduites en courte rotation, aucun sciage n'est classé en C24. Un tel approvisionnement n'étant pas adapté pour la production de sciages à usage structurel.

A partir des prix des sciages de résineux avant tempête, donnés par le centre d'étude de l'économie du bois (CEEB 2008), un calcul théorique des bénéfices peut être réalisé pour chacun des 3 cas d'approvisionnement. Le prix de vente des sciages classés C24 a été fixé à 185€ et celui des sciages non classés à 135€. Le bénéfice est alors calculé comme étant égal au prix de vente des sciages moins le prix des coûts d'approvisionnement et de transformation.

	V de billons approvisionnés	V de sciages produit	Montant achat billons + transformation	Montant vente des sciages produits	Bénéfices théoriques
Cas 1 : Courte rotation	10 000 m ³	4 348 m ³	572 k€	587 k€	15 k€
Cas 2 : Standard	10 000 m ³	4 786 m ³	701 k€	717 k€	17 k€
Cas 3 : Haute qualité	10 000 m ³	4 980 m ³	753 k€	829 k€	76 k€

Figure 120 : Données économiques pour les 3 modalités d'approvisionnement

Les bénéfices pour la transformation de 10 000 m³ sont les plus élevés pour le cas d'approvisionnement n°3. Ils sont très supérieurs à ceux obtenus pour les cas n°1 et n°2 où les bénéfices sont très proches.

Cette simulation est très théorique, mais elle permet de mettre en évidence le fort impact de la qualité des bois approvisionnés sur le prix et la qualité des sciages obtenus. Les scieurs aquitains ajustent naturellement déjà aujourd'hui leurs approvisionnements en fonction de leurs marchés. Les scieurs voulant produire de la charpente achetant des bois âgés de volume unitaire important à l'opposé des

scieurs produisant des sciages pour un usage en palette qui s'orientent vers des billons de volume unitaire plus faible.

Néanmoins, dans une situation où les approvisionnements en bois sur le massif aquitain vont être tendus du fait d'une ressource réduite, une meilleure connaissance de la qualité des pins maritimes devrait permettre aux industriels de la filière bois de mieux gérer leur matière première et optimiser son utilisation.

d) Conclusion

Il faut rester prudent avec ces analyses basées sur de nombreuses hypothèses. Néanmoins, l'application des modèles développés à différents scénarios de reboisement ou de récolte nous permet de travailler par comparaison et de dresser les constats suivants.

La conduite de peuplements par des scénarios à croissance rapide et à courte rotation, aboutit à la production de bois avec une résistance mécanique plus faible que les bois produits par les scénarios haute qualité, à révolution plus longue et à croissance plus lente. Néanmoins les sciages produits par les peuplements conduits en ligniculture ou en courte rotation non classés en C24 peuvent être utilisés dans des produits à usage structurel. Même si leur résistance mécanique est inférieure il existe des produits bois à usage structurel utilisant ce type de sciages.

Ainsi le bois massif abouté (BMA) et le bois massif reconstitué (BMR) permettent en utilisant des bois de classes mécaniques peu élevées, de réaliser des produits de classes mécaniques supérieures. Le BMA est constitué d'éléments de bois assemblés les uns aux autres par un aboutage à entures multiples collées, c'est un produit séché, calibré et purgé de défaut ce qui facilite son utilisation. Le BMR constitués par la superposition de lames de bois massif de forte épaisseur aboutées, principalement employé en structure poteau-poutre est un produit très stable (déformations et fentes limitées). Ces deux produits sont en phase de croissance sur le marché du bois de structure.

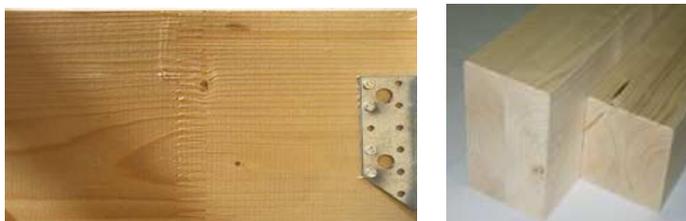


Figure 121 : Exemple de produits bois reconstitués : bois massif abouté (droite) et bois massif reconstitué (à gauche) (photos Sinbpla)

Les prévisions d'utilisation de bois en structure de la FIBA, de 140 000 m³ de sciages utilisés en construction bois pour l'année 2015, pourront être honorées par le massif. Quelque soit le scénario de prélèvement envisagé, les volumes de sciages classés en C24 sont toujours supérieurs à 350 000 m³.

Les scénarios à croissance rapide et courte rotation aboutissent aussi à la production de sciages avec un angle du fil plus ouvert augmentant ainsi les risques de déformations suite au séchage.

Ce problème est commun à beaucoup d'essences résineuses et des techniques existent pour diminuer son impact.

Ainsi en Suède, un système de mesure de l'angle du fil du cerne extérieur d'un billon a été développé. Il est basé sur l'orientation d'un spot laser sur les fibres du bois. Cette technologie est en cours de déploiement dans certaines scieries (Nyström & Grundberg 2007).

Les billons présentant un angle du fil supérieur ou égal à 6° et orienté à gauche (pour pin et épicéa) ne sont pas sciés systématiquement. Ceux-ci peuvent être soit redirigés vers un usage en trituration soit sciés mais un programme de séchage adapté est alors appliqué aux sciages.

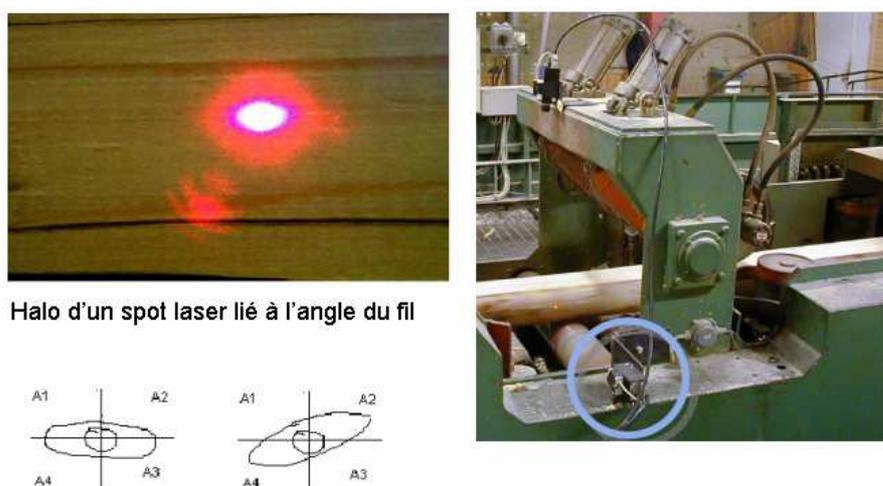


Figure 122 : Système de mesure de l'angle du fil sur billon développé en Suède (d'après Nyström 2003)

5) EXEMPLES DE TRANSFERT DES MODELES AUPRES DES PROFESSIONNELS

i) Contexte et objectifs

Les modèles des propriétés du pin maritime développés ont aussi pour objectif d'être transférés auprès des professionnels du secteur bois. Plusieurs solutions ont été envisagées soit sous forme d'abaques, soit sous forme d'interfaces informatiques simples et conviviales. Deux exemples de grilles d'estimations ont été établis, un pour le taux de sciage sans nœud et un pour la qualité mécanique des sciages. Ces grilles peuvent être utilisées pour optimiser de manière simple l'approvisionnement d'une unité, voire être incorporées en partie dans un cahier des charges d'approvisionnement. C'est le cas de l'estimation du taux de bois sans nœud, dont le critère prédictif, la hauteur relative de branche morte, a été intégré dans le cahier des charges d'approvisionnement d'une usine de déroulage de pin maritime en Aquitaine. Le fait de disposer de grilles de critères simples à mettre en œuvre pour déterminer la performance technologique du matériau permettra une meilleure valorisation de la matière et cela dès l'amont.

