

**H Baillères, P Castera, G Chantre, J Grima-Petenatti,
F Pichavant, C Plomion, E Robin, P Rozenberg, D Verhaegen**

**UTILISATION DES GENES DE LA LIGNIFICATION POUR
L'AMELIORATION GENETIQUE DE LA QUALITE BIOCHIMIQUE
ET TECHNOLOGIQUE DU BOIS EN VUE D'UNE UTILISATION OPTIMALE
POUR LA PRODUCTION DE PATE ET DE PANNEAUX.**

Compte rendu de fin de recherche d'opération d'une recherche financée par le Ministère de l'Education Nationale de la Recherche et de la Technologie.

DATE : **Novembre, 2001**

Décisions d'aide n° 98C0202

n° 98C0203

n° 98C0204

n° 98C0205

n° 98C0206

n° 98C0207

Nom des organismes bénéficiaires

AFOCEL : Association Forêt Cellulose
SWRE : Smurfit Worldwide research-Europe
INRA : Institut National de la Recherche Agronomique
CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
Univ Bordeaux 1 : Institut du Pin
Univ Toulouse III : Université Paul Sabatier

Nom du responsable scientifique : **Christophe Plomion**

Nom du laboratoire : **Equipe de Génétique et Amélioration des Arbres Forestiers INRA**

Adresse : **BP45, 33611 Gazinet Cestas Cédex**

**H Baillères, P Castera, G Chantre, J Grima-Petenatti,
F Pichavant, C Plomion, E Robin, P Rozenberg, D Verhaegen**

**UTILISATION DES GENES DE LA LIGNIFICATION POUR
L'AMELIORATION GENETIQUE DE LA QUALITE BIOCHIMIQUE
ET TECHNOLOGIQUE DU BOIS EN VUE D'UNE UTILISATION OPTIMALE
POUR LA PRODUCTION DE PATE ET DE PANNEAUX.**

Compte rendu de fin de recherche d'opération d'une recherche financée par le Ministère de l'Education Nationale de la Recherche et de la Technologie.

DATE : **Novembre, 2001**

Décisions d'aide n° **98C0202**

n° **98C0203**

n° **98C0204**

n° **98C0205**

n° **98C0206**

n° **98C0207**

Nom des organismes bénéficiaires

AFOCEL : Association Forêt Cellulose

SWRE : Smurfit Worldwide research-Europe

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour
le Développement

Univ Bordeaux 1 : Institut du Pin

Univ Toulouse III : Université Paul Sabatier

Nom du responsable scientifique : **Christophe Plomion**

Nom du laboratoire : **Equipe de Génétique et Amélioration des Arbres Forestiers INRA**

Adresse : **BP45, 33611 Gazinet Cestas Cédex**

Résumé signalétique

10 à 15 lignes

Ce projet a permis de mettre au point des méthodes d'analyse rapides de nombreuses composantes chimiques, anatomiques, technologiques et rhéologiques de la qualité du bois du pin maritime et de l'eucalyptus, d'étudier la variabilité génétique de ces caractères, et de montrer qu'elle avait une répercussion au niveau industriel. L'utilisation à grande échelle de ces méthodes a permis de localiser les zones chromosomiques impliquées dans le contrôle de la qualité du bois chez ces deux espèces, via une approche de cartographie génétique. D'un point de vu plus cognitif, nous avons pu tester l'hypothèse que la position de certains QTL correspondait à celle de gènes « candidats » impliqués dans la voie de biosynthèse des lignines. Ces résultats devraient permettre de mettre en place des programmes d'amélioration génétique de la qualité du bois chez ces deux espèces, qu'ils soient basés sur des critères phénotypiques ou combinés à des marqueurs moléculaires.

Mots-clefs : Génétique, Qualité du bois, Lignification, Industrie de la trituration, Pin maritime, Eucalyptus

TABLE DES MATIERES

<u>RÉSUMÉ SIGNALÉTIQUE</u>	2
<u>RAPPORT SCIENTIFIQUE FINAL</u>	5
<u>A/ RÉSULTATS ET DISCUSSION</u>	5
<i><u>AR1 : identification de “ gènes candidats ” et localisation sur une carte génétique</u></i>	5
<u>SAR1.1 : établissement de cartes génétiques chez le pin maritime (P4)</u>	5
<u>SAR1.2 : établissement de cartes génétiques chez l’eucalyptus (P2)</u>	6
<u>SAR1.3 : clonage de gènes de structure de la voie de biosynthèse de la lignine chez le pin et l’eucalyptus (P3,P4)</u>	6
<u>SAR1.4: cartographie de gènes “candidats” chez le pin (P4)</u>	8
<u>SAR1.5 : cartographie de gènes “candidats” chez l’eucalyptus (P2)</u>	8
<i><u>AR2 : propriétés biochimiques : la lignine et ses monomères</u></i>	9
<u>SAR2.1 : Taux d’extraits et taux de lignine (méthode chimique) chez le pin (200 analyses) (P1)</u>	9
<u>SAR2.2 : Dosage des monomères de la lignine chez le pin (200 analyses) (P5)</u>	10
I- Méthode utilisée.....	11
II- Détermination de l’erreur expérimentale.....	11
III- Résultats.....	12
<u>SAR2.3 : Taux d’extraits et taux de lignine (méthode chimique sur un billon prélevé à mi-hauteur commerciale) chez l’eucalyptus (200 analyses) (P2 et P5)</u>	12
I- Méthode utilisée.....	12
II- Erreur expérimentale.....	12
III- Résultats.....	12
<u>SAR2.4 : Dosage des monomères de la lignine chez l’eucalyptus (200 analyses) (P5)</u>	13
I- Méthode utilisée.....	13
II- Erreur expérimentale.....	13
III- Résultats.....	13
<i><u>AR3 : Propriétés papetières (P1)</u></i>	21
<u>SAR3.1 : propriétés papetières chez le pin (200 analyses) (P1)</u>	21
<u>SAR3.2 : propriétés papetières chez l’eucalyptus (200 analyses sur le billon prélevé à mi-hauteur)</u>	22
<i><u>AR4 : propriétés technologiques</u></i>	24
<u>SAR4.1 : microdensitométrie chez le pin (200 analyses) (P4)</u>	24
<u>SAR4.2 : microdensitométrie chez l’eucalyptus (200 analyses) (P4)</u>	24
I. Méthodes.....	25
II. Résultats.....	28
<u>II.A. Recherche de variabilité pour des caractères mdm chez le pin maritime et l’eucalyptus</u>	28
<u>II.B. Liens variations climatiques – densité chez le pin maritime</u>	29
<u>II.B.1. Liens climat variables mdm du modèle bi – bf</u>	29
<u>II.B.2. Climat et modèle à pas adaptatif</u>	30
<u>II.C. Relation MOE – densité chez l’eucalyptus</u>	32
III. Discussion et conclusion.....	35
<u>III.A. Variabilité</u>	35
<u>III.B. Climat</u>	36
<u>III.C. Module d’élasticité</u>	36
<u>SAR4.3 : mesure de densité au pilodyn chez le pin (200 analyses) (P4)</u>	37
<u>SAR4.4 : mesure de densité au pilodyn chez l’eucalyptus (200 analyses) (P2)</u>	37
<u>SAR4.5 : caractérisation rhéologique de fibres de pin pour des applications en panneaux: mise au point des méthodes sur des échantillons de tailles différentes (P4)</u>	37
I. L’OSB : matériel et méthodes.....	38
II. OSB : principaux résultats.....	39
<u>II.A. Variabilité intra/inter arbres</u>	39

II.B. Propriétés mécaniques.....	40
II.C. Modèle développé.....	41
II.C.1. Modélisation de la variabilité des propriétés mécaniques des fibres.....	42
II.C.2. Analyse et modélisation de l'architecture et des propriétés de panneaux de fibres.....	44
III. Conclusions	46
SAR4.6 : caractérisation rhéologique de fibres de pin pour des applications en panneaux: typage de 200 arbres (P4).....	46
SAR4.7 : caractérisation rhéologique de fibres d'eucalyptus : phase exploratoire (P2)	47
SAR4.8 : caractérisation rhéologique de fibres d'eucalyptus : typage de 200 arbres (P2).....	47
☐ Ces deux sous-actions de recherches sont présentées à l'annexe EUCALYPTUS.....	47
AR5 : mesures dendrométriques.....	47
SAR5.1 : chez le pin (200 mesures) (P4).....	47
SAR5.2 : chez l'eucalyptus (200 mesures) (P2)	47
AR6 : Analyse des corrélations entre caractères de qualité du bois	47
SAR6.1 : chez le pin (P1, 4, 5), piloté par P4.....	47
SAR6.2 : chez l'eucalyptus (P1, 2, 5), piloté par P2	50
AR7 : détection de OTL.....	50
SAR7.1 : chez le pin (P4)	50
SAR7.2 : chez l'eucalyptus (P2).....	51
AR8 : étude de la variabilité phénotypique de caractéristiques biochimiques et technologiques dans la première population d'amélioration du pin maritime.....	52
SAR8.1 : typage de 67 arbres "plus" pour le taux d'extraits, le taux de lignine et microtests Kraft en lessiveurs de 12ml (P1).....	52
AR9 : Impact technico-économique (P6).....	55
I Détermination de la cinétique de cuisson.....	55
II Détermination des propriétés papetières des différents lots.....	57
II.A Détermination du rendement	57
II.B Analyse de la liqueur noire produite.....	58
II.C Caractéristiques mécaniques des pâtes.....	59
III Conclusions	61
B) RÉFÉRENCES CITÉES DANS LE TEXTE.....	63
C/ DISSÉMINATION DES RÉSULTATS DE LA RECHERCHE.....	65
Publications.....	65
Présentations orales.....	66
Posters.....	67
Etudiants ayant travaillé dans le cadre du projet.....	67
Autres activités de dissémination de résultats :	68
FICHE SIGNALÉTIQUE.....	69
P1 : AFOCEL	70
P2 : CIRAD.....	70
P3 : CNRS	72
P4 : INRA	72
INRA Orléans.....	72
INRA Pierroton	72
Composante INRA du LRBB	73
P5 : INSTITUT DU PN – UNIVERSITÉ BORDEAUX I.....	74
P6 : SWRE.....	74

Rapport scientifique FINAL

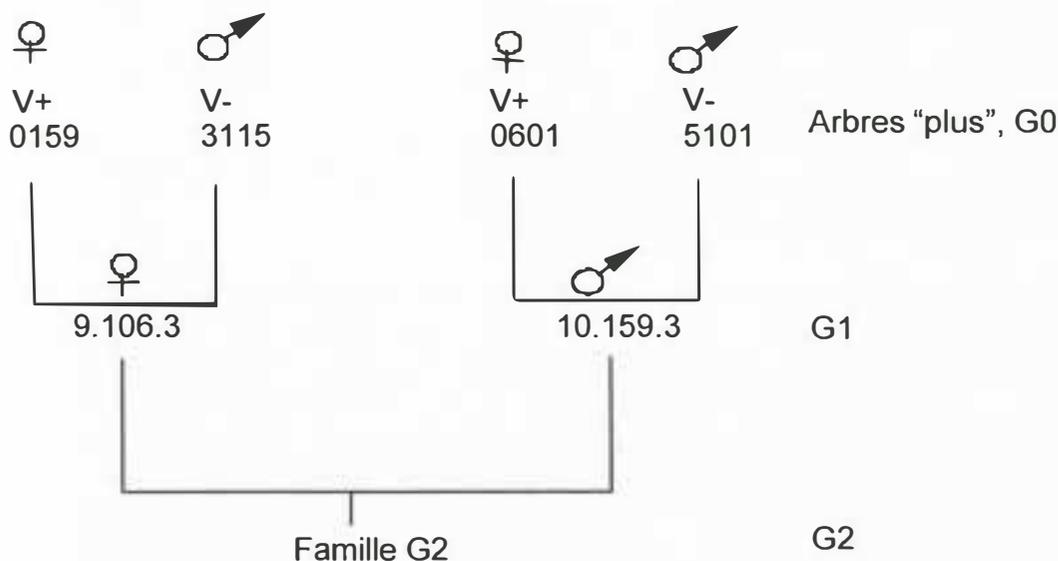
Conformément au contrat de Recherche, le comité technique s'est réuni au complet les 9/11/99, 25/10/00 et 25/10/01. Les résultats des recherches ont été présentés par chaque équipe et des projets de publication ont été présentés et discutés. Ce rapport final suit l'ordre de l'annexe technique. Dans une première partie, nous présentons et discutons les résultats obtenus dans chaque action de recherche (AR) et sous-action de recherche (SAR). Les partenaires seront référencés selon la nomenclature suivante : **P1 AFOCEL, P2 CIRAD, P3 Univ. Toulouse, P4 INRA, P5 Univ. Bordeaux, P6 SMURFIT-SWRE**. Dans une seconde partie, les publications, posters, présentations orales et rapports de stage sont listés. Un jeu des publication est également fourni.

A/ Résultats et discussion

AR1: identification de "gènes candidats" et localisation sur une carte génétique

SAR1.1 : établissement de cartes génétiques chez le pin maritime (P4)

Nous avons utilisé une descendance de plein-frères appartenant à la troisième génération du programme d'amélioration du pin maritime (cf schéma ci-dessous). Cette famille a été établie par croisement contrôlé en 1980 et les graines plantés en 1982 à Malente (33). Cette famille a été choisie, car les 4 grands-parents (G0) (arbres élites sélectionnés de façon massale en forêt) avaient des AGC très différentes pour la croissance en hauteur. Sachant que ce caractère est en partie défini par le génotype (héritabilité de 0.4 en moyenne), on peut penser que les allèles des gènes impliqués dans la croissance sont distincts chez les GP de bonnes AGC (vigueur +) et de mauvaises AGC (vigueur -). Par conséquent en troisième génération (G2), une variabilité importante des caractères de croissance est attendue. Cette dernière est garante de la possibilité d'analyse de l'architecture génétique de la croissance, et de la qualité du bois si cette dernière est en relation avec la croissance.



Cette famille comptait 200 individus âgés de 13 ans. Les deux parents de cette famille ont été cartographiés à l'aide de différents types de marqueurs moléculaires :

- 650 AFLP (amplified fragment length polymorphism) qui ont permis de saturer les 2 cartes génétiques
- 40 EST (expressed sequenced tags) correspondants à des gènes
- 10 microsatellites

Ces 50 derniers marqueurs étant positionnés également chez d'autres espèces de conifères (marqueurs orthologues) ils ont permis d'identifier les groupes de liaison homologues à ceux du pin maritime, ce qui devrait bientôt permettre de comparer la position des QTL.

L'ensemble de l'information (marqueurs et cartes génétique) est disponible à l'URL suivante: <http://www.pierroton.inra.fr/genetics/pinus/Map3/index.html>

SAR1.2 : établissement de cartes génétiques chez l'eucalyptus (P2)

Une famille d'hybrides interspécifiques *E. grandis* x *E. urophylla* de la deuxième génération du programme d'amélioration mené par le CIRAD a été choisie. Cette famille adulte comporte 200 individus dont 93 avaient déjà été typés à l'aide de 150 amorces RAPD (Verhaegen et Plomion, 1996). Deux cartes génétiques des parents avaient été réalisées. Dans le cadre de ce projet, 150 individus supplémentaires ont été typés avec 50 amorces choisies pour amplifier des marqueurs espacés tous les 15 cM environ. Les cartes ont été reconstruites et la technique utilisée a permis de saturer les deux génomes. L'ensemble de l'information (marqueurs et cartes génétique) est disponible à l'URL suivante: <http://www.pierroton.inra.fr/genetics/euca/>

SAR1.3 : clonage de gènes de structure de la voie de biosynthèse de la lignine chez le pin et l'eucalyptus (P3,P4)

Pin maritime

Grâce à des constructions de paires d'amorces judicieuses, nous avons pu amplifier par PCR des fragments des gènes candidats suivants

- PAI.: phénylalanine ammonialyase
- C4H: cinnamate-4-hydroxylase
- COMT: O-méthyl transférase
- CCoAOMT: cafféoyl CoA méthyl transférase
- 4CL: 4-coumarate CoA ligase
- CCR: cinnamoyl CoA réductase
- CAD: alcool cinnamylique deshydrogénase)
- Deux facteurs de transcription de type Myb (Myb 1 et Myb 2) connus pour réguler cette chaîne de biosynthèse

Dans un projet parallèle de séquençage systématique nous avons également obtenu des étiquettes (EST, expressed sequence tag) des ces gènes. Les alignements des séquences génomiques (obtenus pour chacun des deux parents de la famille G2) et des EST obtenus chez le pin maritime, avec les EST correspondants aux mêmes gènes chez le pin taeda (disponibles dans les bases de données publiques), montre que nous avons séquencé les bons gènes chez le pin maritime. L'ensemble des résultats est résumé dans le tableau suivant et le détail est disponible à l'annexe PIN MARITIME.

Nom du gène	Pin maritime		Autre espèce (<i>P.taeda</i>)		
	Fragment PCR génomique	EST	Gène	ARNm	EST
4 coumarate ligase (4cl)	3	5	1	1	9
Phenylalanine ammonia lyase (pal)	6	2	1	*	19
Cinnamyl alcool dehydrogenase (cad)	6	1	1 (<i>P.radiata</i>)	*	15
caffaic acid ortho-methyltransferase (comt)	4	1	1 (<i>P.radiata</i>)	1 (<i>P.radiata</i>)	8
Myb I	5				1
Myb II	6				2
cinnamoyl-CoA reductase (ccr)	0	3			1
caffeoyl-CoA O-methyltransferase (CCoAOMT)	0	5	1	1	23

*disponible mais non utilisé dans l'alignement

Eucalyptus :

Le criblage d'une banque de cDNA de xylème d'*Eucalyptus gunnii* disponible au laboratoire a permis d'obtenir les séquences complètes des cDNAs

- ✓ codant les enzymes spécifiques de la voie de synthèse des monolignols (unités monomériques des lignines) : la Cinnamyl alcool deshydrogenase (CAD2), la Cinnamoyl CoA reductase (CCR). Dans ces cas, la structure (position et taille des introns/exons) et leurs séquences complètes sont également disponibles.
- ✓ des enzymes de méthylation : la Caffeate O-methyltransferase (COMT), la Caffeoyl CoA O methyltransferase (CCoAOMT) d'*Eucalyptus gunnii*

Des fragments PCR ont été générés pour la Phenylalanine ammonialyase (PAL), la 4-cinnamate CoA ligase (4CL), la ferulate 5 hydroxylase (F5H).

Les séquences sont fournies à l'annexe PIN MARITIME.

En parallèle de ce travail sur les gènes de structure de la lignine, les résultats obtenus au laboratoire sur l'étude fonctionnelle des promoteurs des gènes CAD2 et CCR nous ont conduit à nous intéresser aux facteurs de transcription de la famille MYB. Un faisceau d'arguments convergents nous laisse penser que des facteurs MYB sont impliqués dans le contrôle transcriptionnel de la biosynthèse des lignines et sont par conséquent de bons candidats pour le contrôle génétique de la qualité du bois. Afin d'obtenir des facteurs MYB préférentiellement exprimés dans le xylème, nous avons criblé la banque avec un oligonucléotide dégénéré correspondant à une région très conservée dans la répétition R3 du domaine de liaison à l'ADN. Ce criblage a conduit à la caractérisation de trois facteurs Mybs : EgMyb1 ; EgMyb2.

Toutes les séquences complètes ou partielles (voir tableau 1 de l'annexe EUCALYPTUS) ont été transmises au partenaire 2 pour cartographier les gènes correspondants sur les cartes génétiques *E urophylla* et *grandis*. Dans le cas de la F5H, la longueur du fragment n'étant pas suffisante pour permettre la localisation du gène, nous avons utilisé le fragment PCR pour cribler la banque de cDNA et obtenir un fragment plus long mais sans succès. Il semble que ce gène ne soit pas présent dans notre banque.

SAR1.4: cartographie de gènes “candidats” chez le pin (P4)

Une batterie de méthodes de révélation du polymorphisme a été utilisée pour essayer de cartographier ces gènes sur les cartes génétiques : PCR-RFLP, SSCP (6 conditions testées), hétéroduplexe, DGGE, sans succès. Le faible niveau de polymorphisme (quelques points ponctuels) a été vérifié par séquençage. Cependant, nous avons réussi à localiser la PAL et la COMT sur une autre carte du pin maritime (<http://www.pierroton.inra.fr/genetics/pinus/map1.html>) que nous sommes en train d'aligner avec les cartes génétique du pedigree étudié dans le cadre de ce projet, à l'aide de marqueurs microsatellites. Par ailleurs nous avons engagé des projets de cartographie comparée entre espèces de conifères (Pin maritime, Pin taeda, Pin radiata et Epicéa commun). Par exemple 4CL et la PAL sur le groupe de liaison n°6, la COMT sur le n°3, la CAD sur le n°8 de la carte de l'épicéa; voir <http://www.pierroton.inra.fr/genetics/Picea/>), Là aussi les cartes génétiques où sont localisés certains de ces gènes sont en train d'être alignées. Nous pourrions donc rapidement prédire la position des gènes d'intérêt sur les cartes où sont localisés les QTL chez le pin maritime.

SAR1.5 : cartographie de gènes “candidats” chez l'eucalyptus (P2)

Le partenaire P3 a fourni les séquences nucléotidiques de 8 gènes de structure (CAD, CCR, CCoAOMT, COMT, PAL, 4CL, C4H, F5H) de la voie de biosynthèse des lignines et 3 gènes de régulation du métabolisme des phénylpropanoïdes (Myb1, Myb2 et Myb4). Les paires d'amorces compatibles et les conditions d'amplification ont été mises au point pour l'ensemble de ces gènes. Le gène de la F5H n'a pas pu être étudié car la séquence fournie était trop courte pour définir des amorces spécifiques. Après l'amplification spécifique de ces gènes par PCR (Polymerase Chain Reaction), le polymorphisme allélique a été révélé sur les 200 arbres de la famille par la technique SSCP (Single strand Conformation Polymorphism) avec une coloration au nitrate d'argent. La cartographie génétique a ensuite été réalisée en utilisant une stratégie en double pseudo-testcross. Le génotypage de cette famille d'hybrides interspécifiques a permis le positionnement d'un total de 11 gènes sur les cartes génétiques d'*Eucalyptus urophylla* et *Eucalyptus grandis*.