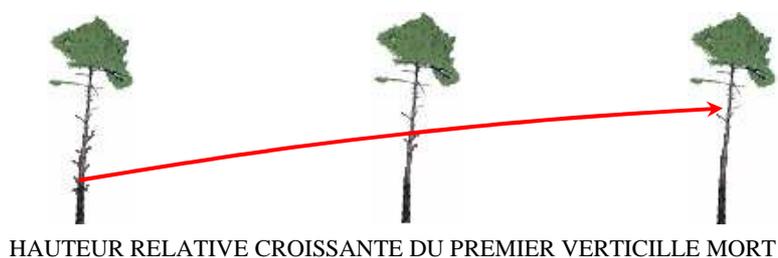
Les interfaces informatiques développés pour les modèles, se veulent accessibles, simples et conviviales. Elles s'inspirent du logiciel « Procalc » développé par l'institut de recherche forestier suédois, Skogforsk (cf. annexe 1, interface du logiciel). Ce logiciel permet de visualiser pour le pin sylvestre et l'épicéa les variations de nombreuses propriétés du bois à partir des modèles développés (Wilhelmsson, Arlinger, Spångberg et al. 2002). En Suède et Finlande l'intégration des modèles de la nature des nœuds et de la densité du bois, dans les logiciels de gestion du billonnage des engins d'abatage façonnage, a été réalisée. Les longueurs des billons et leur qualité sont calculées en fonction des données des modèles, certaines qualités ne sont ainsi pas façonnées au delà d'une certaine hauteur dans l'arbre, en fonction du diamètre, de l'âge de l'arbre, de sa vitesse de croissance et de la situation géographique de la parcelle exploitée.

A terme, l'intégration des modèles développés ici, dans les logiciels des machines d'abatage façonnage en Aquitaine pourrait être envisagée.

ii) Grille d'estimation qualitative de parcelles

Une grille de qualité donnant, à l'échelle de la parcelle, l'évolution des taux sciages selon la nature des nœuds a été établie. Cette grille ne concerne que les parcelles issues de régénération naturelle.

Une telle grille, indépendante du volume unitaire permet sur la base d'un seul critère visuel de différencier qualitativement des peuplements matures de pin maritime, en prédisant la nature des nœuds des sciages. Entre deux peuplements dont la hauteur relative du premier verticille mort varie de 0,2 à 0,5 le taux de sciage sans nœuds théorique augmente de plus de 50% pour le billon à la base de l'arbre ce qui est considérable au plan industriel.



Hauteur de prélevement billon	Hauteur relative du premier verticille mort								
	0,2			0,35			0,5		
	0,7 m ³	1,2 m ³	1,6 m ³	0,7 m ³	1,2 m ³	1,6 m ³	0,7 m ³	1,2 m ³	1,6 m ³
	Sans Nœud	Avec Nœuds noirs	Avec nœuds verts	Sans Nœud	Avec Nœuds noirs	Avec nœuds verts	Sans Nœud	Avec Nœuds noirs	Avec nœuds verts
0 – 2,40 m	44%	32%	24%	58%	26%	16%	67%	21%	12%
2,40 m – 4,80 m	10%	51%	39%	26%	48%	25%	41%	41%	18%
4,80 m – 7,20 m	1%	49%	50%	9%	57%	34%	21%	53%	26%
7,20 m – 9,60 m	2%	41%	57%	3%	53%	44%	7%	60%	33%

Figure 123 : Taux de sciages classés suivant la nature des nœuds - Exemple de grille d'estimation qualitative de peuplements

Les résultats de cette grille ont été utilisés pour optimiser le cahier des charges de l'approvisionnement d'une unité de déroulage. La hauteur de prélevement des billons destinés à cette usine est définie en fonction de la hauteur moyenne de la première branche morte des parcelles exploitées. Sur les parcelles où la hauteur de la première branche morte est inférieure à 20% de la hauteur totale, seul le premier billon façonné à la base de l'arbre est destiné à cette usine. Pour des hauteurs de branche morte supérieures à 50%, les 3 premiers billons sont approvisionnés. Ainsi, l'usine est assurée d'obtenir un taux de placage sans nœud minimal dans les billons transformés.

A l'aide des modèles développés, une grille d'estimation du classement mécanique des sciages pouvant potentiellement être obtenus, suivant la vitesse de croissance et le volume unitaire de la parcelle a aussi été établie. Grâce à cette grille donnant le taux de sciage classés C24, un scieur peut optimiser son approvisionnement en billons, en calculant la hauteur de prélèvement ou la longueur du billon en fonction des caractéristiques mécaniques recherchées. Cela permet par exemple de visualiser simplement, que pour les parcelles à forte vitesse de croissance, seule l'exploitation d'arbres de volume unitaire élevé permet d'obtenir des sciages de classe mécanique C24.



AUGMENTATION DE L'ACCROISSEMENT MOYEN EN CIRCONFERENCE

Accroissement annuel en circonférence à 1,30 m									
Hauteur de prélèvement billon	2,0 cm /an Vu à la coupe rase			2,5 cm /an Vu à la coupe rase			3,0 cm /an Vu à la coupe rase		
	0,7 m ³	1,2 m ³	1,6 m ³	0,7 m ³	1,2 m ³	1,6 m ³	0,7 m ³	1,2 m ³	1,6 m ³
0 – 2,40 m	100%	100%	100%	69%	85%	92%	0%	0%	42%
2,40 m – 4,80 m	95%	95%	95%	0%	52%	52%	0%	0%	0%
4,80 m – 7,20 m	31%	69%	86%	0%	0%	52%	0%	0%	0%
7,20 m – 9,60 m	31%	69%	69%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Figure 124 : Taux de sciages de classe de résistance mécanique C24 - Exemple de grille d'estimation qualitative de peuplements

iii) Outil informatique développé

L'outil informatique est encore en cours de développement. Il permettra de simuler pour différents scénarios de croissance les propriétés du bois obtenus en coupe rase.

Il est basé sur un outil d'aide à la décision permettant d'optimiser la gestion des peuplements de pin maritime, développé dans le cadre du projet de recherche appliqué « sylvogène » visant à amplifier le gain génétique et optimiser la gestion des peuplements de pin maritime par un essor industriel durable (Chantre 2009). Ce logiciel permet de simuler la croissance d'un peuplement dont on fournit les caractéristiques de départ et l'itinéraire sylvicole, d'établir la table de production et de calculer les critères économiques habituels (Najar & De Morogues 2009). Le module de croissance est basé sur le modèle développé à FCBA pour les peuplements en ligniculture de pin maritime.

A ce logiciel, est ajouté un module permettant de simuler les propriétés suivantes : présence de duramen, nature des nœuds, angle du fil et classe mécanique des sciages.

CONCLUSION GENERALE, PERSPECTIVES

Une importante base de données technologiques sur le pin maritime conduit en ligniculture a été constituée. 168 arbres ont été échantillonnés parmi 14 parcelles réparties sur le massif Aquitain. Plus de 600 billons ont été façonnés, puis sciés pour obtenir plus de 1700 avivés. 650 disques ont aussi été prélevés sur les arbres échantillonnés. L'ensemble des caractéristiques dendrométriques des arbres a été mesuré et sur les échantillons usinés les principales propriétés du bois ont été mesurées : taux de duramen, nature des nœuds, angle du fil, densité du bois initial, densité et proportion de bois final, MOE et MOR. Cette caractérisation poussée du bois des parcelles de ligniculture de pin maritime n'avait jamais été réalisée, les arbres analysés provenant des toutes premières parcelles conduites intensivement et installées dans les années 1970.

A partir de ce capital, complété par les résultats d'études antérieures menées sur du pin maritime issus de parcelles de régénération naturelle, des modèles ont été développés. Les modèles obtenus ne sont pas tous parfaitement optimisés, ils expliquent une part plus ou moins importante de la variabilité, mais ils permettent d'identifier les principaux facteurs d'influence des différentes propriétés étudiées.

Le taux de duramen intra-arbre a un profil de variation avec la hauteur assez particulier avec une augmentation jusqu'à une hauteur de 2 à 3 m puis une diminution rapide. Sous contrôle de l'âge, le duramen est fortement influencé par les pratiques sylvicoles.

L'étude de la nature des nœuds a montré une forte différence entre les parcelles conduites en ligniculture et celles conduites en régénération naturelle. En cas d'absence d'élagage, la remontée du houppier est trop lente dans les parcelles de ligniculture pour aboutir à la formation d'un volume important de bois sans nœud.

Une forte variation radiale des propriétés mécaniques a été mise en évidence par la modélisation du MOE et du MOR. L'effet significatif de la vitesse de croissance trouvé, avec une diminution des propriétés quand la vitesse de croissance augmente, est un élément nouveau pour le pin maritime, les propriétés mécaniques des pins étant réputées stables avec l'augmentation de la vitesse de croissance.

Les modèles développés appliqués à différents scénarios sylvicoles et hypothèses de reboisement ont permis de confirmer la forte influence des pratiques sylvicoles sur les propriétés du matériau bois. Le logiciel développé permet de visualiser d'une manière simple l'influence des conditions de croissance sur les propriétés. Dans un contexte de reconstitution du massif aquitain, ces éléments seront à prendre en compte. La base de références qualitatives créée est un outil d'analyse précieux du potentiel technologique du pin maritime cultivé suivant les principes de la ligniculture.

Néanmoins ce travail n'est qu'une étape et de nombreuses tâches restent à mener.

Les modèles de densité du bois pourraient être fortement améliorés en prenant en compte les données météorologiques. Des études en cours montrent que ces données météorologiques permettent d'expliquer une grande part de la variation de la densité. L'influence du climat sur les propriétés mécaniques du pin maritime pourrait ainsi être évaluée.

Les relations entre l'angle du fil et les déformations au séchage mériteraient aussi d'être approfondies, cela permettrait d'envisager un tri des sciages voire des billons en scierie et de mieux maîtriser à terme les déformations au séchage. La demande croissante de bois séchés combinée à une exploitation de bois plus jeunes va rendre cette problématique primordiale dans les prochaines années.

La mesure de l'angle des micro-fibrilles sur les échantillons conservés pourrait améliorer les modèles de propriétés mécaniques. Ce paramètre très important, n'a malheureusement pas été mesuré pour des raisons de coût de la mesure. La connaissance de cette caractéristique ouvrirait aussi la voie à une meilleure estimation de la zone de bois juvénile, dont la détermination basée sur le seul critère de densité est assez imprécise.

Enfin l'utilisation de ces modèles par la profession reste à développer. L'optimisation du billonnage des arbres par les machines d'abatage est envisageable. De même la possibilité de mieux qualifier la matière première pour mieux la valoriser au plan industriel dès l'achat des bois ou avant sa transformation reste à exploiter.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdel-Gadir, A., Krahmer, R., 1993. Genetic Variation in The Age of Demarcation Between Juvenile And Mature Wood in Douglas-Fir. *Wood and Fiber Science* 25(4), pp. 384-394.
- AFNOR, 2010. *Eurocode 5 : conception et calcul des structures en bois - Partie 1-1 : généralités*, AFNOR.
- AFOCEL, 1994. *Manuel de sylviculture du pin maritime*. AFOCEL, Paris, 145 p.
- Alazard, P., 1981. Influence de la ligniculture sur les caractères de forme du pin maritime. *Annales Afocel 1980*, pp. 7-29.
- Alazard, P., Raffin, A., 2002. Les gains génétiques des premières et deuxième générations de vergers. Dans : *Le progrès génétique en forêt*, GPMF, Gazinet Cestas, pp. 27-40.
- Alteyrac, J., 2005. *Influence de la densité de peuplement et de la hauteur dans l'arbre sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'épinette noire*. Thèse de doctorat, Université de Laval, Québec, 136 p.
- Arbez, M., Baradat, P., Birot, Y., Azoëuf, P., Hoslin, R., 1978. Variabilité et hérédité de l'angle du fil du bois mesuré à l'aide d'un traceur radioactif chez le pin maritime et le pin laricio de Calabre. *Canadian Journal of Forest Research* 8(3), pp. 280-289.
- Baradat, P., Marpeau, A., 1988. *Le pin maritime (Pinus pinaster Ait). Biologie et génétique des terpènes pour la connaissance et l'amélioration de l'espèce*. Thèse doctorat d'Etat, Université de Bordeaux 1, Bordeaux, 444 p.
- Battle, M., 2007. *Modélisation de la branchaison du pin maritime (Pinus pinaster) conduit en ligniculture*. Rapport de fin d'études ENITA, Bordeaux, 49 p.
- Ben Brahim, M., Loustau, D., Gaudillère, J., Saur, E., 1996. Effects of phosphate deficiency on photosynthesis and accumulation of starch and soluble sugars in 1-year-old seedlings of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait). *Annales des sciences forestières* 53(4), pp. 801-810.
- Berthier, S., Kokutse, A., Stokes, A., Fourcaud, T., 2001. Irregular Heartwood Formation in Maritime Pine (*Pinus pinaster* Ait): Consequences for Biomechanical and Hydraulic Tree Functioning. *Annals of Botany* 87, pp. 19-25.
- Birot, Y., Arbez, M., Azoëuf, P., Hoslin, R., charon, D., Brach, J., 1979. Variabilité phénotypique de l'angle du fil du bois en fonction de la hauteur chez le Pin laricio et le Douglas. *Annales des sciences forestières* 36(2), pp. 165-173.
- Björklund, L., 1994. Modelling the interior structure of pine stems. Dans : *Connection between silviculture and wood quality through modelling approaches and simulation softwares*, colloque IUFRO WP S5.01-04, INRA, Sweden, p. 136.
- Blair, R., Olson, J., 1984. Impact of forest management on wood quality. Dans: *Symposium on utilization of the changing wood resource in the South United States*, North Carolina State University, Raleigh, pp. 261-269.