- Le polymorphisme de 4 gènes observé chez les 2 parents a permis le positionnement de la CCR (Cinnamoyl CoA réductase), la CAD (Alcool Cinnamylique Dehydrogénase), la CCoAOMT (Caféoyl CoA 3-O-méthyltransférase) et du facteur de transcription myb 2 sur les cartes d'*Eucalyptus urophylla* et *Eucalyptus grandis*.

- Le polymorphisme observé uniquement chez le parent femelle a permis le positionnement de la PAL (Phénylalanine Ammonia-Lyase), la COMT1 et la COMT2 (Acide Caféique 3-O-méthyltransférase), la 4CL (4-Coumarate CoA ligase) et des facteurs de transcription myb 1 et myb 4 sur la carte génétique d'*Eucalyptus urophylla*. L'homozygotie chez le géniteur mâle a été contrôlé par séquençage.

- Le polymorphisme observé uniquement chez le parent mâle a permis le positionnement de la C4H (4 Hydroxycinnamate CoA ligase) sur la carte génétique d'*Eucalyptus grandis*. Le manque de variabilité chez le géniteur femelle a également été contrôlé par séquençage.

L'ensemble de ces gènes de structure et de régulation de la voie de biosynthèse des lignines se positionne sur 5 groupes de liaison différents : les 3 facteurs de transcription Myb1, Myb2 et Myb4 sur le groupe de liaison n°2 ; la PAL et la CCR sur le groupe de liaison 6 ; la COMT1 et la COMT2 sur le groupe de liaison n°7 ; la CAD et la CCoAOMT sur le groupe de liaison n°10 ; enfin la 4 CL et la C4H sur le groupe de liaison n°11.

Les techniques utilisées ont été très efficaces pour la cartographie des différents gènes étudiés. La forte hétérozygotie de la famille d'Eucalyptus étudiée explique en partie ce résultat.

Les techniques utilisées ont été très efficaces pour la cartographie des différents gènes étudiés. La forte hétérozygotie de la famille d'Eucalyptus étudiée explique en partie ce résultat.

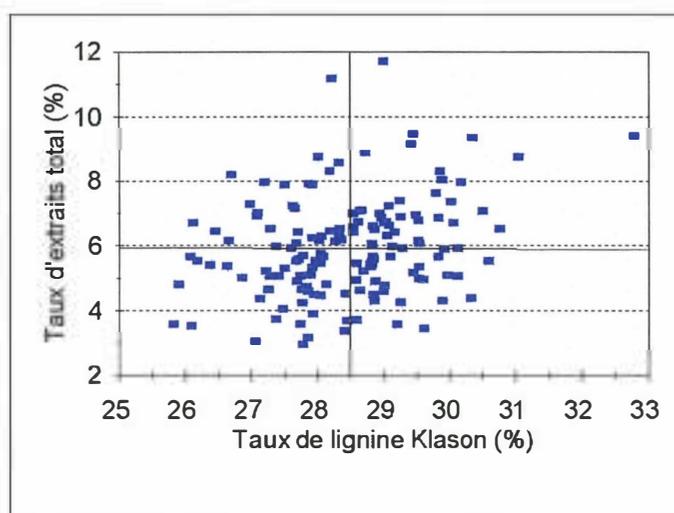
AR2 : propriétés biochimiques : la lignine et ses monomères

SAR2.1 : Taux d'extraits et taux de lignine (méthode chimique) chez le pin (200 analyses) (P1)

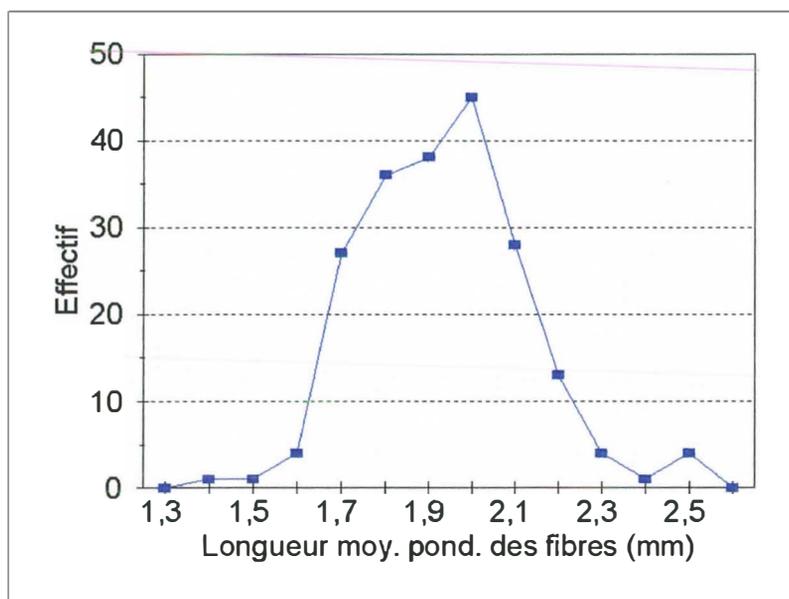
Un protocole d'extraction a été mis au point avec l'appareil SOXTEC, appareil d'analyse rapide du taux d'extraits, suivant une séquence pré-programmée eau-acétone. Le taux d'extraits mesuré s'est révélé comparable à celui d'un échantillon de référence de l'Institut du Pin. L'extraction est très répétable, sans effet opérateur, et beaucoup plus rapide que par la méthode conventionnelle. Par la suite, la même séquence d'extraction a été appliquée aux 200 échantillons composant la famille de plein-frères et a mis à jour une importante variabilité. Le coefficient de variation est de 27% pour un taux d'extraits total de 6,5% en moyenne. L'essentiel des extraits est issu de la phase d'extraction à l'eau, ce qui traduit une faible teneur en acides résiniques, normale pour des individus encore jeunes.

Le taux de lignine a été mesuré par la méthode de Klason (T 222 om-88) en double sur chaque échantillon ainsi extrait.

Une importante variabilité intra-familiale du taux de lignine est ainsi révélée (de 26 à 33%), indépendante de la variation du taux d'extraits (de 3 à 12%), même si le coefficient de variation du taux de lignine reste (CV = 4,3%) reste très inférieur à celui du taux d'extraits (CV = 25%).



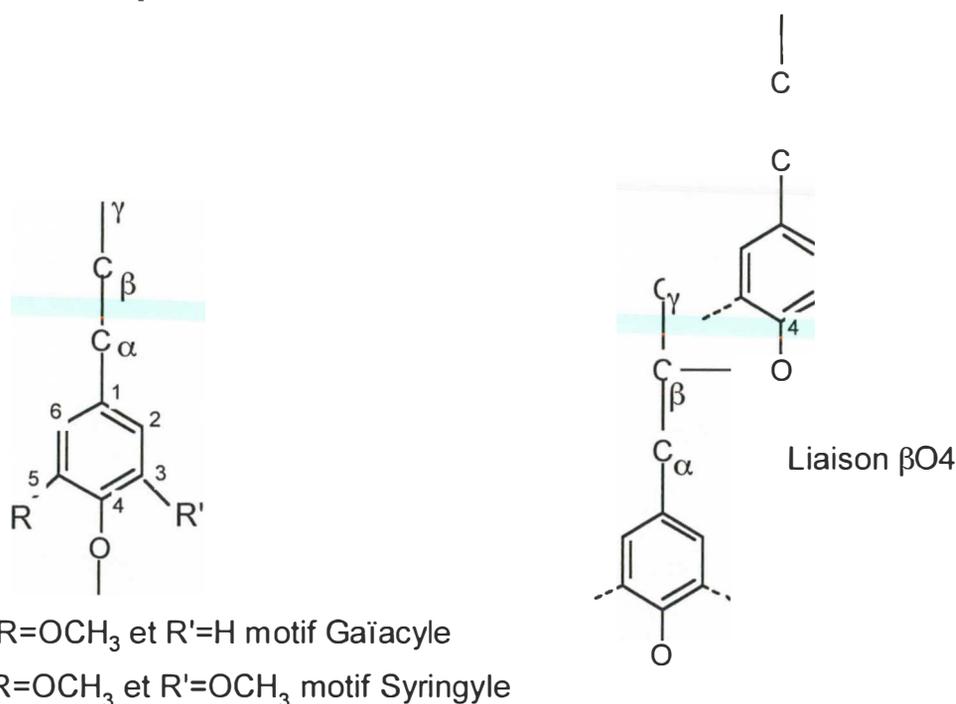
La morphologie des fibres a ensuite été estimée en double par l'appareil PQM 1000 : longueur, largeur, masse linéique et indice de courbure (curl index). La figure suivante illustre la distribution observée de la longueur des fibres, pour un coefficient de variation de 9,7 %. Ce coefficient de variation atteint 9,2 % pour la masse linéique et 8,2% pour l'indice de souplesse. Il est beaucoup plus modeste pour la largeur, paramètre de moindre intérêt.



Les relations entre la morphologie des fibres et les propriétés papetières (indices d'éclatement et de déchirure, longueur et énergie à la rupture...) fait actuellement l'objet de travaux de recherche chez le pin maritime menés par l'AFOCEL.

SAR2.2 : Dosage des monomères de la lignine chez le pin (200 analyses) (P5)

La lignine est un polymère phénolique tridimensionnel amorphe qualitativement variable en fonction de sa composition en monomères qui diffère selon leur degré de méthylation (OCH_3) : le para-hydroxyphenyl (H) ne comporte pas de groupement (OCH_3), alors que le guaiacyl (G) et le syringyl (S) en comportent respectivement 1 et 2. Les monomères de base sont représentés ci-après

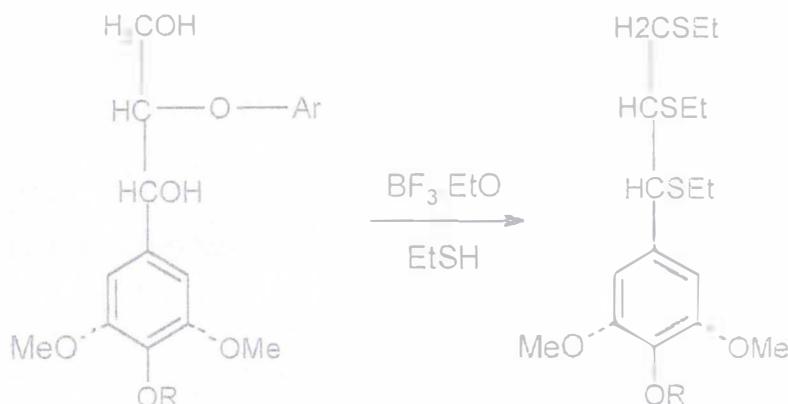


Les liaisons entre les différentes unités sont de type carbone-carbone et carbone-éther. Le type de liaison intermonomérique le plus fréquemment rencontré dans les lignines est la liaison

labile β -O-4 alkyl aryl éther (environ 50%). La lignine issue du Pin Maritime est majoritairement composée d'unités G et en proportion moindre d'unité H. La lignine d'Eucalyptus est elle surtout composée d'unités G et S. Les modèles de structure sont données en figures 1 et 2.

I- Méthode utilisée

Le dosage des monomères de la lignine a été fait par thioacidolyse, méthode mise au point par Catherine LAPIERRE. Cette méthode consiste en une dépolymérisation de la lignine par coupure sélective des liaisons β O-4, grâce à une acidolyse douce par le trifluoroéthérate de bore en présence d'un nucléophile l'éthanethiol. Le schéma de la réaction est représentée ci-après :



Les résidus de thioacidolyse obtenus sont ensuite silylés afin d'être analysés et dosés par chromatographie en phase gazeuse. Le protocole détaillé mis en place au laboratoire est donné en figure 3.

Les résultats de la composition monomérique sont exprimés en pourcentage par rapport au bois et en μ mole/g de lignine.

Compte tenu du grand nombre d'échantillons (Pin Maritime + Eucalyptus) à étudier par cette technique, nous n'avons pas pu mobiliser l'appareil chromatographique pendant 2 ans uniquement pour ces analyses. Régulièrement nous avons dû démonter et remonter la colonne spécifique à la thioacidolyse, ce qui engendre dans nos résultats des phénomènes de séries. Nous ne tiendrons pas compte des valeurs absolues pour la composition monomérique. Seuls les rapports H/G et S/G seront considérés.

II- Détermination de l'erreur expérimentale

L'erreur expérimentale a été déterminée sur 10 échantillons de Pin Maritime témoin ajoutés régulièrement dans les séries d'analyse. Le tableau suivant résume les statistiques descriptives des variables étudiées :

Variables	Moyenne	Ecart type	Coef. variation	Coef. Variation (en %)
H (%bois extrait)	0.5020	0.1044	0.21	21
G (%bois extrait)	12.83	1.8148	0.14	14
H/G	0.042	0.0079	0.188	18.8

III- Résultats

Nous avons étudié une population de 186 individus. Les échantillons broyés et extraits nous ont été fournis par L'AFOCEL (partenaire P1) qui a également déterminé la lignine de Klason. L'ensemble des résultats est disponible à l'adresse URL suivante: http://www.pierroton.inra.fr/MENRT_lignine (mot de passe arbre_biotech). Le tableau suivant résume les statistiques descriptives des variables étudiées :

Variables	Moyenne	Ecart type	Coef. variation	Coef. Variation en %
H (%bois extrait)	0.2983	0.1241	0.416	41.6
G (%bois extrait)	13.9967	2.0374	0.146	14.6
H/G	0.02326	0.009537	0.386	38.7

Compte tenu de l'erreur expérimentale définie précédemment, la population étudiée présente une variabilité entre individus pour la teneur en unité H et par conséquent pour le rapport H/G. Il est donc possible de sélectionner des individus présentant des rapports H/G importants ou faibles.

SAR2.3 : Taux d'extraits et taux de lignine (méthode chimique sur un billon prélevé à mi-hauteur commerciale) chez l'eucalyptus (200 analyses) (P2 et P5)

I- Méthode utilisée

La teneur en lignine est déterminée selon la norme Tappi T222 om 83 qui consiste en une hydrolyse de la cellulose et des hémicelluloses en milieu acide sulfurique concentré et précipitation de la lignine. Les analyses sont réalisées sur des échantillons de bois d'Eucalyptus broyés et extraits par le CIRAD (partenaire P2). Les extractions ont été réalisées au soxhlet selon les séquences d'extraction suivantes : 4 heures acétone/éthanol, 4h éthanol, 4h eau.

II- Erreur expérimentale

L'erreur expérimentale a été déterminée sur 25 échantillons d'Eucalyptus témoin ajoutés régulièrement dans les séries d'analyse. Le tableau suivant résume les statistiques descriptives des variables étudiées :

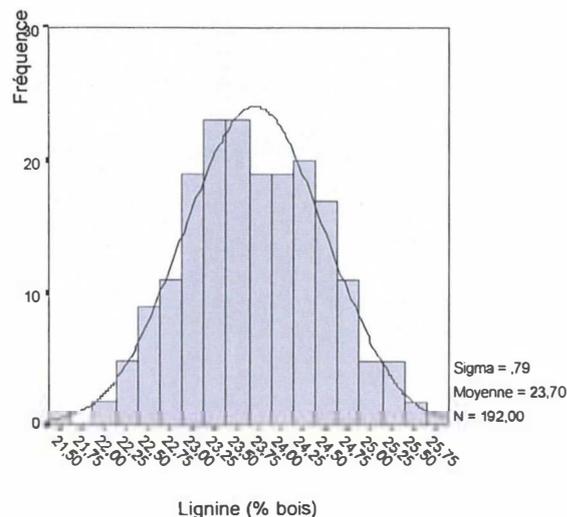
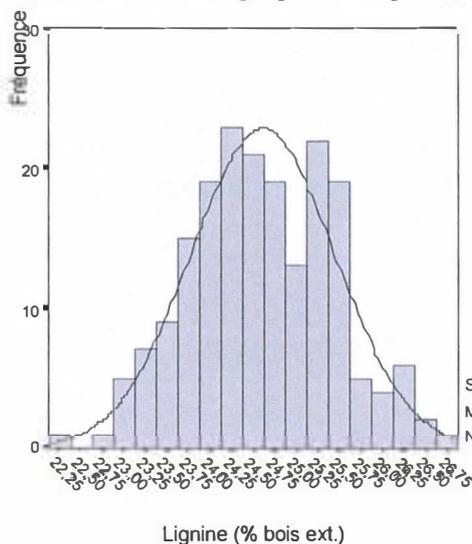
Variables	Moyenne	Ecart type	Coef. variation	Coef. Variation en %
<u>Lignine (%bois extrait)</u>	22.95	0.3835	0.0167	1.67
<u>Lignine (%bois)</u>	21.89	0.3922	0.0179	1.79

III- Résultats

Nous avons étudié une population de 193 individus. L'ensemble des résultats est disponible à l'adresse URL suivante: http://www.pierroton.inra.fr/MENRT_lignine. Le tableau suivant résume les statistiques descriptives des variables étudiées :

Variables	Moyenne	Ecart type	Coef. variation	Coef. Variation (en %)
Lignine (%bois extrait)	24.61	0.8356	0.034	3.4
Lignine (%bois)	23.698	0.7944	0.033	3.3

Compte tenu de l'erreur expérimentale définie précédemment, la population étudiée présente une variabilité entre individus pour la teneur en lignine. Il est donc possible de sélectionner des individus présentant des teneurs en lignine extrêmes. La répartition de la population est donnée sous forme de graphes ci-après :



SAR2.4 : Dosage des monomères de la lignine chez l'eucalyptus (200 analyses) (P5)

I- Méthode utilisée

Le dosage des monomères se fait par thioacodolyse comme décrit dans le paragraphe SAR2.2

II- Erreur expérimentale

L'erreur expérimentale a été déterminée sur 25 échantillons d'Eucalyptus témoin ajoutés régulièrement dans les séries d'analyse. Le tableau suivant résume les statistiques descriptives :

Variable	Moyenne	Ecart type	Coef. variation	Coef. Variation (en %)
S/G	5.73	0.5306	0.093	9.3

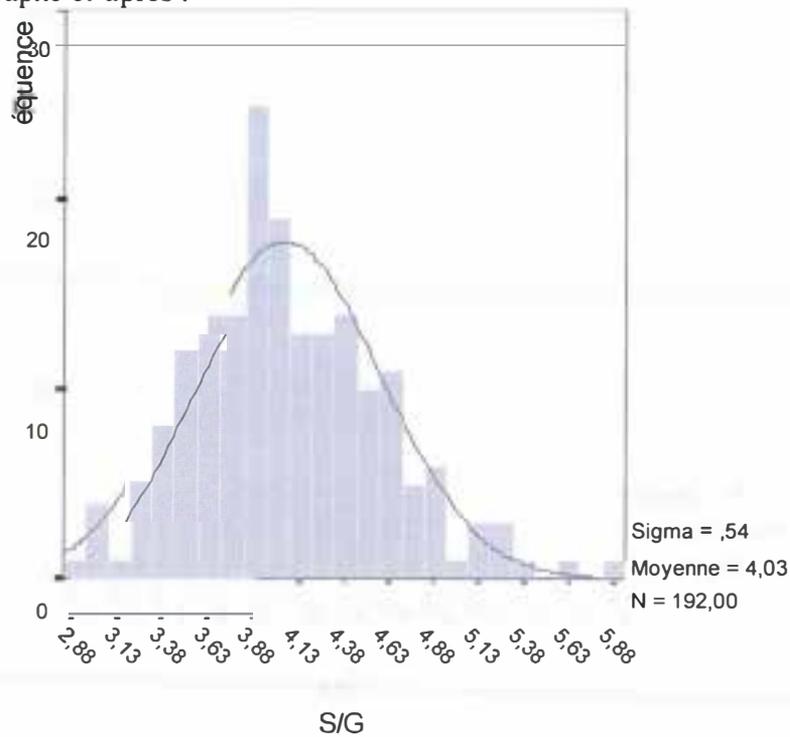
III- Résultats

Nous avons étudié la composition monomérique des lignines sur une population de 193 individus. L'ensemble des résultats est disponible à

l'adresse URL suivante: http://www.pierroton.inra.fr/MENRT_lignine. Le tableau suivant résume les statistiques descriptives.