- Boddy, L., 1992. Microenvironmental aspects of xylem defenses to wood decay fungi. Dans : *Defense mechanisms of woody decay fungi*, R. A. Blanchette and A.R. Biggs, Springer-verlag, Berlin, p. 96-132.
- Bonneau, M., 1995. *Fertilisation des forêts dans les pays tempérés : théorie, bases du diagnostic, conseils pratiques, réalisations expérimentales*. ENGREF, Nancy, 368 p.
- Bouafif, H., 2007. Analyse du défilement ainsi que la distribution longitudinale des proportions du bois de coeur et du bois d'aubier chez le pin gris (*Pinus banksiana* Lamb.) dans l'Est du Canada. *Carrefour 2007 de la recherche forestière*, Québec.
- Cabadie, H., Drouineau, S., Tozzi, P., 2006. Forêt - Bois - Papier des emplois dans toute la région. *Le quatre pages INSEE Aquitaine*, n°160, 4 p.
- CAFSA, 1997. *Trait d'union : spécial 50 ans*. CAFSA, Bordeaux, 8 p.
- Castéra, P., 2004. *Plateforme expérimentale sur la Conservation longue durée du Pin maritime par voie humide*. Rapport de fin de projet, INRA, Pierroton, 81 p.
- Castéra, P., Faye, C., El Ouadrani, A., 1996. Prevision of the bending strength of timber with a multivariate statistical approach. *Annales des sciences forestières* 53(4), pp. 885-896.
- Cavaignac, S., 2010. *La ressource en pin maritime du massif landais : état des lieux et perspectives d'évolution*. Rapport Interne FCBA, Moulis, 4 p.
- Cave, I., Walker, J., 1994. Stiffness of wood in fast-grown plantation softwoods: the influence of microfibril angle. *Forest products journal* 44(5), pp. 43-48.
- CEEB, 2008. *Prix et indices nationaux des sciages*. CEEB, Paris, 1p.
- Chantre, G., 2009. *Amplifier le gain génétique et optimiser la gestion des peuplements de pin maritime pour un essor industriel durable*. Rapport final projet Sylvogène, FCBA, Bordeaux, 175 p.
- Chantre, G., Copeaux, D., Alazard, P., Najar, M., 2003. Plantation de pin maritime : comment satisfaire les attentes de tous les acteurs économiques ? Dans : *De la forêt cultivée à l'industrie de demain*. Présenté au VII colloque Arbora : Y a-t-il un modèle économique landais ?, ARBORA, Bordeaux.
- Chantre, G., Emeyriat, R., Moreau, J., 2007. L'industrie du sciage de pin maritime d'Aquitaine à l'épreuve du modèle allemand. *Informations - Forêt* 2(751), AFOCEL, Paris, 6 p.
- Chaperon, H., 1986. *La culture du pin maritime en Aquitaine*. AFOCEL, Paris, 231 p.
- Charron, S., Jourez, B., Marchal, M., Hébert, J., 2007. Étude comparative des caractéristiques physiques et mécaniques du bois des mélèzes d'Europe (*Larix decidua* Mill.), du Japon (*Larix kaempferi* (Lambert) Carr.) et de leur hybride (*Larix x eurolepis* Henry). *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* 7(1), 5-16.
- Clark, A.I., Mcalister, R., Saucier, J., Reitter, K., 1996. *Effect of rotation age on lumber grade, yield, and strength of unthinned loblolly pine*. Forest Products Society, Madison, WI, ETATS-UNIS.

- Copeaux, D., 2003. *Simulations technico-économiques de différents itinéraires sylvicoles pour des plantations de pin maritime dans les Landes de Gascogne*. Mémoire de fin d'étude, ENGREF, Nancy.
- Crémière, L., Alazard, P., Merzeau, D., Daubet, A., 2002. Aperçu historique du programme d'amélioration du pin maritime. Dans: *Le progrès génétique en forêt*. GPMF, Gazinet Cestas, p. 13-20.
- CRPF Aquitaine, 2010. *Les scolytes : des dégâts d'une ampleur alarmante en 2010*. Bordeaux, 4p.
- Deresse, T., Shepard, R.K., 1998. Wood properties of red pine (*Pinus resinosa* Ait.). Miscellaneous Report n° 42, CFRU, University of Main, 17 p.
- Desh, H., Dinwoodie, J., 1996. *Timber structure, Properties, Conversion and use*. MacMillan Press, London.
- Doirat, G., Moreau, J., Chantre, G., Dasilvaperez, D., Reuling, D., Lanvin, J., 2003. Le pin taeda en Aquitaine : un premier aperçu de la qualité du bois. *Informations - Forêt* 4(678), AFOCEL, Paris, 6 p.
- Dumail, J., 1996. *Caractéristiques physiques et mécaniques du bois juvénile de pin maritime (Pinus pinaster)*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, Bordeaux, 227 p.
- Dumail, J.F., Castera, P., 1997. Transverse shrinkage in maritime pine juvenile wood. *Wood Science and Technology* 31(4), pp.251-264.
- Dumail, J., Castéra, P., Morlier, P., 1998. Hardness and basic density variation in the juvenile wood of maritime pine. *Annales des sciences forestières* 55(8), pp. 911-923.
- Dumartin, S., 2009. *Les industries du travail du bois, une spécificité aquitaine*. e-publications, INSEE Aquitaine, 6 p.
- Dupuy, F., 1996. *Le Pin de la discorde, Les rapports de métayage dans la grande Lande*. Maison des sciences de l'Homme, Paris, 410 p.
- Duvergé, J., 2009. *Conjoncture de la Fédération des industries du bois en Aquitaine 2ème semestre 2009 et perspectives 2010*. Note interne FIBA, CESR Aquitaine, 6 p.
- ECOFOR, 2009. *Rapport du groupe de travail "Itinéraires sylvicoles"*. Rapport de synthèse, Bordeaux, 19 p.
- ECOFOR, 2010. *Étude prospective après le passage de la tempête Klaus sur l'adaptation offre / demande en bois en Aquitaine*. Rapport de travail du groupe Filière, Bordeaux, 19 p.
- Ekevad, M., 2005. Twist of wood studs: dependence on spiral grain gradient. *Journal of Wood Science* 51(5), pp. 455-461.
- Eklund, L., Säll, H., 2000. The influence of wind on spiral grain formation in conifer trees. *Trees* 14(6), pp. 324-328.
- Eklund, L., Säll, H., Linder, S., 2003. Enhanced growth and ethylene increases spiral grain formation in *Picea abies* and *Abies balsamea* trees. *Trees* 17(1), pp. 81-86.