Variable	Moyenne	Ecart type	Coef. variation	Coef. Variation en %
S/G	4.034	0.5366	0.133	13.3

Compte tenu de l'erreur expérimentale définie précédemment, la population étudiée présente une variabilité entre individus pour le rapport S/G. Il est donc possible de sélectionner des individus présentant des rapports S/G extrêmes. La répartition de la population est donnée sous forme de graphe ci-après :



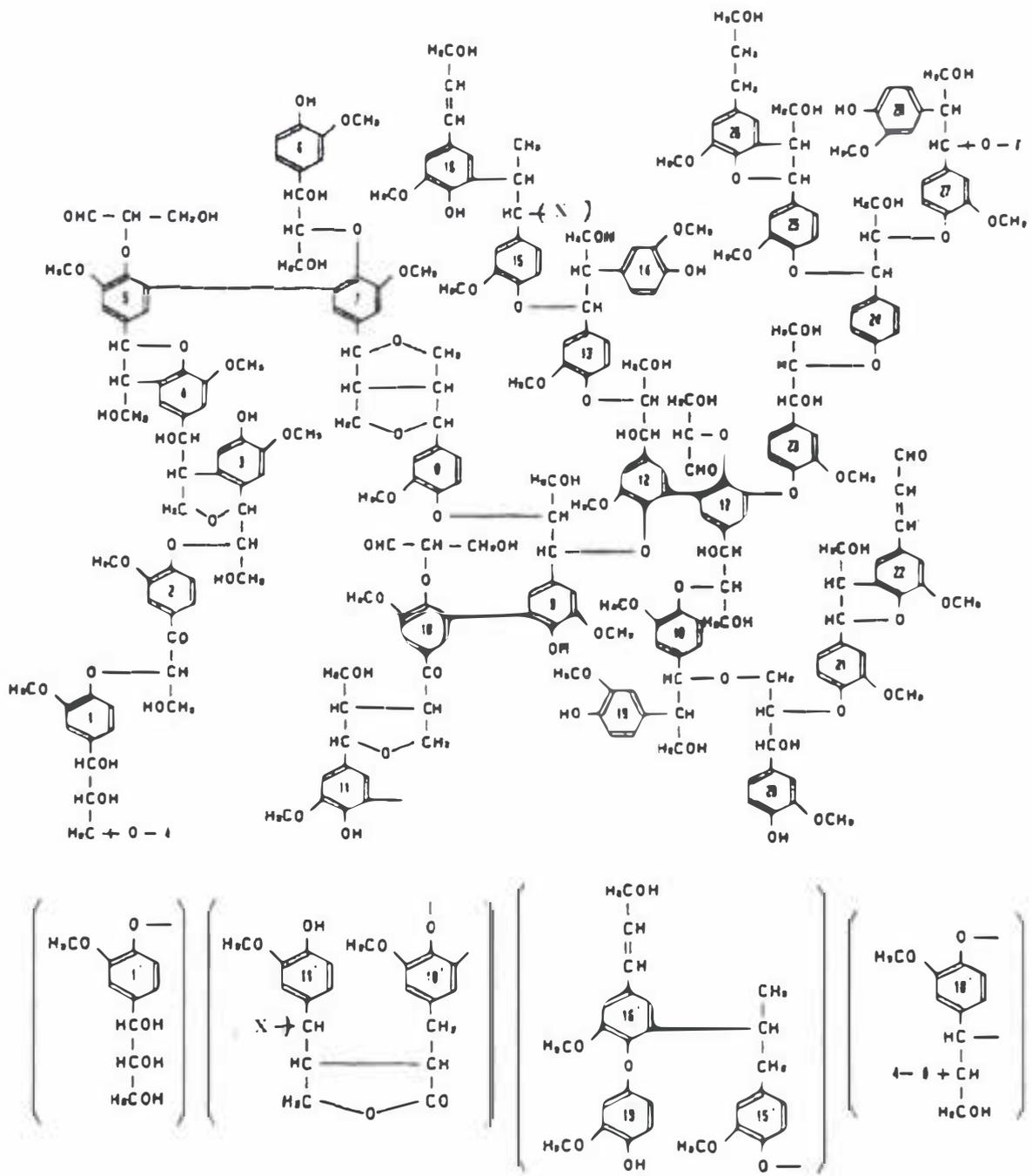


Figure 1 : Modèle de lignine de bois tendre

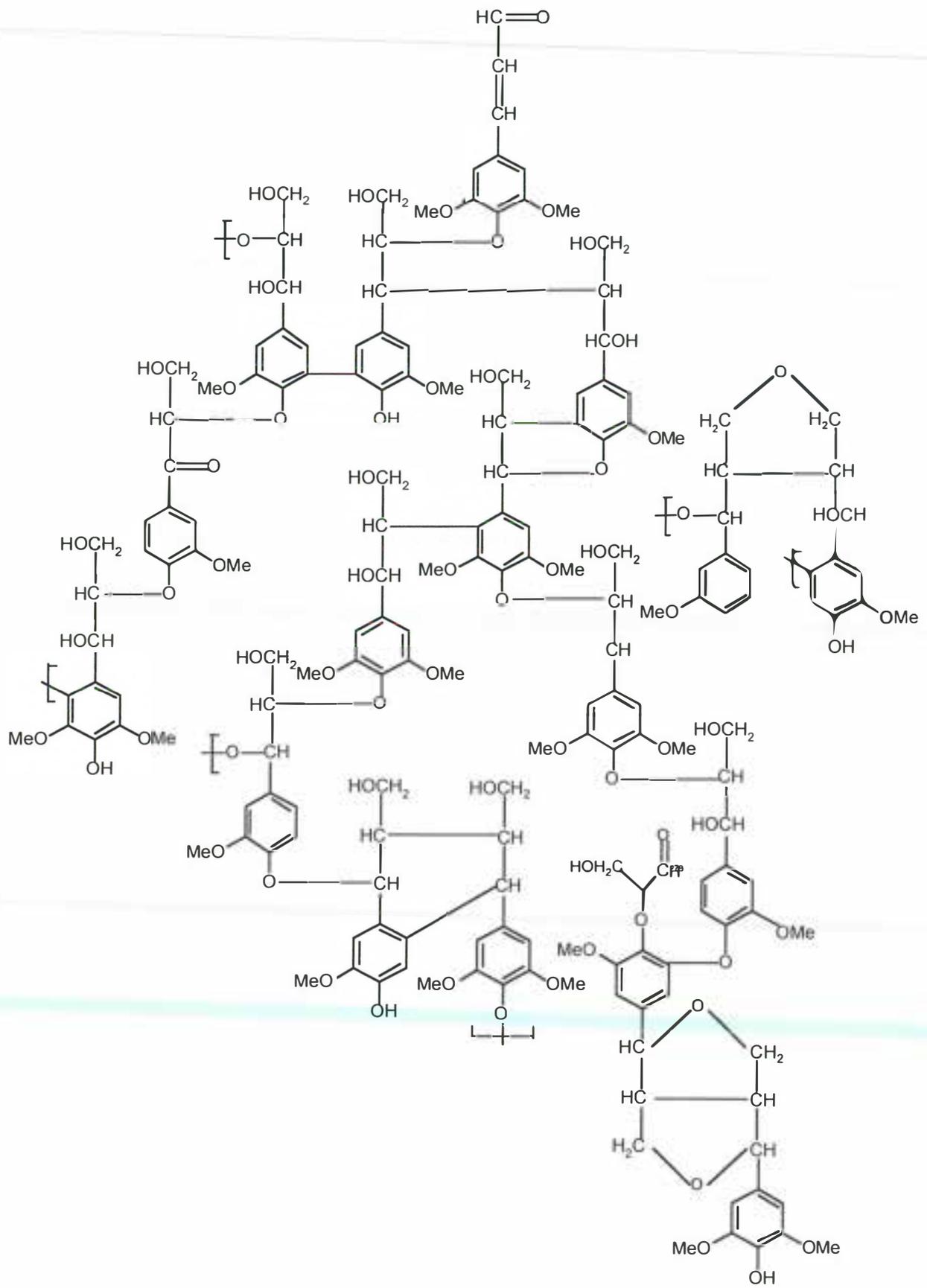


Figure 2 : Modèle de lignine de bois dur

Figure 3 : Mode opératoire Thioacidolyse

EMETTEUR : F. MERCIER

VALIDATION : F. PICHAVANT

DATE : 8 Juin 1999

DESTINATAIRE : IP : Classeur Procédures Laboratoire 1999

<p style="text-align: center;">DOSAGE DES MONOMERES DE LA</p> <p style="text-align: center;">LIGNINE DU BOIS : THIOACIDOLYSE</p>
--

DEFINITION.

La thioacidolyse est une méthode de caractérisation des unités non condensées des lignines (unités p-hydroxyphénylpropane plus ou moins substituées).

PRINCIPE.

La thioacidolyse consiste en une dépolymérisation de la lignine par coupure sélective des liaisons ether-alkyl-aryl, grâce à une acidolyse douce (par le trifluoroéthérate de bore) du matériau étudié, en présence d'un nucléophile, l'éthanethiol).

Cette méthode est appliquée aux échantillons de bois, réduits en sciure sous 40 mesh et débarrassés de leurs extractibles par extraction au soxhlet (4h acétone-éthanol, 4h éthanol, 4h eau).

REACTIFS.

- Dioxanne 1-4 pour analyse anhydre (Prolabo)
- Ethanethiol (Aldrich). Conserver au frais
- Trifluoroéthérate de bore (BF₃, Et₂O) (Aldrich). Conserver au frais
- Tube d'azote
- Chlorure de méthylène RP
- Sulfate de sodium anhydre
- Bicarbonate de sodium, NaHCO₃
- Docosane (C₂₂H₄₆)
- Javel
- Papier pH

MATERIEL.

- Bain d'huile avec régulation de température et agitation
- Noix, pinces...
- Gants
- Seringues (5 ml, 10 ml) + aiguilles
- Verrerie courante de laboratoire
- Flacons pyrex 50 ml et 250 ml + bouchon à vis + capsule téflon
- Barreaux aimantés
- Pipette 5 ml graduée au ml
- Propipette
- Pipettes Pasteur
- Parafilm
- Evaporateur rotatif avec système de refroidissement de la réfrigération (pompe à palette ou glace + eau...)
- Flacons réacti-vial 3 ml, col à vis.

SECURITE.

Il est impératif de travailler sous une hotte aspirante efficace et de porter des gants et des lunettes.

Pour la destruction des thiols il faut tout passer dans des bains de javel, bien rincer à l'eau chaude, puis laver normalement.

PREPARATION DES SOLUTIONS.

- **Solution de thioacidolyse** : dioxanne, éthanethiol v/v, 9/1, BF₃ étherate
0,2 M

(C₂H₅)₂ O BF₃ : 1 mole = 141,8 g

0,2 M = 28,36 g

soit solution 0,2 M = 28,36 g/l BF₃ étherate

or (C₂H₅)₂ O BF₃ → d = 1,154

1000 cm³ → 1154 g

X cm³ → 2,83 g donc X = 2,45 cm³

Mélanger dans un flacon pyrex 250 ml, fermé hermétiquement par un bouchon à vis, 90 ml dioxanne (à l'éprouvette), 10 ml (à la seringue) éthanethiol, 2,45 ml (à la seringue) BF₃ étherate. Mettre la solution sous azote, fermer hermétiquement le flacon, en utilisant du parafilm. Conserver sous la hotte.

- **Solution docosane** : (étalon pour chromatographie)

Préparer une solution de docosane (C₂₂ H₄₆) à ~ 5,5 x 10⁻⁴ M dans le chlorure de méthylène.

C₂₂ H₄₆ : 1 M = 310 g

⇒ 5,5 x 10⁻⁴ M : 0,1705 g

Donc pour 100 ml de solution dissoudre 17,05 mg de docosane dans du chlorure de méthylène. ramener à volume dans une fiole jaugée de 100 ml. Conserver la solution au frais.

- Solution de bicarbonate de sodium (0,4 M)

NaHCO_3 1 M = 84 g \Rightarrow 0,4 M = 33,6 g

Dissoudre 33,6 g de NaHCO_3 dans de l'eau distillée et ramener à 1 litre dans une fiole jaugée.

MODE OPERATOIRE.

Dans un flacon en Pyrex de 50 ml muni d'un barreau aimanté peser exactement environ 100 mg de sciure sèche. Ajouter 40 ml de solution thio*. Mettre sous azote, fermer le flacon. Laisser 4 heures à 100°C (bain d'huile) sous faible agitation.

* Il est important pour avoir un rendement maximum de respecter le rapport 2 à 3 mg sciure par ml solution de thioacidolyse.

Sortir les échantillons du bain d'huile, les laisser refroidir.

Transvaser soigneusement le contenu du flacon dans une ampoule à décanter de 250 ml par l'intermédiaire d'un entonnoir. Rincer le flacon avec 10 ml d'eau distillée et 10 ml de chlorure de méthylène. Ajouter, à l'aide d'une pipette pasteur, du bicarbonate de sodium en solution (0,4 M) jusqu'à obtention d'un pH = 3-4*. Il est bien évident que l'on agite l'ampoule pour bien homogénéiser la solution et que l'on dégaze fréquemment.

* Pour vérifier le pH, on plonge une baguette de verre dans la solution et on dépose une goutte sur du papier pH.

Après ajustage du pH on ajoute, dans l'ampoule à décanter, 3 ml (à la pipette) de solution de docosane ($5,5 \text{ M} \times 10^{-4}$) soit environ exactement 0,5 mg de $\text{C}_{22}\text{H}_{46}$.

Agiter l'ampoule, dégazer, laisser décanter.

Recueillir la phase organique (CH_2Cl_2) dans un erlen (250 ml).

Extraire à nouveau par 2 fois 15 ml CH_2Cl_2 .

Réunir toutes les phases organiques dans l'erien.

Ajouter du sulfate de sodium anhydre à la phase organique pour la sécher. Laisser en contact une heure. Filtrer sur entonnoir + filtre plissé.

La phase organique sèche est concentrée presque à sec au Rotavapor à 40°C (réfrigération à 5°C), puis est ramenée à volume (2 ml) avec CH_2Cl_2 dans un flacon réacti-vial de 3 ml.

Mettre l'échantillon sous azote, fermer soigneusement le flacon, le conserver au réfrigérateur (~ 4°C).

L'échantillon sera ensuite analysé en chromatographie phase gazeuse selon la procédure du laboratoire d'analyse.

Pour analyser les échantillons en chromatographie phase gazeuse, il est nécessaire d'établir les coefficients de réponse des différents monomères de la lignine.

Il faut faire la thioacidolyse des modèles (parahydroxyphényl propane-Guaiacyle-Syringyle) synthétisés au laboratoire de Monsieur CASTELLAN (LSCV).

Les conditions de thioacidolyse sont les mêmes que précédemment sauf que l'on travaille sur 6 à 7 mg de modèle en présence de 15 ml de solution de thioacidolyse.

Les résultats trouvés en chromatographie sont ensuite exprimés par rapport au taux de lignine trouvé en faisant la lignine de "Klason" selon la norme Tappi T 222 om-83.

AR3 : Propriétés papetières (P1)

SAR3.1 : propriétés papetières chez le pin (200 analyses) (P1)

Les 200 échantillons correspondant à la famille de plein-frères ont fait l'objet de deux séries de cuisson en mini-lessiveurs de 150 ml : la première à alcali actif de 22% et une sulfidité de 30% pour un objectif de Kappa 30 en moyenne, et la seconde à un alcali actif de 24% pour une sulfidité de 30% pour un objectif de Kappa moyen 40.

L'absence de corrélation entre les rendements obtenus à Kappa 30 et 40 indique en effet une probable dégradation des polysaccharides à Kappa 30. Un réajustement linéaire du rendement est possible au delà de kappa 35 pour exprimer le rendement à Kappa 80 (référence de Smurfit), et permet donc un classement des échantillons pour des tests semi-industriels chez SWRE.

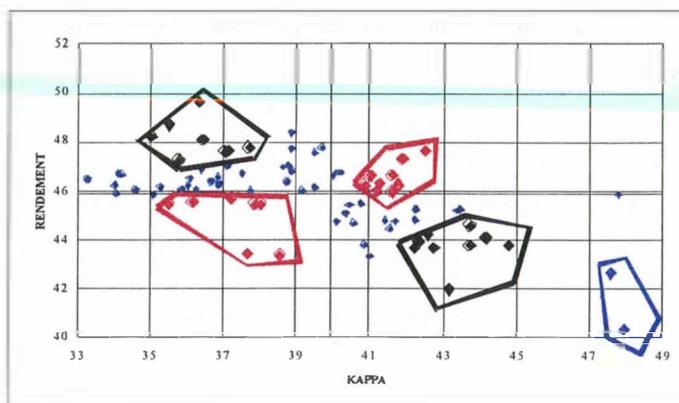
L'analyse des corrélations souligne par ailleurs la part prédominante de la teneur en extraits dans la variabilité du rendement à Kappa 40.

Le coefficient de variation du rendement en pâte est similaire à celui du taux de lignine (4,3%). Cette variation quantitative d'une ampleur modeste est néanmoins considérable en terme d'impact industriel puisqu'une variation de 0,3 points de rendement se traduit par des gains financiers significatifs selon Janin (1983).

L'ensemble des résultats acquis sur les 200 plein-frères a été consigné dans une base données transmise à l'INRA Pierroton pour la recherche de QTL.

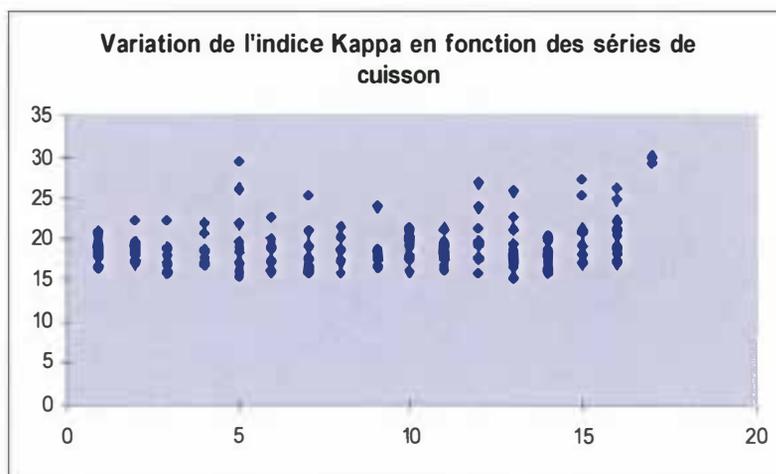
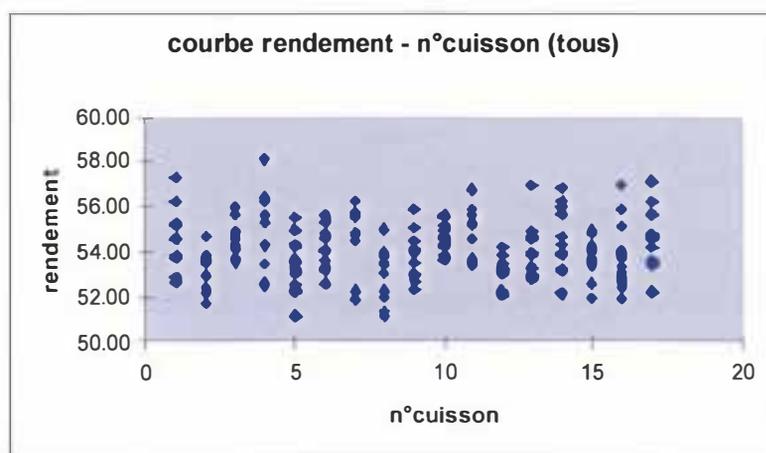
Ce travail a également permis de constituer des lots de bois de pin maritime de rendement et de longueur de fibres contrastés, afin de réaliser une analyse industrielle plus complète par SWRE.

La figure suivante illustre la constitution de 5 lots de rendement et d'aptitude à la cuisson (Kappa) variés. Les résultats moyens obtenus ont été confirmés à plus grande échelle de cuisson.

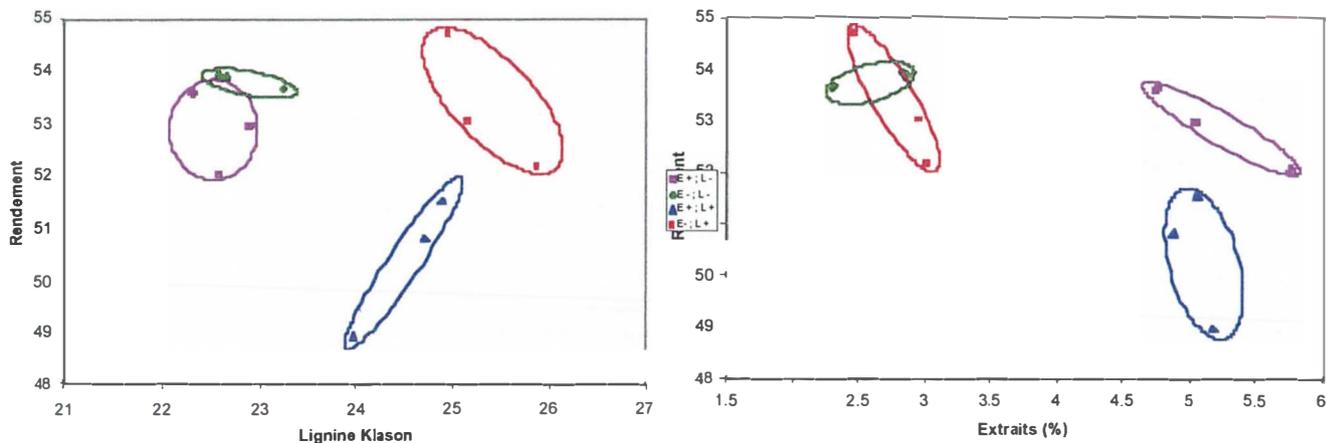


SAR3.2 : propriétés papetières chez l'eucalyptus (200 analyses sur le billon prélevé à mi-hauteur)

Les cuissons ont été réalisées avec un alcali de 17,5% (g NaOH) et une sulfidité de 32%, pour un objectif d'indice Kappa de 18. Une certaine variabilité de l'indice Kappa est observée entre cuissons (fig). Le rendement varie dans d'importantes proportions entre plein-frères. Toutefois un effet cuisson se fait jour sur l'ensemble des données, ce qui laisse suspecter une certaine incertitude sur le degré de précision des résultats obtenus (fig), sans pour autant pouvoir affirmer que les résultats sont inexploitable.

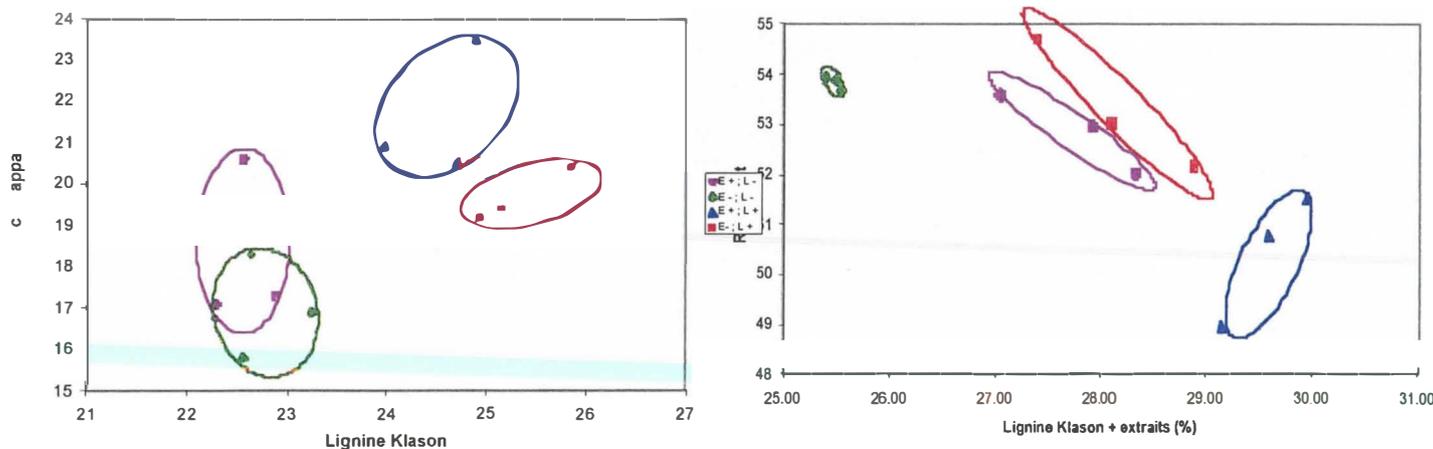


Des cuissons complémentaires ont été réalisées sur un sous échantillon d'individus contrastés en lignine et/ou en taux d'extraits total. Il se confirme qu'il n'existe pas de corrélation significative entre le rendement en pâte et le taux de lignine chez cette famille d'Eucalyptus urophylla x grandis, mais une corrélation significative entre le rendement et le taux d'extraits d'une part, le rendement et le cumul (lignine + extraits) d'autre part. Cela souligne la part prédominante exercée par la variabilité considérable du taux d'extraits sur le rendement en pâte chez cet hybride. La composante génétique de ce critère mérite donc d'être considérée au même titre que le celle du taux de lignine.