- FIBA, 2009. *Pâte et panneaux, consommations et flux de produits connexes et de bois de trituration*. Résultats enquête interne, FIBA, Gradignan, 4 p.
- Gardiner, B., 2005. *Compression Wood in Conifers - the characterisation of its Formation and its Relevance to Timber Quality*. Final report of action QLK5-CT-2001-00177, Forestry Commission, 376 p.
- Gastine, F., Bouvet, A., Deleuze, C., Monchaux, P., 2003. Le réseau des essais AFOCEL fête ses 40 ans. *Revue Forestière Française* LV(1), 1-12.
- Giroud, G., 2005. *Caractérisation de la proportion de bois d'aubier et de duramen chez le bouleau à papier (Betula Papyrifera Marsh.)*. Mémoire M.SC., Université de Laval, Québec, 151 p.
- Gjerdrum, P., Sall, H., Storo, H., 2002. Spiral grain in Norway spruce: constant change rate in grain angle in Scandinavian sawlogs. *Forestry* 75(2), pp. 163-170.
- Guilley, E., Loubère, M., Nepveu, G., 1999. Identification en forêt de chênes sessiles (*Quercus petraea*) présentant un angle du fil du bois intrinsèquement faible. *Canadian Journal of Forest Research* 29(12), pp. 1958-1965.
- Guilley, E., 2000. *La densité du bois de chêne sessile (Quercus petrae Liebl.) : Elaboration d'un modèle pour l'analyse des variabilités intra- et inter-arbre; Origine et évaluation non destructive de l'effet "arbre"; Interprétation anatomique du modèle proposé*. Thèse de doctorat, ENGREF, Nancy, 216 p.
- Hallingbäck, H.R., Jansson, G., Hannrup, B., 2008. Genetic parameters for grain angle in 8-year-old Norway spruce progeny trials and their parent seed orchard. *Annales des sciences Forestières* 65(3), 8 p.
- Hannrup, B., Grabner, M., Karlsson, B., Müller, U., Rosner, S., Wilhelmsson, L., Wimmer, R., 2002. Genetic parameters for spiral-grain angle in two 19-year-old clonal Norway spruce trials. *Annales des sciences Forestières* 59(5-6), pp. 551-556.
- Hansen, J.K., Roulund, H., 1998. Spiral grain in a clonal trial with Sitka spruce. *Canadian Journal of Forest Research* 28(6), pp. 911-919.
- Hébert, J., Herman, M., Jourez, B., 2002. *Sylviculture et qualité du bois de l'épicéa en région Wallonne*. Asbl Forêt Wallonne, Belgique, 157 p.
- Hillis, W., 1987. *Heartwood and tree exudates*. Springer-verlag, 168 p.
- Houllier, F., Ningre, F., Ravart, M., Rittie, D., 1994. *Modelling Spiral Grain in the Tree in relation to Silvicultural treatment*. EC project - Forest program, Final report of task 3, INRA, 10 p.
- IFN, 2008. *La Forêt en chiffre et en cartes*. IFN, 25 p.
- Ikonen, V., 2008. *Modelling the growth and properties of stem and wood of Scots pine (Pinus sylvestris L.) as related to silvicultural management with implications for sawing yield and properties of sawn pieces*. Dissertations Forestales 65, Finnish Society of Forest Science, Joensuu, 41 p.

- Imberty, J., Plantier, E., Vincent, M., 2010. Sciages, produits transformés et contreplaqués résineux - situation et perspectives. *Présentation assemblée générale FIBA*, Arcachon, 42 p.
- Ivkovic, M., Wu, H.X., McRae, T.A., Powell, M.B., 2006. Developing breeding objectives for radiata pine structural wood production. I. Bioeconomic model and economic weights. *Canadian Journal of Forest Research* 36(11), pp. 2920-2931.
- Ivković, M., Gapare, W.J., Abarquez, A., Ilic, J., Powell, M.B., Wu, H.X., 2008. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. *Wood Science and Technology* 43(3-4), pp. 237-257.
- Johansson, M., Kliger, R., 2002. Influence of Material Characteristics on Warp In Norway Spruce Studs. *Wood and Fiber Science* 34(2), pp. 325-336.
- Jozsa, L., Middleton, G., 1997. *Les caractéristiques déterminant la qualité du bois: Nature et conséquences pratiques*. Publication spéciale SP-34F, Forintek, Canada, 42 p.
- Kärenlampi, P., Riekkinen, M., 2002. Pine heartwood formation as a maturation phenomenon. *Journal of wood Science* 48, pp. 467-472.
- Keller, R., 1994. La constitution du bois. Dans: *Le bois matériau d'ingénierie*, textes rassemblés par P. Jodin, A.R.B.O.LOR., Nancy, pp. 13-52.
- Keller, R., Azoeuf, P., Hoslin, R., 1974. Détermination de l'angle de la fibre torse d'arbres sur pied à l'aide d'un traceur radioactif. *Annales des sciences Forestières* 31(3), pp. 161-169.
- Kennedy, R.W., 1995. Coniferous wood quality in the future: concerns and strategies. *Wood Science and Technology* 29(5), pp. 321-338.
- Kliger, I.R., Perstorper, M., Johansson, G., Pellicane, P.J., 1995. Quality of timber products from Norway spruce. *Wood Science and Technology* 29(6), pp. 397-410.
- Kliger, R., Johansson, M., 2004. *Pre-sorting of logs prior to conversion improves straightness of sawn timber*. Report on WP 2.5 STRAIGHT Project, Chalmers University of Technology, Göteborg, 43 p.
- 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.
- Koubaa, A., Isabel, N., Zhang, S., Beaulieu, J., Bousquet, J., 2005. Transition from Juvenile to Mature Wood in Black Spruce (*Picea Mariana* (Mill.) B.S.P.). *Wood and Fiber Science* 37(3), pp. 445-455.
- Kretschmann, D., 2003. Natural materials: Velcro mechanics in wood. *Nature Materials* 2(12), pp. 775-776.
- Kubler, H., 1991. Function of spiral grain in trees. *Trees* 5(3), pp. 125-135.
- Lancelot, R., Lesnoff, M., 2005. *Sélection de modèles avec l'AIC et critères d'information dérivés*. Note d'information, 6 p.
- Larson, P.R., Kretschmann, D.E., Clark, A., Isebrands, J., 2001. *Formation and properties of Juvenile Wood in Southern Pines*. Synopsis, USDA Forest Service, 42 p.