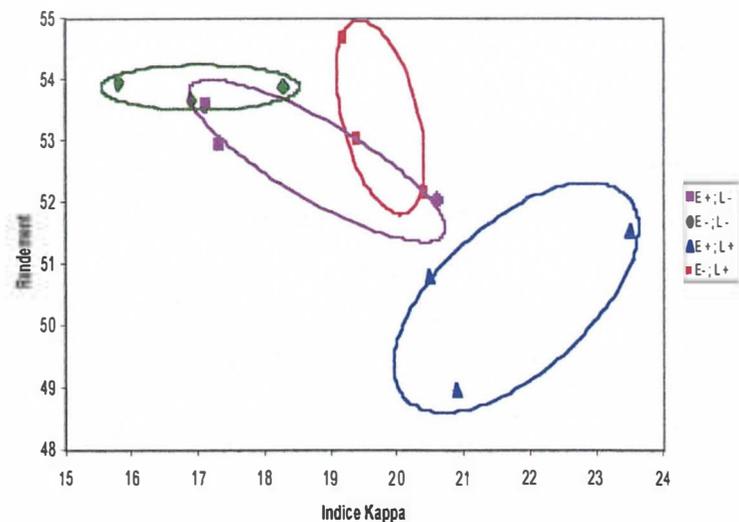


Le groupe de losanges verts correspond à des Eucalyptus à faible taux d'extraits et faible taux de lignine, le groupe de triangles bleus = fort taux de lignine et fort taux d'extraits, le groupe de ronds violets = fort taux d'extraits et faible taux de lignine, le groupe de carrés rouges = faible taux d'extraits et fort taux de lignine

Le taux de lignine est le facteur essentiel de variation de l'indice Kappa, et donc la facilité de délignification. L'indice Kappa étant en rapport avec la consommation d'agent de blanchiment pour une pâte d'Eucalyptus destinée à l'impression-écriture, il est important d'être en mesure de fournir un bois avec un taux de lignine amoindri.



Une augmentation du rendement va dans le sens d'une diminution de l'indice Kappa, puisqu'elle sous tend une plus grande facilité de cuisson (moins de lignine et moins d'extraits laissant plus de soude résiduelle au palier de cuisson). L'objectif d'une diminution simultanée du taux d'extraits et du taux de lignine est donc tout à fait justifié au regard des attentes papetières sur cette espèce.



Enfin, la mesure de la morphologie des fibres a été réalisée en double avec l'appareil PQM 1000 sur les pâtes Kraft écruées à Kappa 18, et met à jour également des variations significatives de longueur, largeur, masse linéique et souplesse, mais beaucoup plus modestes que pour le pin maritime :

CV (longueur) = 4%, CV (largeur) = 3%,
 CV (masse linéique) = 2,6%, CV (souplesse) = 6,7%.

L'ensemble des résultats acquis sur cette famille de plein-frères d'Eucalyptus a été consigné dans une base de données transmise au CIRAD pour détecter des QTL.

AR4 : propriétés technologiques

SAR4.1 : microdensitométrie chez le pin (200 analyses) (P4)

SAR4.2 : microdensitométrie chez l'eucalyptus (200 analyses) (P4)

L'INRA (P4) Orléans était chargé de réaliser les profils microdensitométriques (mdm) des 2 espèces du projet (pin maritime et eucalyptus), de les mettre à la disposition des autres partenaires (P2, P4 Bordeaux) et de les exploiter de façon à fournir des informations sur la variabilité des caractères liés à la « densité du bois » à l'intérieur des 2 populations d'arbres forestiers étudiées.

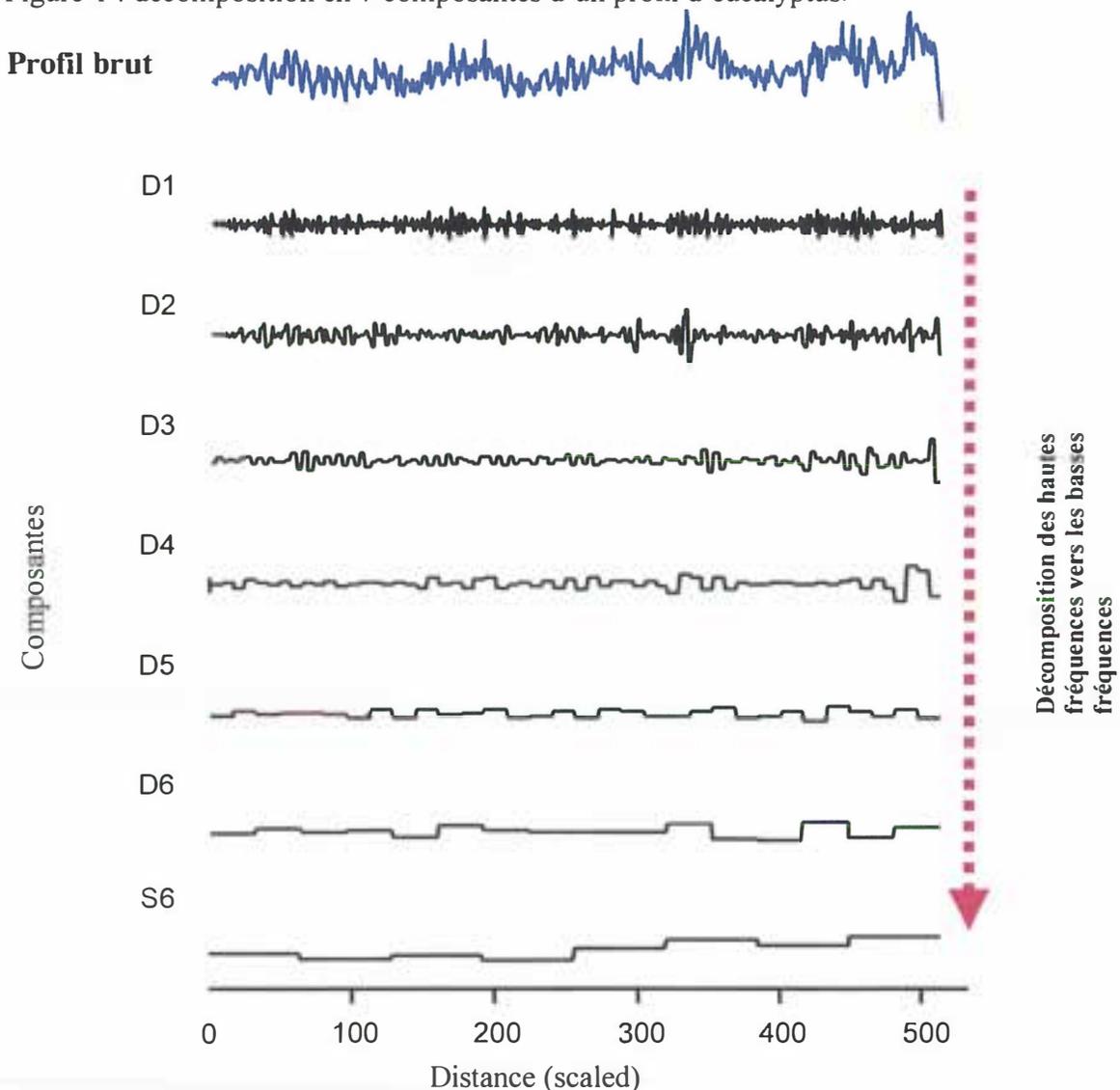
Les profils mdm ont été réalisés. Différentes variables ont été calculées à partir des profils, et mises à la disposition des partenaires du projet (P2 et P4 Bordeaux en particulier).

Les analyses réalisées par P4 à Orléans dans le cadre du projet avaient pour objectifs de :

1. rechercher chez les 2 espèces pin maritime et eucalyptus des variables de la densité du bois plus « variables » que les variables habituelles, basées sur le modèle bois initial – bois final ;
2. rechercher l'existence de liens éventuels entre caractéristiques climatiques de la saison de végétation (mises à disposition par P4 Bordeaux) et variables de densité chez le pin maritime ;
3. rechercher l'existence de liens éventuels entre propriétés mécaniques du bois (mesurées par P2) et variables de densité chez l'eucalyptus ;

I. Méthodes

Figure 1 : décomposition en 7 composantes d'un profil d'eucalyptus.



Les variables mdm dites « classiques » sont calculées à partir du modèle « bois initial – bois final ». Ce modèle consiste à placer sur le profil mdm des limites de cernes, puis à l'intérieur des cernes, des limites bois initial - bois final. On résume ensuite chaque segment de cerne à l'aide de sa longueur, moyenne, écart-type... Ce modèle n'est applicable qu'aux profils mdm enregistrés sur des échantillons de bois prélevés sur des arbres poussant en climat tempéré, avec un arrêt de végétation bien marqué. Dans le cas des arbres poussant en climat sans arrêt de végétation clair (climats inter-tropicaux par exemple), il n'est généralement pas possible de définir des limites de cernes, et donc de calculer des variables intra-cernes. C'est le cas des eucalyptus de ce projet, qui proviennent du Congo. Il est donc nécessaire de trouver une autre façon de résumer l'information contenue dans le profil mdm.

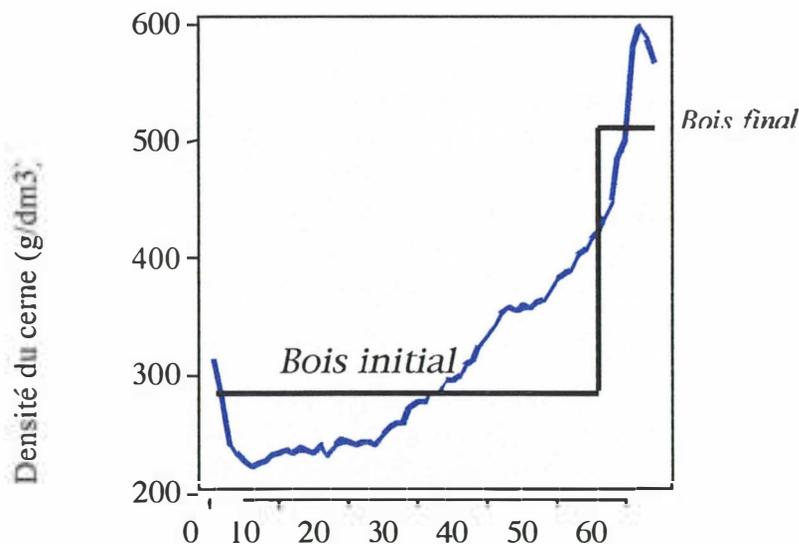
La méthode proposée et testée ici consiste à décomposer le profil mdm en n (ici 7) composantes de densité, sur la base de l'« échelle d'observation du profil » : par exemple, la composante D1 correspond aux variations dans l'espace à plus petite échelle, alors que la

composante S6 correspond aux variations à « grande » échelle (voir figure 1). La notion d'échelle n'est pas fixe d'un échantillon à l'autre, puisqu'elle dépend de la longueur du profil. Chaque composante peut-être considérée comme « plus homogène » du point de vue de l'échelle du variation, et donc peut-être du point de vue du phénomène biologique contrôlant cet aspect de la formation du bois, que le signal de départ. Chaque composante reste un signal encombrant, pas très facile à manipuler, qu'il est nécessaire de résumer. On a choisi de le résumer à l'aide des statistiques proposées par défaut par la méthode de décomposition en ondelettes du logiciel d'analyse de données Splus (Bruce and Gao 1994). En détail :
 Pour chaque composantes de D1 à D6 et S6, on calcule :

- Min et Max : minimum et maximum ;
- 1Q, 3Q : quartiles inférieurs et supérieurs ;
- Median : médiane ;
- Mean : moyenne ;
- SD : écart-type ;
- MAD : une estimation robuste de l'échelle statistique des données, qui est 1,48 fois l'écart absolu médian à la médiane ;
- Energy% : la proportion de l'énergie du signal brut contenue dans cette composante.

Par ailleurs, dans le cas des profils mdm de pin maritime, on a bien sûr pu calculer également les variables intra-cernes basées sur le modèle bois initial – bois final.

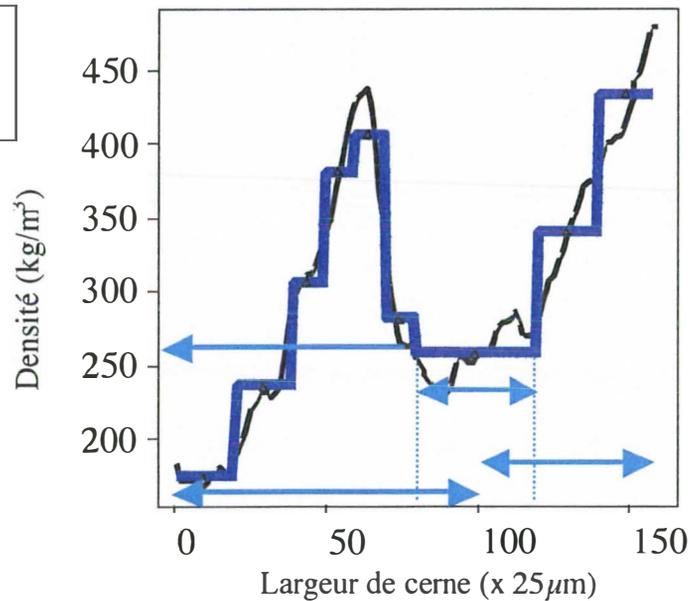
Figure 2 :
 Profil mdm de cerne et modèle bib-bf



On a également calculé des variables de densité basées sur une décomposition en ondelettes intra-cerne. La méthode est présentée plus en détail dans Rozenberg et al. (2001)

Largeur de cerne (X 24 μm)

Figure 3 : profil
mdm et modèle à
« pas adaptatif »



La comparaison de la variabilité individuelle s'est faite sur la base des coefficients de variations individuels, calculés pour tous les caractères de densité, pour les 2 espèces.

L'étude des liens avec des caractéristiques climatiques a utilisé les variables bois initial / bois final et les variables dérivées du modèle « à pas adaptatif », calculées chez le pin maritime. Les liens climat densité ont été étudiés à l'aide d'analyses de corrélation dans le cas des variables bi – bf et à l'aide d'analyses de variances dans le cas des variables dérivées du modèle à pas adaptatif.

L'étude des liens avec une propriété mécanique du bois s'est faite à l'aide d'une analyse de corrélation (coefficient de corrélation linéaire) au niveau arbre chez l'eucalyptus. La propriété mécanique du bois étudiée est le module d'élasticité (MOE), mesurée à l'aide d'une méthode acoustique par P2 sur des éprouvettes découpées dans les mêmes arbres. Pour cette analyse, on a calculé un MOE moyen par arbre à partir des valeurs mesurées sur les différentes éprouvettes de chaque arbre (le nombre d'éprouvette par arbre variant de une à cinq). Selon la méthode d'analyse du signal acoustique, on obtient 2 modules, soit celui dit de « Bernoulli », soit celui dit de « Timoschenko » (voir par exemple Baillière 1994).

Pour cette étude exclusivement, un autre groupe de variables de densité a été calculé, basé sur la définition d'un seuil de densité à l'intérieur du profil mdm. La méthode a déjà été testée sur douglas et pin maritime, et a permis de mettre en évidence des liens densité-MOE bien plus élevés que ceux mis en évidence à partir de variables mdm « classiques » basées sur le modèle bois initial – bois final (Rozenberg et al 1999, Rozenberg et al 2001). Elle est testée ici pour la première fois sur une espèce sans arrêt de croissance bien marqué entre saisons de végétation.

II. Résultats

II.A. Recherche de variabilité pour des caractères mdm chez le pin maritime et l'eucalyptus

Les tableaux 1, 2 et 3 ci-dessous présentent les principaux résultats de cette analyse.

Tableau 1 : coefficients de variation individuels pour les variables mdm « classiques » (L : longueur du profil mdm, D, densité moyenne du profil mdm) chez le pin maritime et l'eucalyptus.

Coefficient de variation	de L	D
Pin maritime	0.37	0.08
Eucalyptus	0.20	0.08

Tableau 2 : coefficients de variation individuels pour les variables mdm de la décomposition d'ondelettes des profils d'eucalyptus.

Coefficient de variation	de D1	D2	D3	D4	D5	D6	S6
Minimum	0.25	0.24	0.27	0.37	0.36	0.38	0.09
1 ^{er} Quartile	0.23	0.22	0.22	0.25	0.33	0.37	0.08
Médiane	-	-	-	-	-	-	0.09
3 ^{ème} Quartile	0.23	0.22	0.22	0.25	0.33	0.37	0.09
Maximum	0.25	0.24	0.27	0.37	0.36	0.38	0.09
Moyenne	-	-	-	-	-	-	0.08
Ecart-type	0.20	0.18	0.18	0.22	0.26	0.31	0.33
MAD	0.23	0.22	0.22	0.25	0.33	0.36	0.45
% Energie	0.37	0.35	0.36	0.46	0.65	0.71	0.00

Tableau 3 : coefficients de variation individuels pour les variables mdm de la décomposition d'ondelettes des profils de pin maritime.

Coefficient de variation	de D1	D2	D3	D4	D5	D6	S6
Minimum	0.30	0.24	0.21	0.20	0.22	0.30	0.11
1 ^{er} Quartile	0.17	0.17	0.20	0.28	0.30	0.39	0.09
Médiane	-	-	-	-	-	-	0.09
3 ^{ème} Quartile	0.17	0.17	0.20	0.28	0.30	0.39	0.09
Maximum	0.30	0.24	0.21	0.20	0.22	0.30	0.10
Moyenne	-	-	-	-	-	-	0.08
Ecart-type	0.19	0.16	0.17	0.18	0.19	0.26	0.25
MAD	0.17	0.17	0.20	0.28	0.30	0.37	0.37
% Energie	0.40	0.35	0.36	0.36	0.38	0.51	0.02

La décomposition d'ondelettes permet donc de mettre en évidence une variabilité de caractères du bois liés à la microdensité beaucoup plus importante que celle observée pour la densité du bois, et même dans certains cas plus importante que celle observée pour les caractères habituellement les plus variables, c'est à dire les caractères de croissance.

II.B. Liens variations climatiques – densité chez le pin maritime

Les données climatiques sont disponibles à l'échelle de la journée. Les données mdm sont ici calculées à l'échelle du bois initial et du bois final (modèle bi – bf) et à l'échelle « du groupe de cellules semblables » (modèle « à pas adaptatif »).

II.B.1. Liens climat variables mdm du modèle bi – bf

Un des problèmes consiste à définir, pour chaque variable climatique, la période (partie de la saison de végétation) pendant laquelle les variations inter - annuelles de la variable climatique affecte significativement les variations de la variable de densité. On a fait varier systématiquement les bornes de définition de la saison de végétation, et calculé pour chaque définition le coefficient de corrélation linéaire avec toutes les variables mdm basée sur le modèle bi – bf. On obtient une « cartographie » de l'intensité des relations climat – densité en fonction des bornes de définition de la saison de végétation (figure 4). Ces tableaux permettent de repérer les variables mdm dont la variation est influencée par le climat, et les variables climatiques qui affectent la densité du bois.

Les liens les plus forts et les plus généraux entre variables mdm et climat ont été mis en évidence pour la largeur du bois final et l'humidité relative maximale de la 2^{ème} partie de la saison de végétation (figure5) . Le même type de relation a été mis en évidence sur 4 lots différents de pin maritime, correspondant à des arbres d'âges différents, et donc, à des cernes d'âges cambiaux différents : quels que soit les âges cambiaux considérés, et quelle que soit l'origine génétique de la population de pin maritime, on retrouve cette même tendance générale forte, puisqu'elle explique entre 50 et 80% de la variabilité observée pour la largeur du bois final.

Relations T^{re} cumulée, densité minimum

Figure 4 : « cartographie » des relations significatives densité minimum intra - cerne / température minimum cumulée. La densité minimum du cerne est négativement liée avec le cumul des température minimum sur la période commençant vers le 60^{ème} jour de l'année, et se terminant vers le 250^{ème} jour de l'année.