- Leban, J., 1995. Estimation des propriétés des sciages d'une ressource forestière : application à l'épicéa commun. *Revue Forestière Française* XLVIII, pp. 131-140.
- Leban, J., 2002. *Models for the timber quality assessment of the actual forest resource. Methodology for Sitka Spruce*. Forest Research, 29 p.
- Leban, J., Peltola, H., 2009. 6th IUFRO Workshop, preface. *Silva Fennica, Special issue on Forest Resources and Wood Quality* 43(3), pp. 327-328.
- Leonard, J., 1999. Historique de l'utilisation de la fibre de pin maritime. Dans : *De la forêt cultivée à l'industrie de demain : Propriétés et usages du pin maritime*, Actes du VI^{ème} colloque, ARBORA, Bordeaux, pp. 14-27.
- Lindström, H., 1996. Basic Density in Norway Spruce, Part III. Development From Pith Outwards. *Wood and Fiber Science* 28(4), pp.391-405.
- Liu, C., Zhang, S., Cloutier, A., Rycabel, T., 2007. Modeling lumber bending stiffness and strength in natural black spruce stands using stand and tree characteristics. *Forest Ecology and Management* 242(2-3), pp. 648-655.
- Longuetaud, F., 2005. *Détection et analyse non destructive de caractéristiques internes de billons d'Epicéa commun (Picea abies (L.) Karst.) par tomographie à rayons X*. Thèse de doctorat, ENGREF, Nancy, 124 p.
- Loustau, D., Bert, D., Trichet, P., 1999. Fonctionnement primaire et productivité de la forêt landaise : implications pour une gestion durable. *Revue Forestière Française* LI(5), pp. 571-591.
- Lundqvist, S., Hansson, A., Olson, L., 2007. *SilviScan measurements on Maritime pine - French samples cut perpendicular to the fibres*. Rapport n°326, STFI-Packforsk, 24 p.
- Lundstrom, T., Heiz, U., Stoffel, M., Stockli, V., 2007. Fresh-wood bending: linking the mechanical and growth properties of a Norway spruce stem. *Tree Physiology* 27(9), pp. 1229-1241.
- Macdonald, E., Hubert, J., 2002. A review of the effects of silviculture on timber quality of Sitka spruce. *Forestry* 75(2), pp. 107-138.
- Macdonald, E., Moore, J., Connolly, T., Gardiner, B., 2009. *Developing methods for assessing Scots pine timber quality*. Research Note, Forest Research, 8 p.
- Machado, J.S., Cruz, H.P., 2005. Within stem variation of Maritime Pine timber mechanical properties. *Holz als Roh und Werkstoff* 63(2), pp. 154-159.
- Mäkinen, H., 1999. Growth, suppression, death, and self-pruning of branches of Scots pine in southern and central Finland. *Canadian Journal of Forest Research* 29(5), pp. 585-594.
- Maugé, J., 1977. Comment produire un peuplement moderne de pin maritime. *Informations-Forêt* 3(86), AFOCEL, Paris, 8 p.
- Meredieu, C., Dreyfus, P., Cucchi, V., Saint-André, L., Perret, S., Deleuze, C., Dhôte, J., de Coligny, F., 2009. Utilisation du logiciel Capsis pour la gestion forestière. *Forêt-entreprise*, n°186, pp. 32-36.

- Merzeau, D., Canteloup, D., Raffin, A., 2002. Vers la quatrième génération de vergers à graines. Dans: *Le progrès génétique en forêt*, GPMF, Gazinet Cestas, pp. 49-56.
- Moberg, L., 2001. Models of internal knot properties for Picea Abies. *Forest ecology and Management*, n° 147, pp. 123-138.
- Moreau, J., 2005. *Evaluer la qualité sur pied des coupes rases de pin maritime pour l'industrie du sciage*. Rapport de projet, AFOCEL, Moulis en Médoc,
- Muggeo, V.M.R., 2008. Segmented: an R Software to Fit Regression Models with Broken-Line Relationships. *R News* 8(1), pp. 20-25.
- Mutz, R., Guilley, E., Sauter, U.H., Nepveu, G., 2004. Modelling juvenile-mature wood transition in Scots pine (Pinus sylvestris L.) using nonlinear mixed-effects models. *Annales des sciences Forestières*. 61(8), pp. 831-841.
- Najar, M., 2001. *Tarif de cubage du pin maritime conduit en ligniculture*. Rapport interne, AFOCEL, Bordeaux, 8 p.
- Najar, M., De Morogues, F., 2009. Optimiser la gestion des peuplements de pin Maritime pour un essor industriel durable. Dans: *Amplifier le gain génétique et optimiser la gestion des peuplements de pin maritime pour un essor industriel durable*, rapport final projet sylvogène, FCBA, Bordeaux, 175 p.
- Nepveu, G., 1994. Variabilité. Dans : *Le bois matériau d'ingénierie*, textes rassemblés par P. Jodin, A.R.BO.LOR., Nancy, pp. 127-182
- Nepveu, G., 1995. La modélisation de la qualité du bois en fonction des conditions de croissance : définitions et objectifs, entrées nécessaires, sorties possibles. *Revue Forestière Française*, XLVII, pp. 35-44.
- Nyström, J., 2003. Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect. *Computers and Electronics in Agriculture* 41(1-3), pp. 91-99.
- Nyström, J., Grundberg, S., 2007. Industrial measurement of spiral grain on debarked sawlogs and prediction of twist on centre planks after drying. Dans: *Modelling the Wood Chain: Forestry - Wood Industry - Wood Products Markets*, Ghent University, pp. 87-93
- Panshin, A., De Zeeuw, C., 1980. *Textbook of wood technology*. McGraw-Hill, New York, United States.
- Pastuszka, P., Raffin, A., Alazard, P., 2002. Aperçu historique du programme d'amélioration du pin maritime. Dans : *Le progrès génétique en forêt*, GPMF, Gazinet Cestas, pp. 7-12.
- Perillat, M., Muller, P., 2009. *La récolte forestière et l'activité des scieries (Analyse et résultats)*. Rapport d'analyse, AGRESTE Aquitaine, 9 p.
- Pinheiro, J., Bates, D.M., 2000. Mixed-effects models in S and S-PLUS. *Statistics and Computing*, Springer, New York, 528 p.
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D., team, T.R.C., 2009. *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*. R package version 3.1-96.