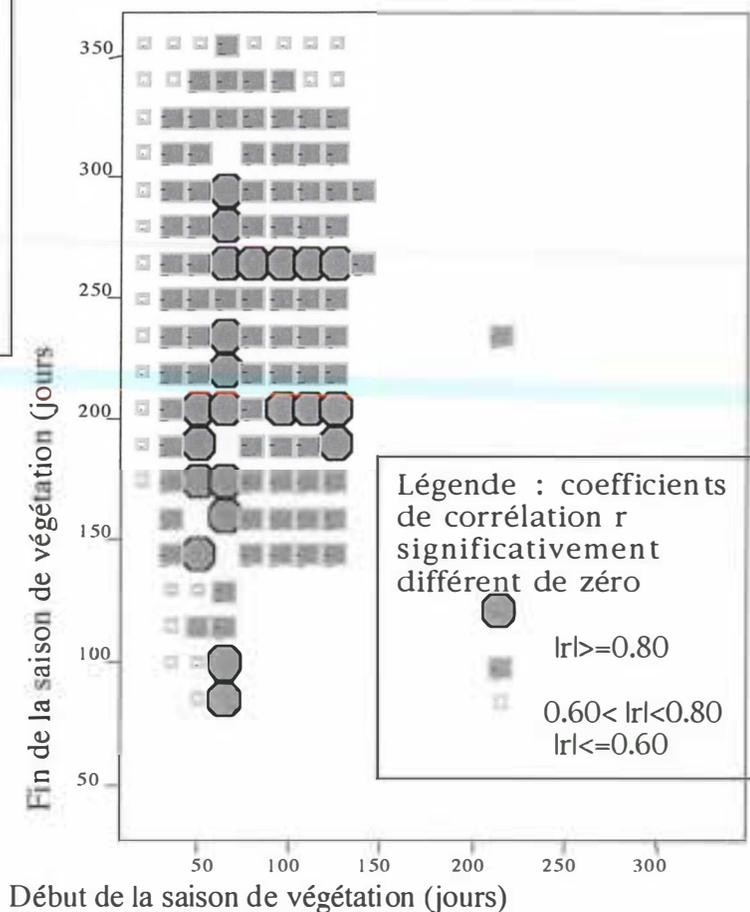
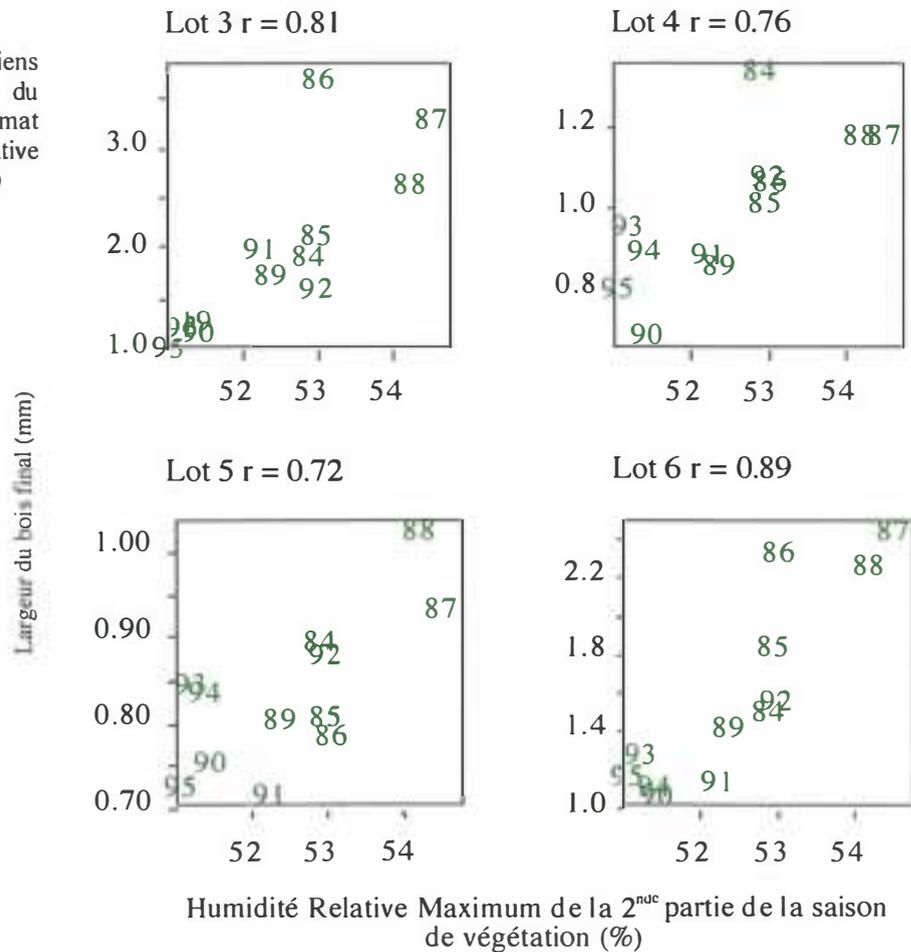


Figure 5 : liens densité (largeur du bois final) - climat (Humidité relative maximale cumulée)



II.B.2. Climat et modèle à pas adaptatif

L'introduction d'une des variables potentiellement explicatives dans un modèle d'analyse de variance permet de tester si chaque variable améliore significativement le modèle ou non. Cette méthode a été utilisée ici sur une population de pin maritime composée de clones. Chaque profil mdm a été découpé en cerne, et chaque cerne en segments horizontaux de longueur (voir figure 3, le modèle à pas adaptatif). Chaque segment est décrit à l'aide de sa densité, de sa longueur et de sa position dans le cerne exprimée de deux façons différentes : le numéro d'ordre du segment dans le cerne et sa position dans le cerne en proportion de la largeur du cerne. Les facteurs susceptibles d'expliquer les variations de densité dans les cerne, entre cerne et entre clones, et donc testés dans le modèle d'analyse de variance, sont l'âge cambial, le millésime du cerne, le clone et des variables climatiques de la saison de végétation : températures, précipitations, humidités relatives...

Dans l'analyse préliminaire qui est présentée ici, l'étude est limitée à 3 cerne pour lesquels on dispose à la fois du profil mdm et de données météorologiques détaillées. Les résultats montrent que six variables climatiques prises individuellement affectent significativement les variations de densité du bois : vitesse moyenne du vent, précipitations, températures minimum et maximum et humidités relatives minimum et maximum (tableau 4).

Tableau 4 : résultats des analyses de variance mono - facteur « densité expliquée par le climat », pour les variables climatiques ci-dessous.

Analyses de variance			Statistique F	Probabilité
vitesse moyenne du vent (vvvm)			94.68046	<10 ⁻¹⁶
Précipitations (pluie)			106.2803	<10 ⁻¹⁶
température minimum (Tmin)			61.32897	6.106227e-15
température maximum (Tmax)			69.09106	1.110223e-16
humidité relative minimum	(Hrmin)		113.6189	<10 ⁻¹⁶
humidité relative maximum	(Hrmax)		108.3536	<10 ⁻¹⁶

Une analyse de corrélation montre que ces variables climatiques sont assez fortement à fortement corrélées entre elles (tableau 5), ce qui explique qu'en incorporant ces variables successivement dans un modèle expliquant la densité, certaines n'améliorent pas significativement ce modèle.

Tableau 5 : résultats de l'analyse de variance densité expliquée par des variables climatiques (légende tableau 4)

Densité = HRmin+HRmax+pluie+vvvm+Tmax+Tmin						
	Df	Sum of Sq	Mean Sq	F Value	Pr(F)	
HRmin	1	2242241	2242241	113.9056	0.0000000	
HRmax	1	20681	20681	1.0506	0.3054277	
pluie	1	83149	83149	4.2240	0.0399227	
vvvm	1	75924	75924	3.8569	0.0496109	
Tmax	1	28031	28031	1.4240	0.2328235	
Tmin	1	87016	87016	4.4204	0.0355752	
Residuals	3948	77716662	19685			

Tableau 6 : corrélations linéaires entre variables climatiques (légende tableau xx)

	HRmin	HRmax	pluie	vvvm	Tmax	Tmin
HRmin	0.9999999	0.9460754	0.8809625	0.9015903	0.6737684	0.5973800
HRmax	0.9460754	1.0000001	0.8208578	0.9710165	0.8531888	0.7708832
pluie	0.8809625	0.8208578	1.0000000	0.8236718	0.5232123	0.4372862
vvvm	0.9015903	0.9710165	0.8236718	1.0000001	0.7934477	0.6853793
Tmax	0.6737684	0.8531888	0.5232123	0.7934477	1.0000000	0.9814693
Tmin	0.5973800	0.7708832	0.4372862	0.6853793	0.9814693	0.9999999

Un des modèles les plus complets testés lors de cette analyse est présenté dans le tableau 7.

Tableau 7 : Densité = Hrmin + pluie + Tmin + niveau + pos + ce + mil + clones + pos:ce + ce:mil + pos:vl + ce:vl + pos:clones + ce:clones + mil:clones + niveau:clones (où « densité » est la densité du segment dans le cerne, « niveau » est la hauteur dans l'arbre, « ce » l'âge cambial, « mil » le millésime, « pos » la position du segment dans le cerne (en % de la largeur de cerne), « clones » le clone, et « vl » la longueur du segment intra-cerne).

	Df	Sum of Sq	Mean Sq	F Value	Pr(F)
Hrmin	1	2242241	2242241	373.077	0.00000000
pluie	1	75933	75933	12.634	0.00038325
Tmin	1	115178	115178	19.164	0.00001231
niveau	2	121590	60795	10.115	0.00004152
pos	1	43319918	43319918	7207.817	0.00000000
ce	1	2228196	2228196	370.740	0.00000000
mil	2	1006629	503314	83.744	0.00000000
clones	7	1837695	262528	43.681	0.00000000
pos:ce	1	2286446	2286446	380.432	0.00000000
ce:mil	2	438945	219472	36.517	0.00000000
pos:vl	1	460512	460512	76.623	0.00000000
ce:vl	1	1279506	1279506	212.892	0.00000000
pos:clones	7	392896	56128	9.339	0.00000000
ce:clones	7	642088	91727	15.262	0.00000000
mil:clones	14	170827	12202	2.030	0.01272674
niveau:clones	10	225647	22565	3.754	0.00004819
Residuals	3895	23409457	6010		

Ce modèle explique plus de 70% de la variation de la densité observée. Sachant :

-que les variations de densité à expliquer correspondent à plus de 90% de la variabilité observée le long des profils mdm ;

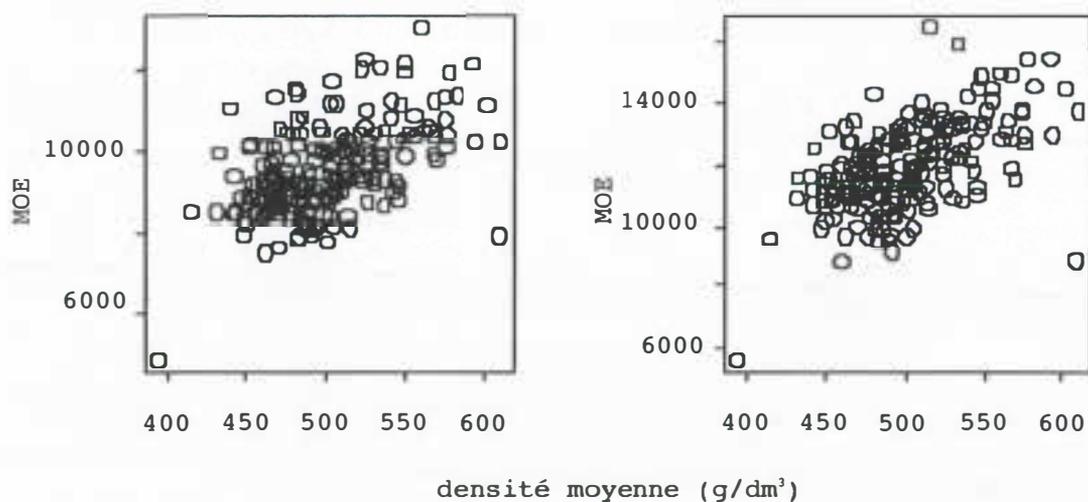
-que la méthode d'introduction des variables climatiques repose sur une hypothèse rudimentaire, puisque on a admis que la durée de la période climatique affectant la densité de chaque segment intra-cerne était directement proportionnelle à la longueur relative du segment dans le cerne ;

on peut considérer que ces premiers résultats sont très encourageants et méritent d'être affinés.

II.C. Relation MOE – densité chez l'eucalyptus

La relation générale densité moyenne – MOE existe chez l'eucalyptus, et son intensité est comparable, au niveau arbre, à ce qu'on peut observer chez d'autres espèces (figure 6, et voir par exemple Rozenberg et al 1999).

Figure 6 : relation MOE et densité moyenne du profil mdm observée au niveau arbre.
 Bernouilli $r = 0.51$ Timoschenko $r = 0.56$



D'autres techniques d'extraction de l'information pertinente du profil mdm peuvent permettre d'améliorer légèrement cette relation : la figure 7 montre l'évolution du coefficient de corrélation linéaire entre le MOE et une variable de densité (longueur du segment de profil de densité inférieure au seuil) en fonction de la valeur du seuil de densité. C'est pour cette variable que l'on a mis en évidence la relation la plus forte avec le MOE (figure 9, $r = 0,62$ pour un seuil à 580 g/dm^3), ce qui représente une certaine amélioration par rapport à la relation obtenue avec la densité moyenne du profil (figure 5).

Figure 7 : choix d'un seuil de densité pour la relation MOE – variable de densité « longueur du segment sous le seuil »

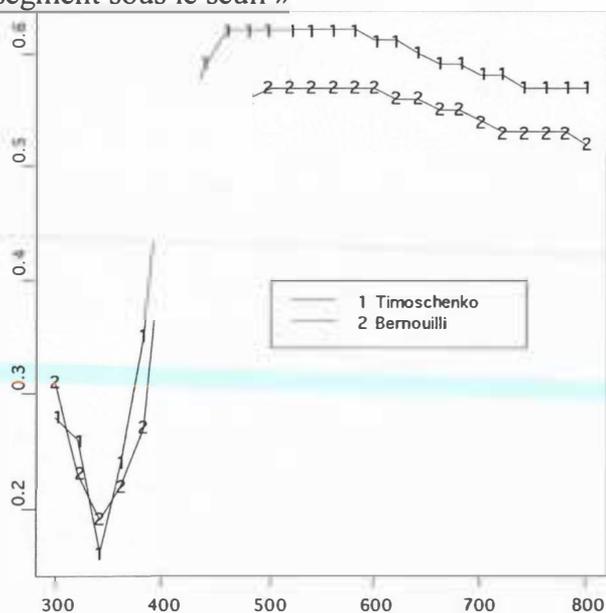


Figure 8 : choix d'un seuil de densité pour la relation MOE – variable de densité « nombre d'intersections avec le seuil »

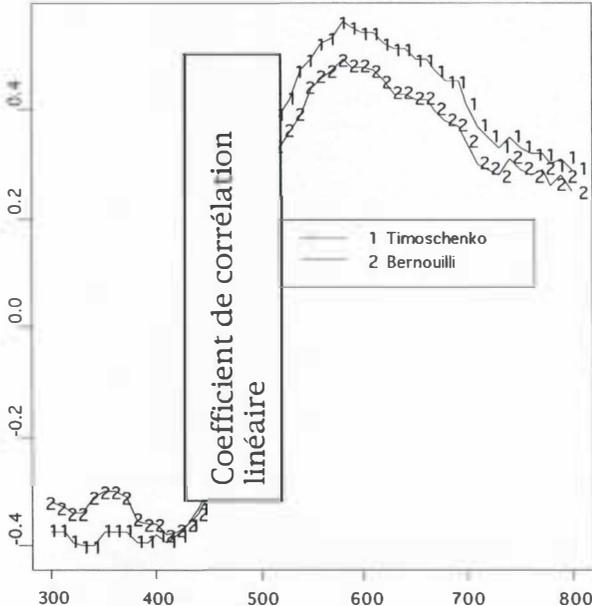
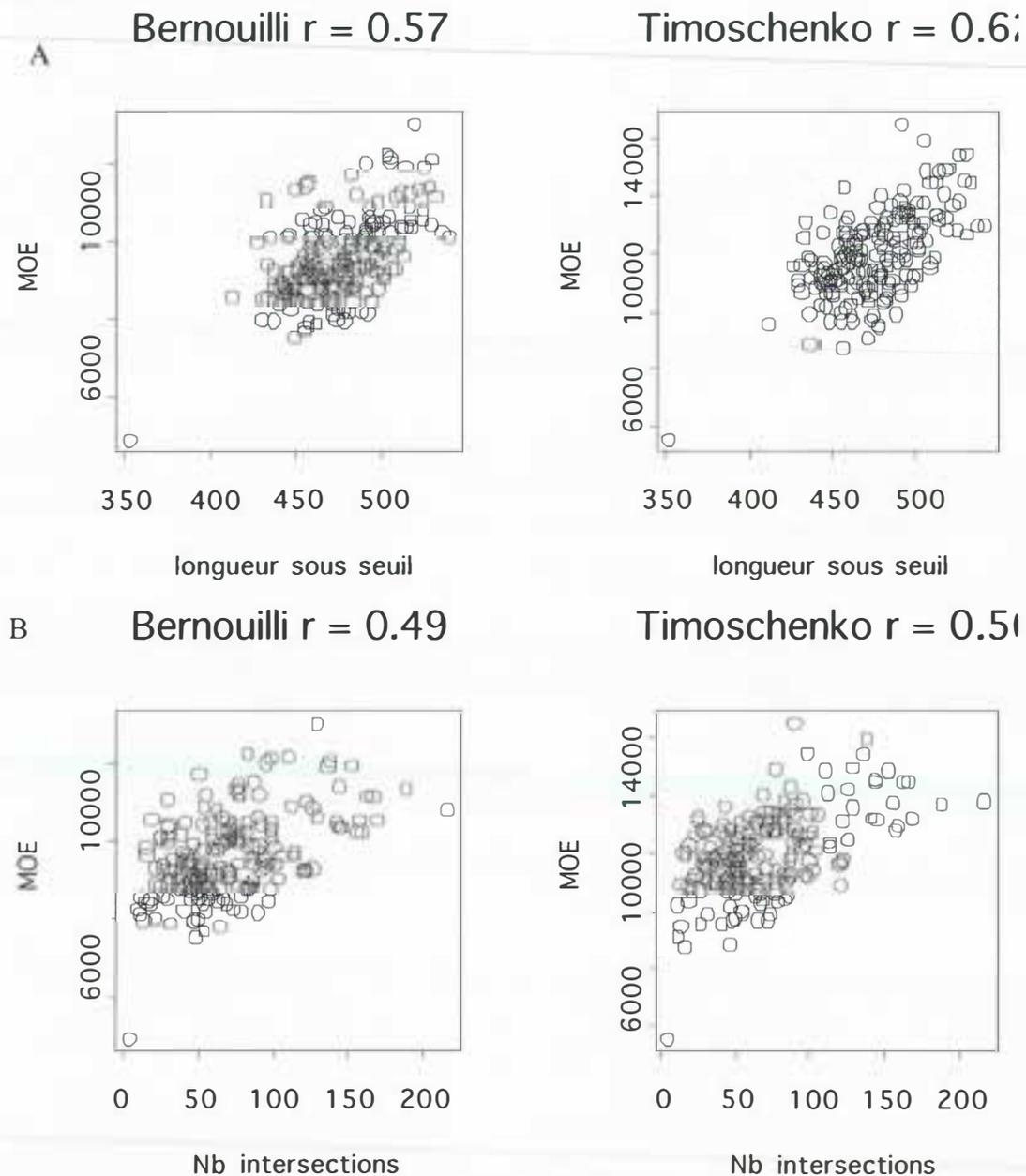


Figure 9 : relations MOE – variables de densité. A, longueur du segment sous le seuil, B, nombre d'intersections avec le seuil.



III. Discussion et conclusion

III.A. Variabilité

De façon générale, les caractères du bois des arbres forestiers sont plus héritables que par exemple les caractères de croissance (Cornelius 1994). Par contre, ces caractères du bois sont souvent beaucoup moins variables que les caractères de croissance. Ces tendances sont observées ici chez le pin maritime et chez l'eucalyptus pour les 2 caractères de référence du tableau xx, L et D : pour les 2 espèces, le coefficient de variation individuel du caractère « densité moyenne du profil mdm » est de 8%, alors que celui du caractère « longueur du profil mdm » (une mesure de la vitesse de croissance en diamètre de l'arbre) est respectivement de 37% et 20%. Ces valeurs sont proches de celles rapportées dans la littérature (Cornelius

1994). Les coefficients de variation individuels des caractères présentés dans les tableaux xx varient de 0 à 71% ; de nombreux caractères du bois sont aussi, voire plus, variables que le caractère de croissance de référence, ici L : on met ainsi en évidence l'existence de caractères du bois, qui ne sont pas a priori des caractères particulièrement liés à la croissance, et qui sont bien plus variables que la densité moyenne. L'interprétation biologique de ces caractères est plus ou moins évidente à ce stade : l'écart-type mesure « l'hétérogénéité de chaque composante du profil mdm ». Il est particulièrement variable pour les composantes D6 et S6 (de 36 à 45%), qui décrivent les variations de densité à plus grande échelle le long du profil. L'interprétation de ces résultats n'est pas définitive et nécessite une réflexion complémentaire.

III.B. Climat

Les variations du climat influencent les variations des caractéristiques du bois. Cette observation n'est pas nouvelle, et les variations inter- cerne de la densité du bois ont été utilisées depuis longtemps par les dendrochronologues pour reconstituer les climats passés. On a également mis en évidence depuis longtemps que certaines variations climatiques intra – saison de végétation affectaient les caractéristiques intra – cerne du bois. C'est par exemple l'influence des variations de la photopériode sur la transition du bois initial vers le bois final, ou la relation entre des déficits en eau ponctuels en saison de végétation et la formation de « faux - cerne ». Dans notre étude, on estime simultanément le poids respectif de différentes catégories de facteurs influençant les caractéristiques intra et inter – cerne de densité du bois. On observe que le modèle le plus complet explique plus de 70 % de la variation observée pour les variables de densité du bois (qui expliquent elle-même plus de 90% de la variation de la microdensité du bois). L'augmentation du coefficient de détermination liée directement aux variables climatiques est faible, puisqu'elle culmine actuellement à 4%. Le facteur qui explique le plus, de très loin, la variabilité observée de la densité du bois, est la position du segment dans le cerne : la structure du cerne en « bois initial – bois final » est de très loin le facteur de variation le plus important ; la densité du bois est toujours plus élevée vers le bois final que vers le bois initial. Dans le cadre de ce modèle, ça signifie que les facteurs environnementaux qui expliquent la transition du bois initial vers le bois final ne sont pas ou très peu inclus dans notre modèle. Or ils sont connus (photopériode, alimentation en eau), mesurables, et doivent pouvoir être pris en compte.

III.C. Module d'élasticité

Chez l'eucalyptus comme chez les autres arbres, forestiers, on retrouve une relation significative entre densité et module d'élasticité. La connaissance des variations de densité le long du profil microdensitométrique permet d'améliorer la relation classique module – densité moyenne. Toutefois, même en multi - variables, on plafonne assez rapidement aux environs de 50% de la variabilité observée. Deux remarques associées à cette réflexion :

- la relation densité – MOE est peut-être, comme par exemple chez le douglas (Rozenberg et al. 1999), génétiquement variable. Dans ce cas, une meilleure description de la relation nécessite la connaissance du degré d'appareillage entre les individus de la population.
- l'association d'une autre variable bois, plus étroitement contrôlée génétiquement, à la densité, peut-être une alternative à la connaissance du degré d'appareillage entre individus. Des variables qui paraissent prometteuses sont l'angle des microfibrilles et l'angle du fil du bois.

SAR4.3 : mesure de densité au pilodyn chez le pin (200 analyses) (P4)

Les mesures de densité du bois (2 répétitions perpendiculaires à l'axe des vents dominants) ont été réalisées à 1 m30, sous écorce et ce, juste avant abattage des arbres.