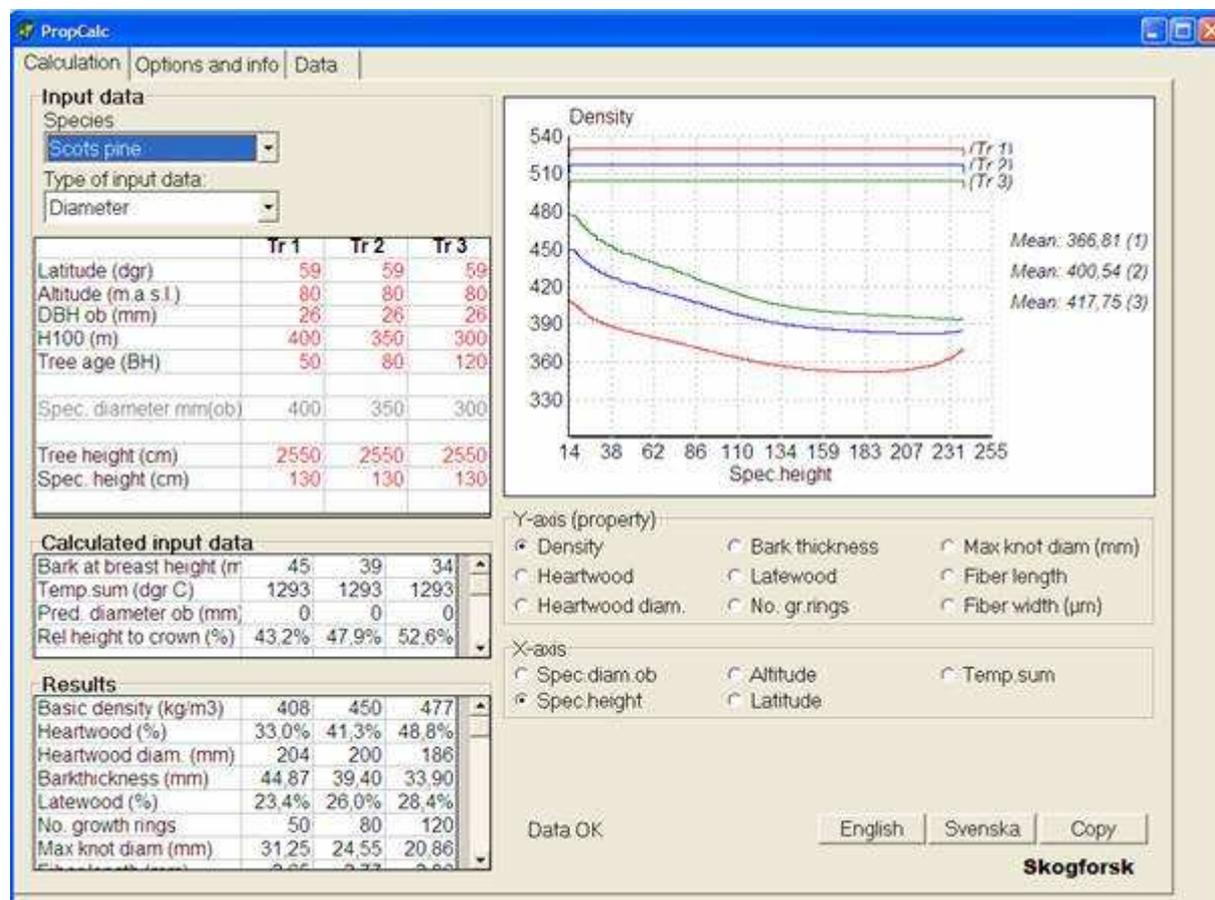
- Pinto, I., Pereira, H., Usenius, A., 2003. Analysis of log shape and internal knots in twenty Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems based on visual scanning and computer aided reconstruction. *Annales des sciences Forestières* 60(2), pp. 137-144.
- Pinto, I., Pereira, H., Usenius, A., 2004. Heartwood and sapwood development within maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems. *Trees* 18, pp. 284-294.
- Pinto, I., 2004. *Raw material characteristics of maritime pine (Pinus pinaster Ait.) and their influence on simulated sawing yield*. VTT publications 533, Espoo, 120 p.
- Pinto, I., Usenius, A., Song, T., Pereira, H., 2005. Sawing simulation of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) stems for production of heartwood-containing components. *Forest products journal* 17.
- Polge, H., 1964. Le bois juvénile des conifères. *Revue Forestiere Francaise* XVI, pp. 473-505.
- Polge, H., 1966. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants : applications dans les domaines Technologique et Physiologique. *Annales des sciences Forestières* 23(1), pp. 1-206.
- R Development Core Team, 2010. *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Radi, M., Castera, P., 1992. Qualification de la forme de deux pins maritimes en liaison avec la structure de leur bois. *Annales des sciences Forestières* 49, pp. 185-200.
- Rameau, J., Mansion, D., Dumé, G., 1994. *Flore forestière française*. IDF, 1785 p.
- Raulier, F., Ung, C., Bégin, J., 1997. Utilité sylvicole de la modélisation fonctionnelle : Application aux érablières. Dans: *Les stress et la productivité de l'érable à sucre : De l'arbre au peuplement*, Centre ACER, St-Hyacinthe, pp. 56-70.
- Rauscent, L., 1999. Le Pin maritime en bois d'oeuvre : situation et perspectives. Dans: *De la forêt cultivée à l'industrie de demain*, Présenté au V colloque ARBORA : Propriétés et usages du pin maritime, ARBORA, Bordeaux, pp. 1-10.
- Reuling, D., 2005. *Potentiel d'utilisation du Pin maritime dans la construction en fonction des conditions de croissance définies dans le modèle pp3*. Rapport de DEA sciences du bois, Université Bordeaux 1, Bordeaux, 70 p.
- Riesco Muñoz, G., Barrio Anta, M., 2010. Physical properties of thinning wood in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.): case study. *European Journal of Forest Research* 129(6), pp.1037-1045.
- Robert, P., 2009. *Le nouveau Petit Robert : dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, 2009. Le Robert, Paris.

- Roper, J., Ball, R., Davy, B., Downes, G., Fife, D., Gaunt, D., Gritton, D., Ilic, J., Koehler, A., McKinley, R., Morrow, A., Northway, R., Penellum, B., Rombouts, J., Pongratic, S., 2004. *Resource evaluation for future profit: Part A — wood property survey of the Green Triangle region. Resource Characterization and Improvement Program*. Forest and Wood Products Research and Development Corporation, CSIRO, 74 p.
- Ryan, M., Gower, S., Hubbard, R., Waring, R., Gholz, H., Cropper Jr., W., Running, S., 1995. Woody tissue maintenance respiration of four conifers in contrasting climates. *Oecologia* 101(2), pp. 133-140.
- Säll, H., 2002. *Spiral grain in Norway spruce*. Växjö University Press, Växjö, 171 p.
- Sargos, J., 1997. *Histoire de la forêt Landaise - Du désert à l'âge d'or*. L'horizon chimérique, Bordeaux.
- Sauter, U., Mutz, R., Munro, B., 1999. Determining Juvenile-Mature Wood Transition in Scots Pine Using Latewood Density. *Wood and Fiber Science* 31(4), pp. 416-425.
- Seco, J.I.F., Barra, M.R.D., 1996. Growth rate as a predictor of density and mechanical quality of sawn timber from fast growing species. *Holz als Roh- und Werkstoff* 54(3), pp. 171-174.
- Sepúlveda, P., 2001. Measurement of spiral grain with computed tomography. *Journal of Wood Science* 47(4), pp. 289-293.
- Shain, L., Hillis, W., 1973. Ethylene production in xylem of *Pinus radiata* in relation to heartwood formation. *Botany* 51(7), pp. 1331-1335.
- Skatter, S., Kucera, B., 1997. Spiral grain - An adaptation of trees to withstand stem breakage caused by wind-induced torsion. *Holz als Roh- und Werkstoff* 55, pp. 207-213.
- Sorensson, C., Burdon, R., Cown, D., Jefferson, P., Shelbourne, C., 1997. *Incorporating spiral grain into New Zealand's radiata pine breeding programme*. Colloque IUFRO, Burdon R.D., Moore J.M., Rotorua, pp. 180-191.
- Stokes, A., Berthier, S., 2000. Irregular heartwood formation in *Pinus pinaster* Ait. is related to eccentric, radial, stem growth. *Forest ecology and Management* 135, pp. 115-121.
- Tarvainen, V., 2005. *Measures for improving quality and shape stability of sawn softwood timber during drying and under service conditions*. VTT publications 584, Espoo.
- Taylor, A.M., Gartner, B.L., Morrell, J.J., 2002. Heartwood formation and natural durability - a review. *Wood and Fiber Science* 34(4), pp. 587-611.
- Thivolle-Cazat, A., Najar, M., 2001. Evolution de la productivité et de la récolte du pin maritime dans le massif landais. Evaluation de la disponibilité future en Gironde. *Revue Forestière Française* LIII(3-4), 350 p.
- Timell, T., 1986. *Compression wood in gymnosperms*. Springer, Berlin, 706 p.
- Trichet, P., Vauchel, F., Bert, D., Bonneau, M., 2000. Fertilisation initiale et réitérée du Pin maritime (*Pinus pinaster* Ait.) : principaux résultats de l'essai de Berganton. *Revue Forestière Française* LII(3), pp. 207-222.