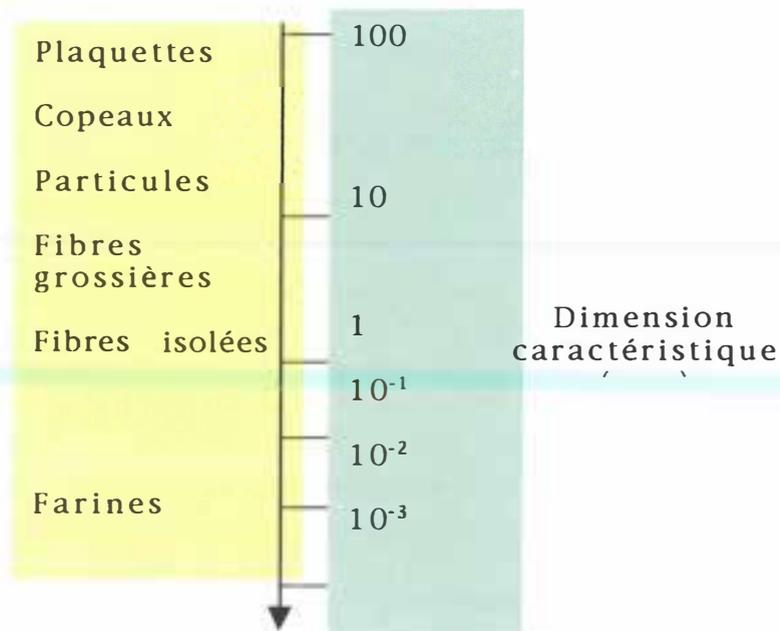
SAR4.4 : mesure de densité au pilodyn chez l'eucalyptus (200 analyses) (P2)

Les mesures de densité du bois avec le pilodyn ont été réalisées à 14, 26, 38 directement sur l'écorce. Pour les dernières mesures avant l'exploitation des arbres la mesure a été faite sur l'écorce et sous l'écorce à 50 et 62 mois.

SAR4.5 : caractérisation rhéologique de fibres de pin pour des applications en panneaux: mise au point des méthodes sur des échantillons de tailles différentes (P4)

Nous avons étudié dans ce projet deux types de panneaux différents, élaborés dans des conditions contrôlées grâce à un dispositif de laboratoire : le premier matériau est un OSB (oriented strand board) issu du déroulage, puis de l'encollage et du pressage, de plaquettes calibrées provenant de 20 rondelles prélevées parmi les 200 individus. Le second matériau est un panneau de fibres élaboré selon un process de type MDF (medium density fibreboard), fabriqué à partir de fibres industrielles préencollées. Même si la variabilité des caractéristiques mesurées reste liée à la structure des matériaux, on peut penser, notamment pour des produits techniques, qu'il est important de contrôler l'architecture.

Les deux matériaux testés sont représentatifs d'applications différentes pour le Pin maritime, et se distinguent notamment par la dimension des éléments constitutifs : plaquettes dans un cas, fibres dans le second (cf. schéma ci-dessous). Les dimensions caractéristiques vont du millimètre pour la fibre, à quelques centimètres pour les plaquettes les plus grandes.



En ce qui concerne l'OSB, l'objectif était de relier, sur une partie du matériel végétal dont nous disposons, les propriétés intrinsèques de plaquettes de bois aux propriétés des matériaux constitués selon un procédé proche du process industriel. Pour le MDF en revanche, nous nous sommes intéressés plus spécifiquement à l'architecture de ce matériau, en développant des

méthodes spécifiques d'analyse d'image et des outils de modélisation. La lourdeur du protocole expérimental ne nous a pas permis d'explorer la variabilité génétique (cf. SAR4.6).

I. L'OSB : matériel et méthodes

Nous avons étudié les propriétés mécaniques d'échantillons de bois initial (BI) et de bois final (BF) de faibles dimensions (0,3mm d'épaisseur) en traction à différentes températures. Les échantillons rectangulaires sont découpés à partir de placages issus du déroulage de 20 rondelles sélectionnées parmi les 200 Pins maritimes. Les échantillons ont été réalisés à partir d'un gabarit conçu pour cette étude, leur longueur varie de 20mm à 50mm, soit 10 à 50 fois la longueur moyenne d'une fibre, selon le type de bois (BI ou BF). La largeur varie de 10 à 30 mm, de manière à conserver un rapport de forme constant.

- *Choix des rondelles* : les échantillons de Pin ont été sélectionnés en fonction du diamètre de la rondelle, et du profil densitométrique réalisé par ailleurs dans ce projet. L'objectif était d'identifier 4 classes de 4 rondelles correspondant à des critères de croissance et de densité moyenne réparties autour d'une classe représentative des valeurs moyennes, soit 20 rondelles au total. Après déroulage, les placages ont été séchés et conditionnés à une température de 20°C et une humidité relative de 63%, dans une chambre climatique. Un échantillon statistique de placages de BI et de BF a été prélevé, depuis l'écorce jusqu'au noyau de déroulage.
- *Elaboration des panneaux* : 3 types d'échantillons de forme carrée et de 180mm de côté ont été fabriqués à partir des plaquettes, sur une presse à plateaux chauffants : un échantillon dans lequel toutes les plaquettes sont orientées selon un axe privilégié, un échantillon où les plaquettes sont disposées aléatoirement, et un échantillon stratifié constitué de deux faces orientées selon un axe, et une âme où les plaquettes sont disposées à 90° par rapport à cet axe. Pour chaque type d'échantillon, différents spécimens sont fabriqués, soit avec des plaquettes de BI, soit avec des plaquettes de BF. Le plan d'expérience prévoyait donc 6 configurations élémentaires, permettant d'étudier les effets propres au mode d'élaboration et aux propriétés intrinsèques des plaquettes, ainsi que leurs interactions éventuelles. *La séquence de fabrication a été randomisée, pour éviter tout biais expérimental.*

Technique de fabrication : elle est censée représenter le process de fabrication industrielle d'un panneau de particule ; les plaquettes ont été enduites d'une colle isocyanate à 10% en masse sèche environ, disposées en couches successives, puis pressées à une température de 160°C pour densifier le panneau et permettre la réticulation de la colle. Le pressage dure environ 10 minutes.

La figure 1 ci-dessous schématise le principe de l'étude. Les propriétés mécaniques individuelles de placages de bois initial et de bois final sont évaluées en traction, l'échantillonnage étant réalisé de manière à évaluer la variabilité inter et intra rondelle. Une partie des essais a été réalisée sur un analyseur thermomécanique (TMA) à différentes températures, et une autre sur une machine d'essais conventionnelle à température ambiante. Des échantillons de panneaux ont ensuite été élaborés et testés en traction, le but étant de relier les propriétés mécaniques individuelles au comportement macroscopique des panneaux.

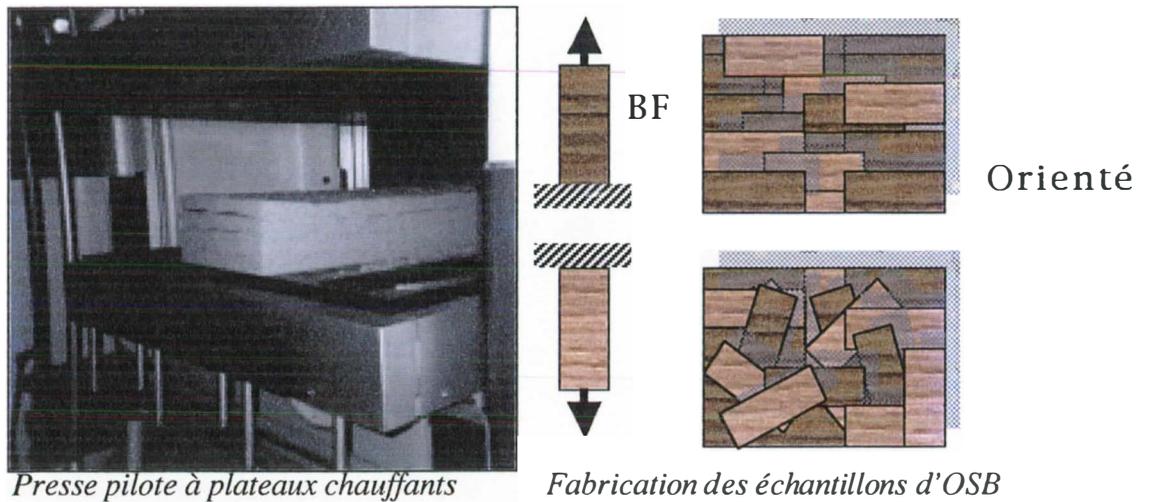


Figure 1 : schéma de principe de l'étude. Presse à plateaux chauffants (à gauche) – découpe d'échantillons de bois initial (BI) et de bois final (BF) destinés à la fabrication de différents types de panneaux (à droite)

- Essais de traction sur panneaux : des spécimens de traction de forme rectangulaire ont ensuite été découpés selon les deux axes principaux de chaque échantillon de panneau ; les spécimens ont été stabilisés en humidité et température, puis testés en traction jusqu'à rupture.

II. OSB : principaux résultats

II.A. Variabilité intra/inter arbres

Comme attendu, la variabilité intra arbre des propriétés mécaniques (module d'élasticité en traction et résistance mécanique) est plus importante que la variabilité inter arbres. C'est en particulier vrai lorsque l'on compare bois initial et bois final. Cette remarque est moins vraie dans le bois juvénile (premiers cernes d'accroissement) que pour les cernes proches de l'écorce. Les variations radiales du module d'élasticité sont plus importantes pour le bois final que pour le bois initial (en réalité, les premiers cernes contiennent peu de bois final).

On peut raisonnablement penser que le module d'élasticité longitudinal mesuré à cette échelle n'est pas très éloigné des propriétés intrinsèques des fibres, ou en tous cas que la variabilité observée est représentative de la variabilité des propriétés des fibres : porosité, angle des microfibrilles de la couche S. Cette dimension d'échantillon permet par ailleurs d'éviter un endommagement excessif des fibres.

La figure 2 illustre la variabilité de la masse volumique et des propriétés mécaniques observées sur l'ensemble de l'échantillonnage. Les valeurs obtenues sont caractéristiques du bois juvénile de Pin maritime, au moins pour la masse volumique et le module élastique.

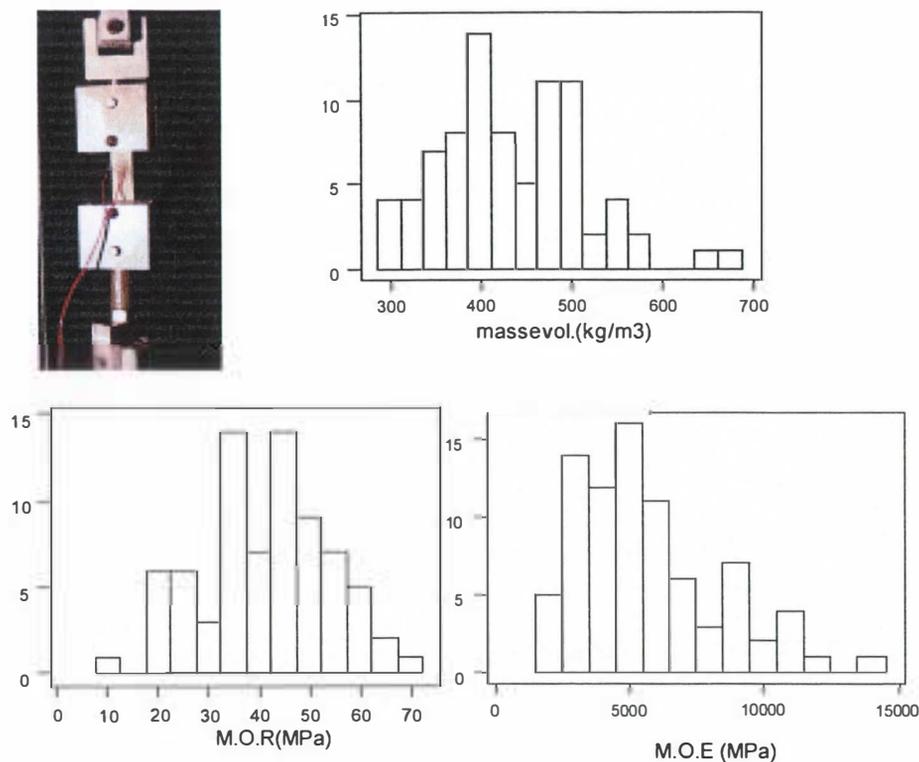


Figure 2: distributions statistiques de la masse volumique, de la résistance en traction (MOR) et du module d'élasticité des plaquettes de bois. La photo en haut à gauche présente un échantillon équipé de jauges.

II.B. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des panneaux de particules sont avant tout déterminées par l'agencement des éléments constitutifs (orientation des plaquettes), le taux de colle étant par ailleurs constant. Le module longitudinal varie en moyenne de 3 GPa pour les panneaux aléatoires, à 6 GPa pour les panneaux orientés. Ceci étant dit, pour une même configuration, les échantillons élaborés avec des plaquettes dont le module est faible (BI) ont statistiquement des modules d'élasticité inférieurs aux matériaux fabriqués avec des plaquettes à module élevé (BF). Ce résultat a pu être vérifié dans la direction principale des panneaux orientés. Les surfaces de réponse sont représentées figure 3. Ces résultats originaux montrent qu'il n'est pas inutile, au moins pour des panneaux de grandes particules, de prendre en considération les caractéristiques intrinsèques du matériau constitutif dans une démarche d'amélioration de la qualité.

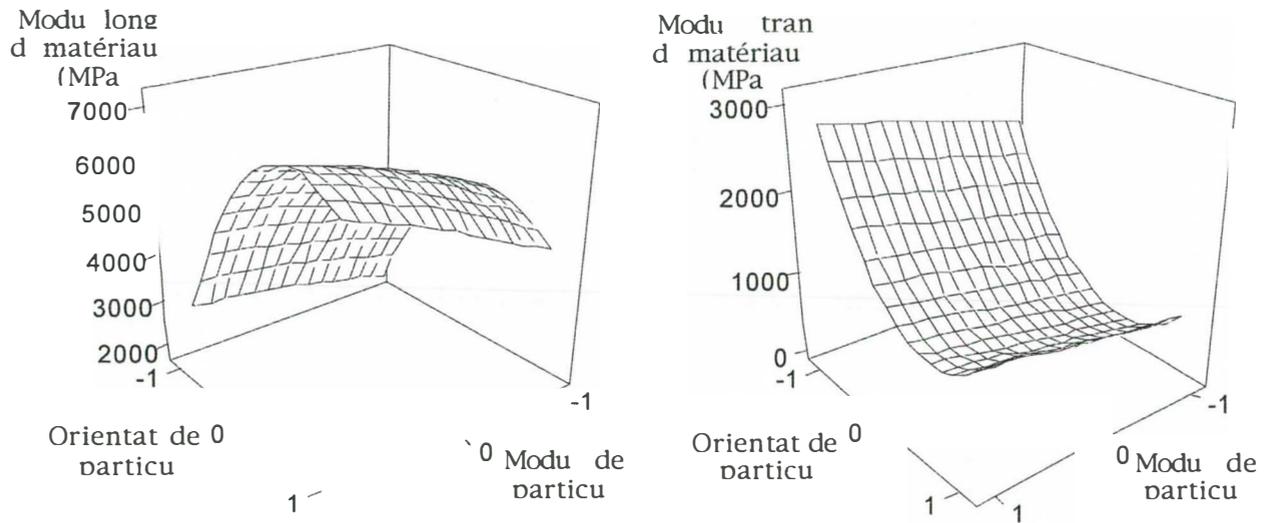


Figure 3 : variation du module d'élasticité longitudinal (à gauche) et transversal (à droite) des panneaux en fonction de l'orientation des particules et de leur module intrinsèque (normalisé) – pour l'orientation, la valeur -1 indique une disposition aléatoire, 0 le stratifié, et 1 le panneau orienté. On observe que l'effet du module des particules est significatif dans le cas des panneaux orientés. Dans cette configuration, il semble important de considérer les propriétés intrinsèques des particules.

II.C. Modèle développé

Compte tenu des résultats précédents, un modèle simple de comportement mécanique d'un réseau de particules ou de fibres a été développé.

Ce modèle tient compte de la variabilité des propriétés intrinsèques des constituants, suppose que la colle a un comportement homogène et qu'elle ne modifie pas les propriétés des fibres.

La modélisation s'appuie sur la construction d'un réseau orienté ou aléatoire de fibres, et suppose que les contraintes se distribuent dans le réseau en fonction de l'orientation et des propriétés intrinsèques des éléments. Chaque fibre ou particule se définit par la loi de probabilité de ses propriétés élastiques et de sa résistance en traction. Enfin, les jonctions inter fibres sont supposées indéformables. La figure 4 montre un exemple de réseau fibreux aléatoire, et présente les équations simplifiées du comportement mécanique.

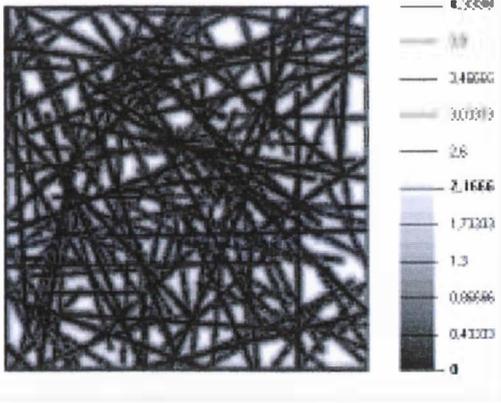


Figure 4a : exemple de réseau fibreux aléatoire

$$\Sigma = \langle E \rangle \varepsilon \quad (1)$$

$$\sigma_f = E_f \varepsilon, \text{ if } \varepsilon < \frac{R_f}{E_f}$$

$$\sigma_f = 0, \text{ if } \varepsilon \geq \frac{R_f}{E_f}$$

$\langle E \rangle$: average elastic modulus
 E_f : fiber modulus
 R_f : fiber strength
 ε : average imposed deformation
 Σ : macroscopic strength

Figure 4b : équations simplifiées du comportement en traction d'un réseau fibreux (fibre bundle)

Une telle approche nécessite en particulier de connaître :

- Les propriétés intrinsèques des fibres : propriétés élastiques anisotropes, et leur résistance mécanique, sous forme de lois de probabilités ;
- Les propriétés des interfaces collées (jonctions entre particules ou fibres) ;
- L'architecture du réseau fibreux dans le cas de panneaux de fibres aléatoires.

Ces deux aspects ont fait l'objet d'investigations qui sont développées dans les paragraphes qui suivent.

II.C.1. Modélisation de la variabilité des propriétés mécaniques des fibres

Un modèle décrivant la variabilité inter et intra cerne des propriétés mécaniques des fibres est proposé ici. Ce modèle s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- La densité de la fibre et l'angle des microfibrilles de cellulose suivent une loi de probabilité de type S_B ; il s'agit d'une forme particulière de loi Lognormale, comprenant un minimum et un maximum théoriques. Les deux grandeurs sont corrélées ;
- Le module d'élasticité longitudinal de la fibre est contrôlé par les deux variables précédentes, et la proportion de matrice (lignine+hémicellulose) dans la fibre ;
- La résistance en traction est décrite par une forme originale de la loi de Weibull, prenant en compte l'anisotropie de l'architecture cellulaire et la possibilité de rupture en cisaillement ou traction perpendiculaire au réseau cristallin ; la forme de cette loi est donnée dans l'équation ci-dessous :

$$F(\sigma_{xx}) = 1 - \exp \left[-L_f \left(\left(\frac{\cos^2 \theta_f}{m_1} \right)^k + \left(\frac{\sin^2 \theta_f}{m_2} \right)^k + \left(\frac{\sin \theta_f \cos \theta_f}{m_{12}} \right)^k \right) (\sigma_{xx})^k \right]$$

Les paramètres indéterminés de ces lois ont été calibrés à partir de données statistiques extraites de la littérature. Ainsi, l'angle des microfibrilles de cellulose n'a pas été analysé dans cette étude, mais ses variations dans le bois initial ou la bois final sont connues pour le genre

Pinus, et des lois de probabilité donnant des valeurs réalistes ont été utilisées.

Cette forme de modélisation n'est évidemment pas exacte par essence, mais on peut introduire, à chaque paramètre, un coefficient de pondération mesurant le degré de confiance accordé à ce paramètre. On peut ainsi obtenir un niveau de confiance global du modèle.

La figure 5 montre un exemple de simulations réalisées à partir d'un tirage aléatoire de cernes d'accroissement représentatif des rondelles de Pin maritime (vis-à-vis des profils densitométriques). La distribution statistique du module d'élasticité longitudinal est bimodale, la proportion entre les deux modes correspondant aux proportions respectives de bois initial et de bois final dans l'échantillonnage simulé. Les valeurs moyennes obtenues correspondent aux données théoriques ou expérimentales issues de la littérature. Elles sont supérieures aux valeurs obtenues moyennes obtenues à partir des placages, peut-être parce que l'effet « bois juvénile » n'a pas été suffisamment pris en compte, ou à cause d'un endommagement des placages lors du déroulage.

Les simulations font apparaître une corrélation entre la résistance en traction et le module d'élasticité longitudinal, d'une part, et l'angle des microfibrilles d'autre part. Comme attendu, cette seconde relation n'est pas linéaire. Les valeurs simulées pour la résistance en traction apparaissent étonnamment élevées (des valeurs similaires ont toutefois été relevées dans certains travaux), mais il faut signaler qu'elles supposent que les fibres sont intactes, hormis les singularités intrinsèques. D'autre part, les paramètres de la loi de Weibull n'ont pas été calibrés.

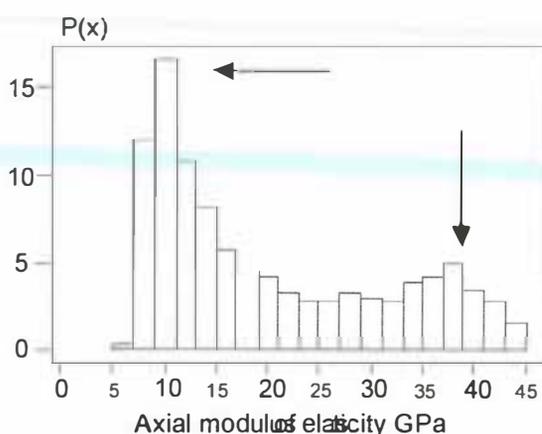
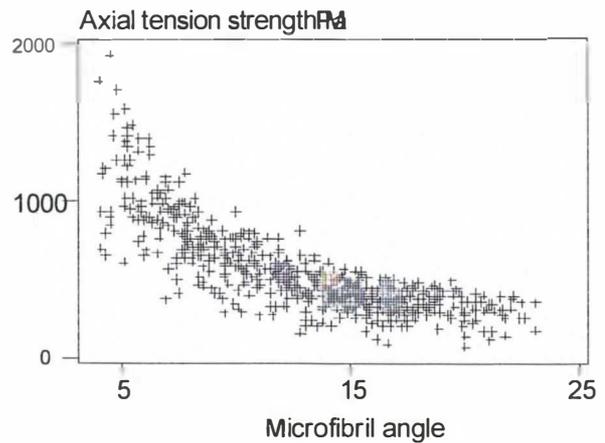
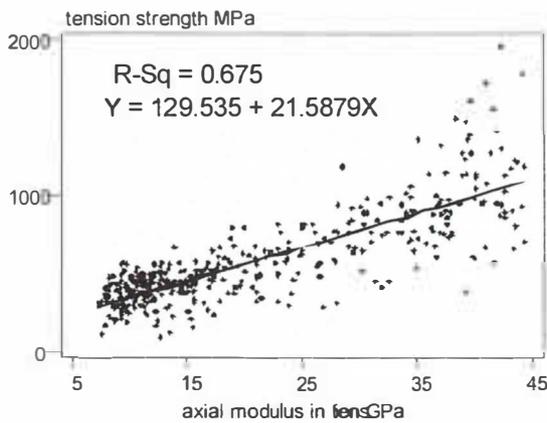


Figure 5: distribution statistique simulée du module d'élasticité longitudinal de fibres de Pin, faisant apparaître le bois initial (module compris entre 5 et 15 GPa) et le bois final (module compris entre 30 et 45 GPa) – les flèches indiquent les valeurs trouvées dans la littérature pour les deux types de bois.

En bas : corrélation entre la résistance en traction simulée et le module d'élasticité des fibres (à gauche) – corrélation entre le module longitudinal et l'angle des microfibrille (à droite). Tous ces résultats sont obtenus par simulation (voir texte).



Ces approches restent théoriques, mais elles permettent de relier des grandeurs mécaniques à des paramètres dont la variabilité phénotypique ou génétique peut être mesurée. L'étude expérimentale des propriétés mécaniques de fibres individuelles reste dans le domaine des perspectives, que nous envisageons dans la suite de ce projet.

II.C.2. Analyse et modélisation de l'architecture et des propriétés de panneaux de fibres

La dernière étape du processus consistait à développer des outils d'analyse et de modélisation de l'architecture de réseaux fibreux aléatoires. Cette étape a été conduite sur des échantillons de panneaux élaborés à partir de fibres industrielles de Pin maritime, préencollées d'une résine urée-formol à 10% de masse sèche. Dans certains panneaux, des fibres sans colle ont été rajoutées en proportions variables, de manière à réduire artificiellement le taux de résine.

Matériel et méthodes : les échantillons ont été fabriqués dans les mêmes conditions que les échantillons d'OSB, par conformation d'un matelas de fibres et pressage entre deux plateaux chauffants. Les échantillons ont les mêmes dimensions (180x180 mm), mais le cycle de pressage a été modifié de manière à étudier l'effet de la densité finale sur le comportement macroscopique des échantillons. La figure 6 montre deux exemples de cycles de pressage, l'un pour un panneau léger, le second pour un panneau standard (le pic de pression correspond à la densification des faces), la relaxation qui suit traduit la polymérisation de la colle.

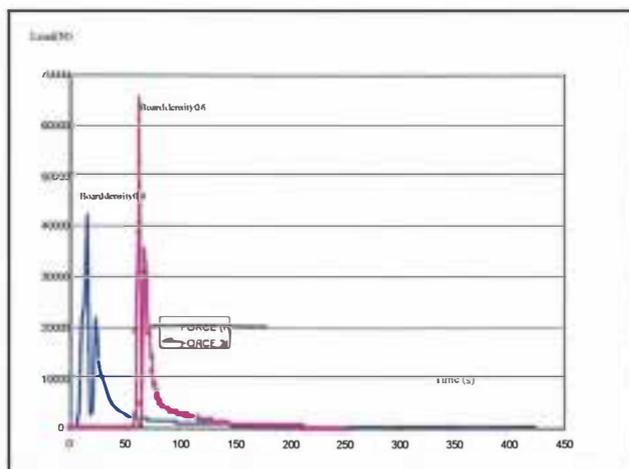


Figure 6 : exemples de cycles de presse - pression=f(temps) – pour deux types d'échantillons de densités différentes. Le premier pic correspond à la densification des faces.

Les échantillons obtenus présentait des densités variant de 0,25 à 0,7 environ selon le cycle utilisé. Ils ont été ensuite analysés selon 3 techniques d'imagerie :

- Microscopie confocale
- Microscopie électronique à balayage
- Microtomographie X

La dernière technique n'a pu être mise en œuvre que récemment, et ne nous permet pas aujourd'hui d'apporter des résultats quantitatifs, mais c'est sans doute la méthode la plus prometteuse.

Principaux résultats :

La figure 7 montre un exemple de réseau aléatoire obtenu après analyse d'image d'un échantillon en microscopie confocale. On analyse, sur une profondeur de quelques centaines de microns, l'évolution de la distribution spatiale des pores. A partir d'un modèle de réseau de fibres dont le diamètre et l'orientation sont aléatoires dans le plan de l'échantillon, on reconstruit un réseau fibreux dont les propriétés sont équivalentes à celles de l'image.

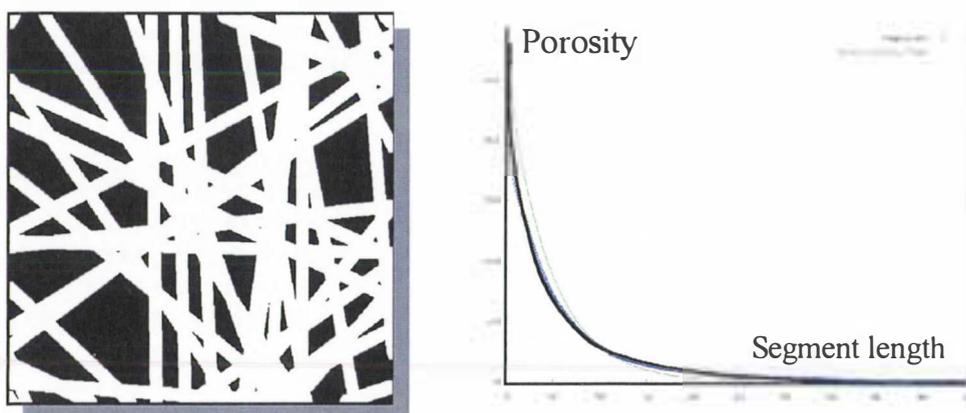


Figure 7 : reconstruction d'un milieu fibreux aléatoire après analyse d'image en microscopie confocale. La figure de droite représente l'évolution de la porosité apparente, mesurée à partir de la probabilité qu'un segment de longueur donnée soit inclus dans un pore, en fonction de la longueur de ce segment. La figure de gauche peut être comparée à celle du réseau figure 4a.

Ces outils restent pour l'instant relativement lourds, et ne permettent pas une analyse quantitative sur un grand nombre d'échantillons.

Nous avons également, selon une procédure similaire à celle que nous avons adoptée pour les échantillons d'OSB, réalisé des essais mécaniques en traction sur des échantillons de panneaux de densités différentes, et comportant différentes fractions volumiques de colle. Cela nous a permis de constater que lorsque la proportion de colle diminue, l'effet de la densité sur la cohésion globale diminue également (figure 8) : l'architecture (enchevêtrement

des fibres dans le réseau) est prépondérante. En revanche, lorsque toutes les fibres sont encollées, les liaisons interfibres sont d'autant plus résistantes que le panneau est dense. On peut ainsi séparer les effets respectifs du process (densification) et de la formulation (quantité de colle) sur la qualité globale d'un panneau de fibres.

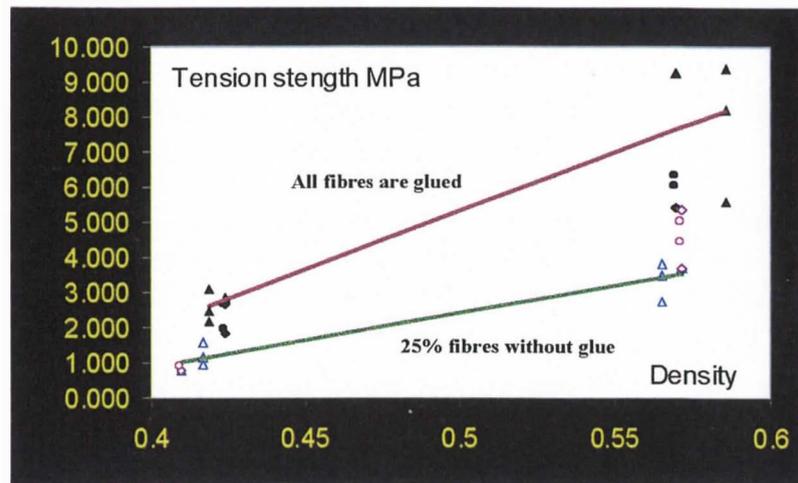


Figure 8 : résistance en traction d'échantillons de fibres en fonction de la densité finale et de la fraction massique de fibres encollées (à 10% d'une résine UF).

III. Conclusions

L'étude des relations entre la qualité d'une ressource (particules, fibres) et la qualité de panneaux composites élaborés avec cette ressource, nécessite des outils expérimentaux relativement lourds. Ces techniques sont néanmoins nécessaires pour quantifier le rôle des différents paramètres intervenant dans le déterminisme du comportement macroscopique : caractéristiques intrinsèques de la ressource, formulation du composite, procédés d'élaboration.

Dans le cadre de cette étude, nous avons mis en évidence :

- Le rôle significatif des caractéristiques mécaniques des particules, par rapport au comportement d'échantillons d'OSB ;
- Le rôle de la colle sur les propriétés de cohésion de panneaux de fibres ;
- L'effet de la densification sur les propriétés de ces mêmes panneaux de fibres.

Les propriétés mécaniques de plaquettes de bois déroulé sont proches de celles du bois juvénile (sans défaut) de Pin maritime, mais restent inférieures aux caractéristiques théoriques de la fibre (de 3 à 15 GPa pour les plaquettes). Les modèles mécaniques statistiques développés dans le cadre de cette étude restent néanmoins réalistes, et pourront être affinés par la suite.

Nous avons pu quantifier, dans le cadre de ces travaux, les propriétés de panneaux à base de bois à partir de paramètres de fabrication, ou de caractéristiques intrinsèques du matériau de

base. Il nous paraît important de poursuivre cette démarche d'analyse en préalable à toute étude de variabilité. C'est pourquoi nous n'avons pas, pour l'instant, mis en œuvre de techniques d'analyse quantitative.

SAR4.6 : caractérisation rhéologique de fibres de pin pour des applications en panneaux: typage de 200 arbres (P4)

Compte tenu de l'importance que nous avons accordée à la tâche SAR4.5, il ne nous a pas été possible de typer les 200 arbres, et seuls les résultats obtenus sur les 20 rondelles sont disponibles à l'issue de ce projet. La lourdeur du protocole expérimental mis en place ne nous permettait sans doute pas, comme nous avons pu l'imaginer au début, de réaliser une étude extensive sur un grand nombre d'individus. C'est pourquoi nous avons privilégié le caractère exploratoire, et l'apport de la modélisation, qui intègre les principaux facteurs présentant une variabilité génétique (densité locale, quantité de lignine, angle des microfibrilles).

SAR4.7 : caractérisation rhéologique de fibres d'eucalyptus : phase exploratoire (P2)

SAR4.8 : caractérisation rhéologique de fibres d'eucalyptus : typage de 200 arbres (P2)

⌈ Ces deux sous-actions de recherches sont présentées à l'annexe EUCALYPTUS

AR5 : mesures dendrométriques

SAR5.1 : chez le pin (200 mesures) (P4)

Les mesures dendrométriques (hauteur, diamètre, densité au pilodyn) ont été réalisées avant la coupe rase des 200 arbres en mars 98. Le pin présentant une croissance cyclique, nous avons pu rétrospectivement déterminer les hauteurs de 5 ans à 12 ans. Des mesures de densité au pilodyn ont également été effectuées avant abattage. Des disques ont ensuite été prélevés à une hauteur d'environ 1m de hauteur, séchés et envoyés en avril 98 aux différents partenaires pour analyse. Pour les 200 arbres, chaque partenaire disposé d'un billon prélevé à la même hauteur.

SAR5.2 : chez l'eucalyptus (200 mesures) (P2)

Différentes mesures dendrométriques ont été réalisées sur cette famille de 200 hybrides interspécifiques de la plantation jusqu'à l'exploitation. La hauteur, la circonférence et la forme des arbres ont été mesurées à 14, 26, 38, 50 et 62 mois. La croissance exceptionnelle des *Eucalyptus* au Congo permet une exploitation industrielle des arbres à 7 ans. Au moment de l'exploitation des arbres pour ce projet, les arbres étaient donc arrivés à maturité.

AR6 : Analyse des corrélations entre caractères de qualité du bois

SAR6.1 : chez le pin (P1, 4, 5), piloté par P4

La base de données (disponible à http://www.pierroton.inra.fr/MENRT_Lignine) présentant un total de 406 caractères (voir annexe PIN MARITIME), nous avons synthétiser les grandes tendances des corrélations phénotypiques pour un sous ensemble de caractères (signification à 5% pour $r > 0.18$)

Corrélations phénotypiques entre la croissance et les caractères de qualité du bois

	<i>Caratère</i>	<i>TH97mes</i>
bois d'œuvre	pylodin	0.40
	Densité moyenne (mdm)	-0.13
Paramètres industries papetières	kappa30	-0.18
	rendement à kappa 30	0.09
	kappa40	-0.24
	rendement à kappa 40	0.05
morphologie des fibres	longueur	0.44
	largeur	-0.16
	masse lineique	0.53
	souplesse	-0.51
	Zerospan	0.07
composition chimique	% extrait eau	-0.42
	% extrait acetone	-0.07
	% extrait total	-0.40
	lignine (ftir)	-0.18
	alpha cellulose	0.32
	Hemi cellulose	-0.42
	Conc H	-0.14
	Conc G	0.20
HsurG	-0.21	

Corrélations phénotypiques entre la densité et les autres caractères de qualité du bois

	<i>Caractères</i>	<i>Densité (mdm)</i>
Paramètres industries papetières	kappa30	0.09
	rendement à kappa 30	-0.01
	kappa40	-0.04
	rendement à kappa 40	0.11
morphologie des fibres	longueur	-0.13
	largeur	-0.17
	masse lineique	-0.16
	souplesse	0.08
	Zerospan	-0.02
composition chimique	% extrait eau	0.19
	% extrait acetone	0.14
	% extrait total	0.21
	lignine (ftir)	-0.13
	alpha cellulose	0.00
	Hemi cellulose	0.05
	Conc H	0.06
	Conc G	-0.03
HsurG	0.07	

Corrélations phénotypiques entre les caractéristiques des fibres et les caractéristiques chimiques du bois

	longueur	largeur	masse linéique	souplesse	% extrait eau	% extrait acetone	% extrait total	lignine (Ftir)	Zerospan	alpha cellulose	Hemi cellulose	conc H	Gconc
largeur	-0.49												
masse linéique	0.89	-0.51											
souplesse	-0.76	0.70	-0.78										
% extrait eau	-0.14	-0.02	-0.16	0.14									
% extrait acetone	-0.11	0.04	-0.01	0.06	0.43								
% extrait total	-0.14	-0.01	-0.14	0.14	0.97	0.60							
lignine (Ftir)	-0.24	0.14	-0.21	0.25	0.32	0.04	0.27						
Zerospan	0.70	-0.37	0.55	-0.51	0.02	-0.06	0.02	-0.19					
alpha cellulose	0.28	-0.17	0.39	-0.35	-0.18	0.06	-0.13	-0.56	0.14				
Hemi cellulose	-0.28	0.12	-0.40	0.37	0.17	-0.05	0.13	0.27	-0.09	-0.71			
conc H	-0.05	-0.02	-0.08	0.06	0.01	0.08	0.00	0.34	-0.13	-0.33	0.25		
Gconc	0.17	0.08	0.20	-0.08	-0.01	0.06	-0.01	-0.07	0.14	0.20	-0.24	0.19	
HsurG	-0.13	-0.05	-0.15	0.08	0.00	0.07	0.00	0.34	-0.19	-0.38	0.30	0.93	-0.16

SAR6.2 : chez l'eucalyptus (P1, 2, 5), piloté par P2

De très nombreuses données ont été fournies par les différents partenaires :

- P1 : 7 variables : Rendement papetier ; indice kappa ; longueur moyenne pondérée (mm) ; longueur arithmétique (mm) ; largeur (μm) ; masse linéique ($\mu\text{g}/\text{mm}$) ; souplesse (%).
- P2 : 26 variables : Déformation Résiduelle Longitudinale de maturation ; DRLM_ ; Index d'éclatement à 1 jour ; Index d'éclatement à 1 semaine ; Index d'éclatement à 2 mois ; la largeur et la longueur des fentes en bout ; et 19 variables tirées du module d'élasticité.
- P4 : 51 variables : Les variables sont tirées des spectres d'infradensité.
- P5 : 12 variables : Totalité des matières extractibles (eau acetone alcool) ; Lignine rapportée au résidu pariétal ; Lignine rapportée à la masse totale de bois ; p.hydroxyphénylpropane H (% bois ext et $\mu\text{mole}/\text{g}$ lig) ; gäiacyl G (% bois ext et $\mu\text{mole}/\text{g}$ lig) ; syringyl S (% bois ext et $\mu\text{mole}/\text{g}$ lig) ; Total H+G+S ; Rapports H/G et S/G.

Avec les 10 variables dendrométriques, il y avait donc un jeu de 106 variables différentes.

En ce qui concerne les variables mesurées par le partenaire P1, seules les mesures physiques de longueur et largeur des fibres de masse linéique et de souplesse ont été analysées. Les variables de rendement papetier et d'indice kappa étant fausses, elles n'ont pas été utilisées.

En ce qui concerne les variables mesurées par le partenaire P2, 3 variables présentant une distribution bimodale ont été éliminées (agei_E ; agei_ES ; agei_MV). Deux variables (DRLM_ et ageu_ES) ont été éliminées de l'étude car elles présentaient un coefficient de corrélation de Pearson égal à 1 avec une autre variable (DRLM et ageu_E).

En ce qui concerne les variables mesurées par le partenaire P4 de très nombreux coefficients de corrélations égaux à 1 ont été trouvés. De ce fait 18 variables ont été éliminées de l'étude : MinD1 à MinD6 ; IQD1 à IQD6 ; MADD1 à MADD6.

En ce qui concerne les variables mesurées par le partenaire P5, la variable H (% bois ext) a été éliminée car elle présentait une corrélation égale à 1 avec H ($\mu\text{mole}/\text{g}$ lig).

AR7 : détection de QTL

SAR7.1 : chez le pin (P4)

De nombreux caractères ont été mesurés sur les individus qui ont servi à la construction des cartes génétiques. Dans un premier temps, nous avons recherché des associations statistiques entre le polymorphisme des marqueurs AFLPet la variation phénotypique de chaque caractère par les techniques du « composite interval mapping ». Le tableau 1 présente de façon synthétique les résultats qui sont détaillés à l'annexe PIN MARITIME.

Tableau 1. Nombre de QTL, position et %variance phénotypique expliquée pour quelques caractères.

Trait	Nombre de QTL	Groupe de liaison	Variance expliquée	phénotypique
Densité moyenne	1	11	4.6 %	
Hétérogénéité de la densité	3	3 ; 10 ; 12	21 %	
Taux d'extraits à l'eau	3	1 ; 5 ; 7	20.5 %	
% lignine H,G	7	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 7 ; 8 ; 10	47.2 %	
Indice Kappa	3	1, 7, 10	20 %	
Rendement en pâte	1	10	4.6 %	
Longueur pondérée des fibres	4	4 ; 8 ; 9 ; 12	27.6 %	
Largeur des fibres	2	7 ; 8	14.7 %	
Masse linéique des fibres	4	4 ; 8 ; 9 ; 12	25.2 %	
Souplesse	3	8 ; 10 ; 12	21.9 %	
Zéro span: solidité des fibres	6	1 ; 2 ; 4 ; 5 ; 7 ; 9	37.6 %	

SAR7.2 : chez l'eucalyptus (P2)

Les analyses réalisées sur les deux génomes ont donné de nombreux résultats. Un total de 158 et 94 QTLs ont été détectés respectivement sur le génome d'*E. urophylla* et le génome d'*E. grandis*. Le détail des différentes analyses est donné dans les tableaux 2 et 3 de l'annexe EUCALYPTUS. Compte tenu de nos effectifs un seuil de détection de 1.7 (Lod score) a été retenu pour ces différentes analyses.

Pour l'*E. urophylla*, il faut remarquer 5 variables : le rapport S/G (5QTLs voir figure1 de l'annexe EUCALYPTUS) ; les taux de lignine avec et sans extraits (4QTLs) ; la valeur moyenne du module d'élasticité à 30 mois (4 QTLs) ; la valeur moyenne du module d'élasticité spécifique à 30 mois (4QTLs) dont les pourcentages de variation phénotypique cumulés sont élevés et compris entre 41 et 37 %. La plus forte valeur a été observée avec le rapport S/G puisque 20 % de la variation phénotypique de ce caractère peut être expliquée par la variation allélique du gène de la CCR.

Pour l'*E. grandis*, il faut remarquer 3 variables : les taux de lignine sans extraits (6 QTLs) et avec extraits (5 QTLs) et la mesure du pilodyn à 62 mois(4QTLs) dont les pourcentages de variation phénotypique cumulés sont respectivement de 41%, 29% et 30%. La plus forte valeur a été observée avec le rapport S/G puisque près de 14 % de la variation phénotypique de ce caractère peut être expliquée par la variation allélique du gène de la C4H.

L'étude des colocalisations entre les 11 gènes de la voie de biosynthèse des lignines et des QTLs permet de mettre en évidence les résultats suivants

le polymorphisme allélique de la CCR est relié à 10 caractères : les lignines de Klason avec et sans extrait, les teneurs en monolignol Syringyl, le rapport S/G, les modules d'élasticité

Emoy30 et ESmy30, la mesure d'infradensité EnergyD2, la largeur et la souplesse des fibres de cellulose et la densité du bois mesurée par pilodyn à 26 mois.

le polymorphisme allélique de la 4CL est relié à 5 caractères : essentiellement la densité du bois mesurée par pilodyn à 38, 50 et 62 mois sur et sous écorce ainsi que la décroissance métrique (cm/M) des arbres.

le polymorphisme allélique de la C4H est relié à 3 caractères : les teneurs en monolignols H et S (en μ mole et % en bois).

le polymorphisme allélique de la PAL est relié à 2 caractères du module d'élasticité : E2xagei et ES2xagei.

le polymorphisme allélique de la COMT est relié à 2 caractères : module d'élasticité (IE2mois) et composante de l'infradensité (MinS6).

le polymorphisme allélique du facteur de transcription Myb 1 est relié à 1 caractère du module d'élasticité E2xagei.

le polymorphisme allélique du facteur de transcription Myb 2 est relié à la teneur en lignine : LigKlasSE.

le polymorphisme allélique du facteur de transcription Myb 4 est relié à 1 caractère de densité du bois : pilsous62.