- Vieira, J., Campelo, F., Nabais, C., 2008. Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate. *Trees* 23(2), pp. 257-265.
- Wilhelmsson, L., 2001. *Characterisation of Wood Properties for Improved Utilisation of Norway Spruce and Scots Pine*. Thèse de doctorat, Swedish University of Agricultural Sciences, Uppsala, 219 p.
- Wilhelmsson, L., Arlinger, J., Spangberg, K., Lundqvist, S., Grahn, T., Hedenberg, Ö., Olsson, L., 2002. Models for Predicting Wood Properties in Stems of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 17(4), pp. 330-350.
- Yang, K., Chen, Y., Chiu, C., Hazenberg, G., 1994. Formation and vertical distribution of sapwood in *Cryptomeria japonica* D. Don. *Trees* 9(1), pp. 35-40.
- Yang, K., Hazenberg, G., 1991. Sapwood and heartwood width relationship to tree age in *Pinus banksiana*. *Canadian Journal of Forest Research* 21(4), pp. 521-535.
- Zhang, S., 1995. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology* 29(6), pp. 461-465.
- Zimmerman, M., 1984. Xylem Structure and the ascent of Sap. *Biologia Plantarum* 26(3), p. 165.
- Zobel, B.J., Sprague, J.R., 1998. *Juvenile wood in forest trees*. Springer Series in Wood Science, Springer-verlag, Berlin, 300 p.
- Zobel, B.J., Van Buijtenen, J.P., 1989. *Wood variation: Its causes and control*. Springer Series in Wood Science, Springer-verlag, Berlin, 363 p.

ANNEXE 1 : LOGICIEL PROCALC

Interface du Logiciel Procalc développé à Skogforsk (Wilhelmsson, Arlinger, Spångberg et al. 2002).



ANNEXE 2 : POSTER PRESENTE AU 6EME COLLOQUE IUFRO

« Connection between Forest Resources and Wood Quality: Modelling Approaches and Simulation Software », Koli, Joensuu, Finlande, 8-14 juin 2008



Maritime pine timber quality Simulating the impact of intensive cultivation techniques



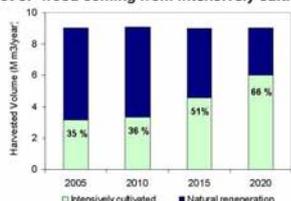
Jérôme MOREAU^{1,2}, Guillaume CHANTRE¹, François BESSON¹, Alain BOUVET¹, Frédéric ROUGER¹, Patrick CASTERA²
¹FCBA, Domaine de Sivaillan, Les Lamberts, F-33480 Moulis en Médoc, France
²USBB, Domaine de l'Hermitage, 69 route d'Arcachon, F-33612 Cestas, France

Introduction

The forest cultivation techniques of maritime pine in the South West France deeply changed in the 1970's → reforestation method shifted from assisted natural regeneration to intensive techniques including soil ploughing, phosphoric fertilization and seeding

The proportion of "intensively cultivated" stands in final cut will increase drastically in the next decades, it is now necessary to anticipate the impact of these reforestation methods on the wood properties for the wood industry

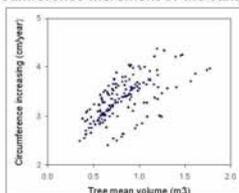
Pinus pinaster annual harvest in South West France : predicted harvest of wood coming from intensively cultivated stands



Materials and methods

164 trees were sampled from 14 stands in South West France covering a wide range of mean volume (from 0.4 m³ to 1.8 m³)

Annual circumference increment of the sampled trees



- On each stand, 4 trees were selected for physical properties measurement. Within ring wood density, latewood content, heartwood diameter and spiral grain angle were measured on wood disks collected at different heights within each tree
- 8 trees were harvested and bucked into 2.2 m long logs. After drying, distortions, visual aspect and mechanical properties of a subsample of 1000 sawn boards were assessed

Measurements on disks



Heartwood, Spiral grain angle



Wood density, latewood content



Measurements on sawn boards



Drying distortions, Visual grading



Mechanical testing



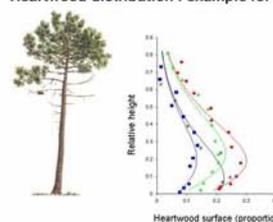
Preliminary results

Models of wood properties variations are now being developed and show good level of prediction of heartwood, grain angle and wood density within the tree

Heartwood

- Heartwood surface is maximum for relative height between 0 and 30%
- Distribution could be describe with the following relation :
 $Heartwood_{rel} = a \cdot k \cdot \exp[-\exp(a \cdot (t_0 - H_{rel}))] \cdot \exp[a \cdot (t_0 - H_{rel})]$
 with $Heartwood_{rel}$: proportion of heartwood surface at a relative height
- Positive effect of the first dead branch height on the height where the heartwood surface is maximum

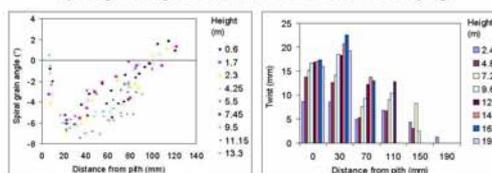
Heartwood distribution : example for 4 trees



Spiral grain angle

- Spiral grain increases (in absolute value) outwards from pith until a maximum reach at a distance between 20 and 40 mm and then gradually decreases
- Position from pith where the maximum angle is reached increases with the height
- Significant tree effect, moderate effect of the growth rate
- Significant correlation spiral grain angle / twist after drying

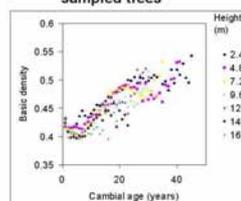
Spiral grain angle evolution, effect on twist after drying



Wood density

- Density increases with cambial age and decreases with the height
- Model including cambial age and inverse of the ring width gives the best prediction

Evolution of the basic density with the cambial age for the sampled trees



Conclusion

The modelling of wood properties will lead to (i) quality assessment for standing trees (ii) log quality evaluation, and optimised allocation of wood assortments.

Based on assumptions of operating costs, the establishment of an economic simulation can help to develop the forest management schedules which will meet the industrial requirements as well as the forest manager goals.