Des interactions significatives entre deux marqueurs ont été trouvées :

sur le génome d'*Eucalyptus urophylla* pour le module d'élasticité moyen à 30 mois (Emoy30) entre le facteur de transcription Myb 4 et le marqueur Λ 20_938/1+ (proche de Myb1) pvalue = 0.00077 ; pour le module d'élasticité de la moelle (Esmoelle) entre la COMT et le marqueur M05_527/1- pvalue = 0.00157 ; enfin pour la mesure d'infradensité MedianS6 entre la CCR et le marqueur B08_1945/2+ pvalue = 0.00156.

sur le génome d'*Eucalyptus grandis* pour le rapport S/G entre la CAD et le marqueur RAPD K12_657/1- (marqueur proche de la CCR) pvalue = 0.00167.

Sur la totalité des enzymes de la voie de biosynthèse étudiée seule la CCoAOMT ne semble donc pas directement ou indirectement impliquée dans la variation des caractères quantitatifs étudiés dans notre famille d'hybrides interspécifiques.

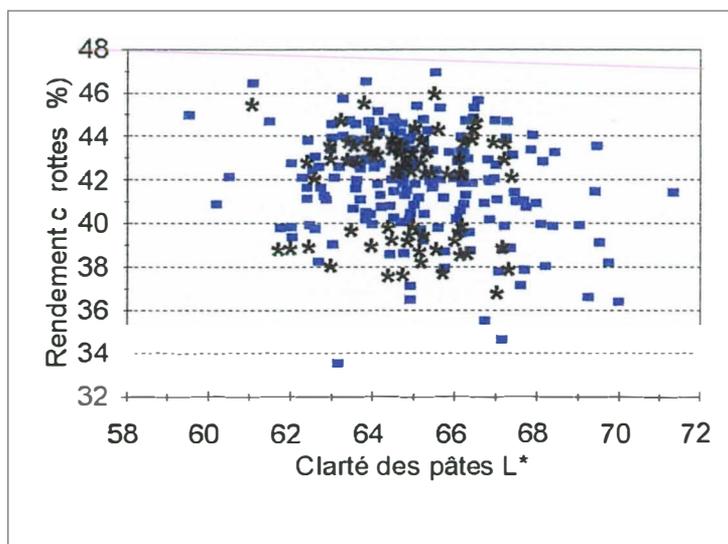
Une analyse de l'effet des allèles des gènes CCR et PAL montre que la combinaison des meilleurs allèles augmente le rapport S/G de près de 20%.

AR8 : étude de la variabilité phénotypique de caractéristiques biochimiques et technologiques dans la première population d'amélioration du pin maritime

SAR8.1 : typage de 67 arbres "plus" pour le taux d'extraits, le taux de lignine et microtests Kraft en lessiveurs de 12ml (P1)

200 clones G0 x 3 arbres âgés de 25 - 30 ans (vergers à graines de St Sardos et de Sore) ont été sondés, à raison de 3 carottes par arbre, la première année.

La première carotte a été utilisée pour déterminer le rendement en pâte par micro-cuissons en micro-lessiveurs de 12 ml, ce qui a permis de sélectionner 67 clones contrastés en rendement pour une clarté de pâte variable, comme illustré sur la figure suivante :



L'astérisque indique les 67 clones retenus pour une analyse de la composition chimique

La seconde carotte a été broyée, puis extraite par l'appareil SOXTEC suivant une séquence eau-acétone. La sciure tamisée et extraite est ensuite analysée par spectroscopie infra-rouge, afin d'en déterminer la teneur en lignine.

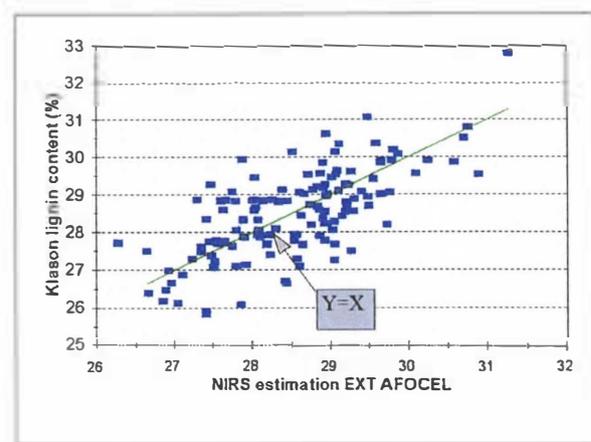
La troisième carotte a été expédiée à l'INRA Orléans pour la mesure de l'infradensité du bois.

Variabilité de la composition chimique du bois de pin maritime dans la population d'amélioration landaise : méthode d'estimation et résultats

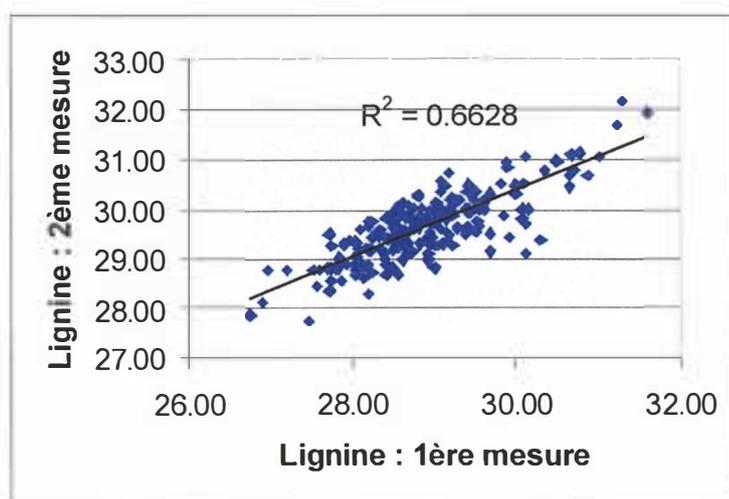
La quantité de sciure obtenue après broyage des carottes étant très limitée et insuffisante pour une mesure normalisée du taux de lignine, l'AFOCEL a développé un protocole d'estimation du taux de lignine Klason par spectroscopie proche infra-rouge NIRS (Thieule et al., 2001, Chantre et al.2001). Cette approche a été rendue possible dans le cadre du présent projet par l'élaboration d'une importante base de données « lignine Klason » (SAR 2.1), réunie à celle du projet européen GENIALITY (FAIR CT-983953) sur des arbres d'âge similaire, et suivant les mêmes protocoles de mesure.

La méthode est appliquée sur la sciure extraite et permet l'estimation simultanée de plusieurs composés (lignine et alphacellulose dans ce cas) avec une précision d'un niveau suffisant pour discriminer les clones. En effet l'écart-type de prédiction (résiduel) calculé sur un échantillon indépendant est de 0,75 (soit un coefficient de variation résiduel de 2,6%), au regard d'une variation du taux de lignine atteignant 5 points entre individus. L'estimation du taux de cellulose est également possible, avec une précision toutefois un peu inférieure (CV r = 3.7% et écart type de prédiction de 1.7).

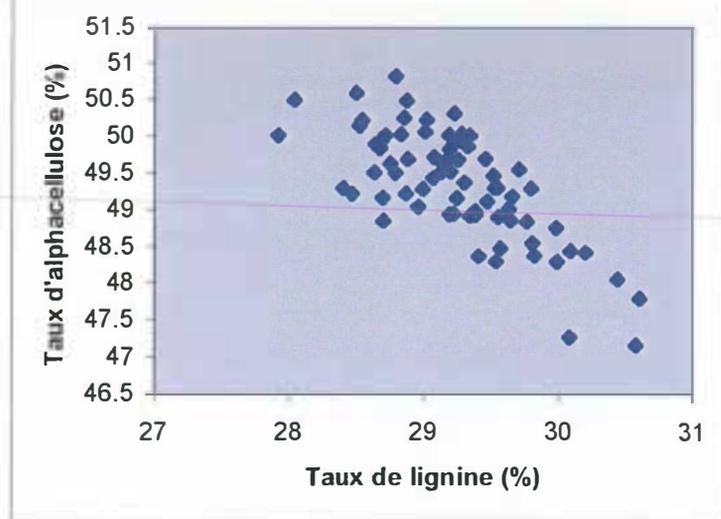
Le graphique ci après illustre la validation de la prédiction NIRS du taux de lignine sur un échantillon indépendant



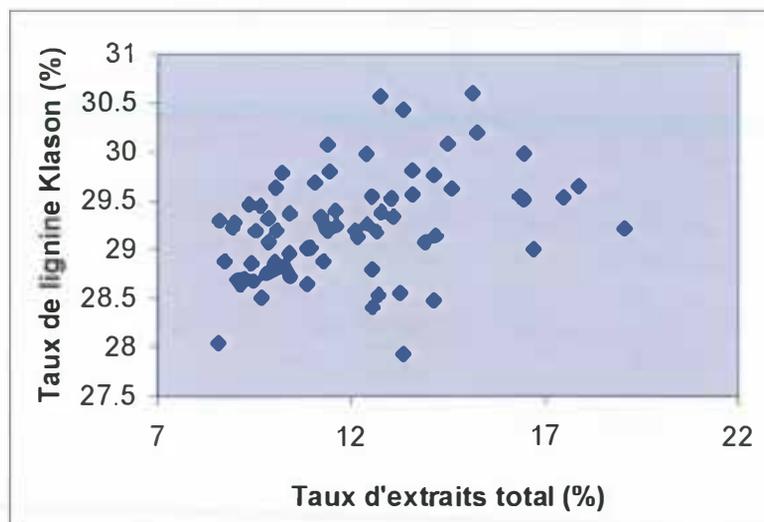
Le graphique suivant illustre l'imprécision méthodologique observée sur le même échantillon entre deux mesures successives sur deux prises distinctes.



Le graphique précédent illustre l'ampleur des variations entre moyennes de clones G0 et confirme qu'il existe une variabilité génétique très significative, d'au moins 3 points entre géniteurs, dans la population d'amélioration de la race landaise (effet clone confirmé par l'analyse de variance). De plus une baisse du taux de lignine s'accompagne d'une augmentation du taux de cellulose, et donc une augmentation concomitante du rendement en pâte. L'héritabilité du taux de lignine au sens strict étant assez élevée (environ 0,5, Pot et al. 2001, sous presse), une stratégie d'amélioration de la composition chimique du bois de pin maritime mérite d'être envisagée pour augmenter le potentiel technologique de cette espèce.



Une variation spectaculaire et hautement significative du taux d'extraits entre clones est également mise à jour (y compris à taux de duramen égal) : les écarts entre moyennes de clones vont de 8,6 à 19 %, et en extraits à l'eau de 5,9 à 12%. Cette variation génétique du taux d'extraits est pratiquement indépendante de celle du taux de lignine, ce qui laisse augurer la possibilité de sélectionner simultanément sur ces deux critères (taux de lignine et taux d'extraits minimaux, afin d'augmenter le rendement en pâte).



AR9 : Impact technico-économique (P6)

Dans le cadre du projet BIOTECH, cinq groupes de billons, sélectionnés après une première évaluation réalisée par l'Afocel, ont été testés par Smurfit Worldwide Research Europe.

Le but étant d'évaluer les qualités papetières de chacun de ces cinq groupes ; cinétique de cuisson, rendement à kappa 80, propriétés physiques des pâtes, analyse de la liqueur noire. Afin de simplifier l'évaluation, nous avons déterminé la cinétique de cuisson sur l'ensemble des cinq groupes, chacun des cinq groupes étant traité dans les mêmes conditions afin d'obtenir un indice de délignification avoisinant 80.

I Détermination de la cinétique de cuisson

Un lot moyen de copeaux a été réalisé en mélangeant les cinq lots (voir graphique en SAR3.1).

Références SWRE	Référence AFOCEL
LOT 1	4,64,68,70,84,124,133,154
LOT 2	3,6,49,54,100,150,160,161,195
LOT 3	36,74,109,121,165,193,198
LOT 4	14,18,34,37,57,59,83,129,197
LOT 4 bis	1, 60

Les cuissons ont été réalisées dans les conditions suivantes :

Masse anhydre de copeaux : 500g

Sulfidité de la liqueur de cuisson 25%

Rapport liquide/bois 400%

Diagramme de cuisson :

Imprégnation : 20 mn à 100°C

Montée en température : 100 à 172°C 60 mn

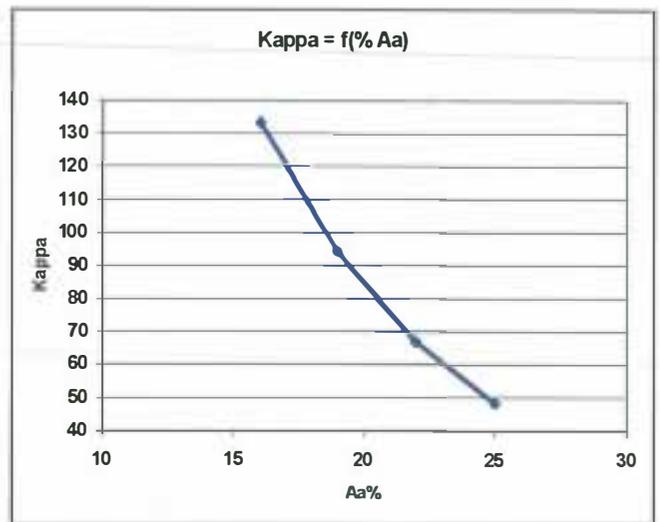
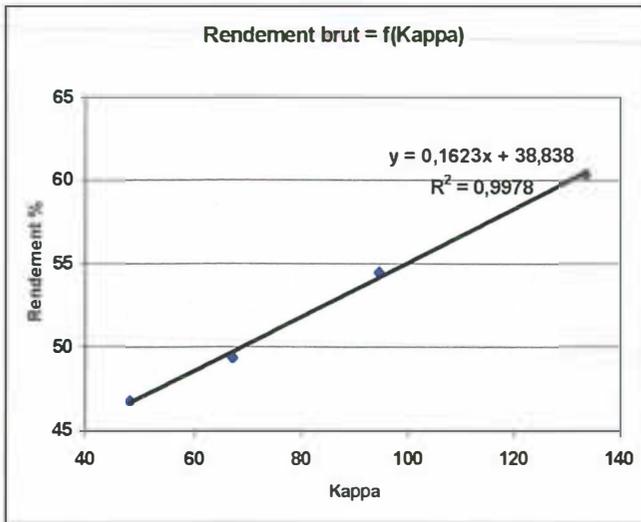
Palier à 172°C 45 mn

Les charges en alcali actif ont été de 16%, 19%, 22%, et 25% pour couvrir une large gamme d'indice kappa.

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant.

% alcali actif %	16	19	22	25
Rendement brut %	60,4	54,5	49,4	46,8
Kappa	133,5	94,5	67,1	48,4

Les graphiques suivant montrent l'évolution du rendement brut en fonction de l'indice kappa, et l'évolution de l'indice kappa en fonction du taux d'alcali actif présenté.



Pour l'ensemble des cinq lots considérés, le rendement évolue avec l'indice kappa selon la relation : Rendement = 0,1623(Kappa) + 38,838

La courbe d'évolution de l'indice kappa avec le taux d'alcali présenté permet de préciser que l'indice kappa 80 serait obtenu avec une charge en alcali égale à 20,5%

II Détermination des propriétés papetières des différents lots

II.A Détermination du rendement

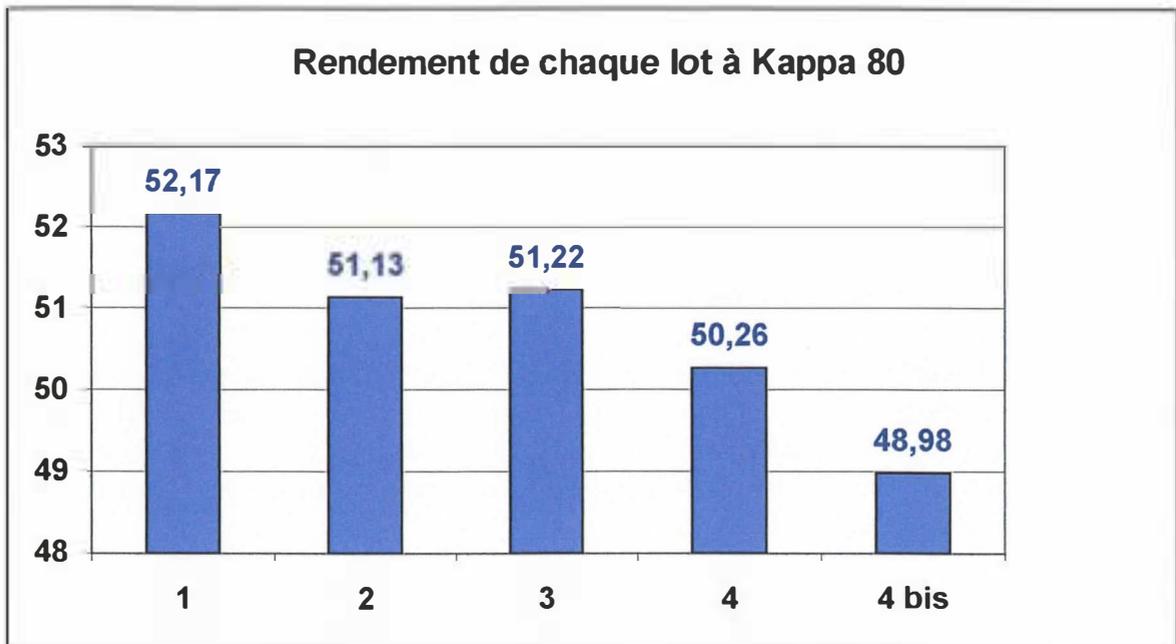
Les copeaux de chacun des cinq lots ont été soumis à la cuisson kraft selon le même diagramme de cuisson que celui utilisé dans la première partie, mais la charge en alcali actif a été maintenue constante à 20,5%

Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant :

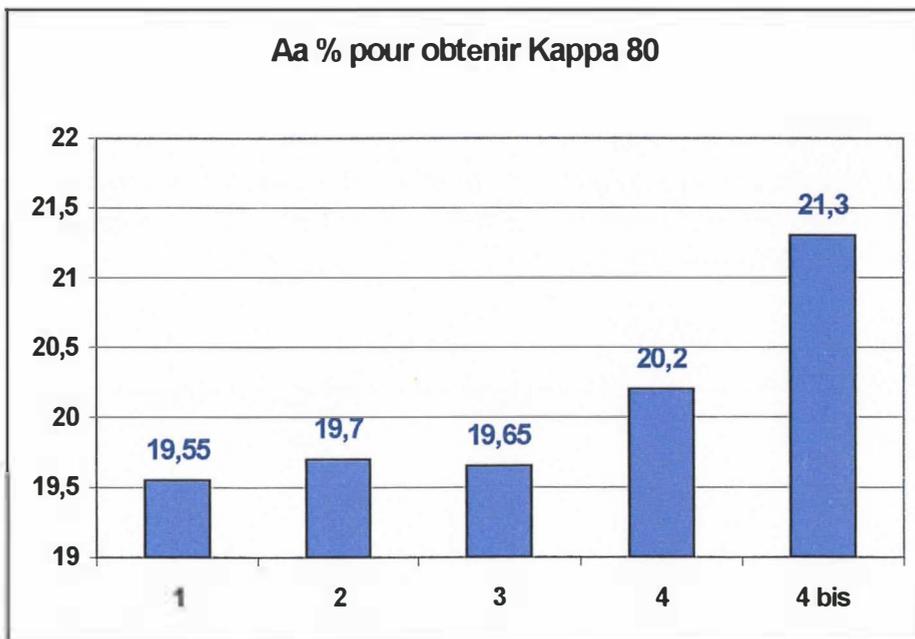
lots	1	2	3	4	4 bis
Rendement brut %	51,14	50,74	50,44	50,08	50,26
Kappa	71,2	77,6	75,2	78,9	87,9

Les kappas obtenus sont, sauf pour le lot 4 bis et 1, très proches de l'objectif 80 visé. Le lot 4 bis est plus difficile à délignifier, en revanche, le lot 1 est plus facile à délignifier.

En se basant sur la relation Rendement/Kappa déterminée dans la première partie, il est possible de comparer le rendement de chacun des cinq lots à Kappa 80. Le graphique ci-dessous regroupe les résultats.



De la même façon, il est possible de déterminer la charge en alcali nécessaire pour obtenir l'indice kappa 80 pour chacun des lots. Les résultats sont regroupés sur le graphique suivant.



II.B Analyse de la liqueur noire produite

Pour chacun des lots, nous avons déterminé le pouvoir calorifique des liqueurs noires générées par les cuissons. Les résultats sont regroupés dans le tableau suivant.

lots	1	2	3	4	4 bis
Rendement brut %	51,14	50,74	50,44	50,08	50,26
Kappa	71,2	77,6	75,2	78,9	87,9
pouvoir calorifique (J/g)	2479	2427	2294	2572	2465

Le PCS de la liqueur noire produite avec le lot 3 est le plus faible, les lots 2 et 4 fournissent une liqueur noire dont les PCS sont équivalents. Le lot 1, s'il avait été délignifié au même kappa que les lots 2 et 4 aurait fourni une liqueur noire possédant le meilleur PCS, en revanche, le lot 4 bis, délignifié à un kappa plus faible aurait donné un PCS plus faible que les autres lots.

Outre le pouvoir calorifique, la quantité de matières sèches produites par tonne de pâte obtenue est un élément à prendre en compte, car bien souvent l'usine kraft est limitée par la quantité de matières sèches pouvant être brûlée. Cette quantité de matières sèches produites dépend du rendement et de la charge en alcali. Le tableau suivant regroupe les résultats.

lots	1	2	3	4	4 bis
Rendement brut %	52,17	51,13	51,22	50,26	48,98
Alcali actif %	19,55	19,70	19,65	20,20	21,3
Matières sèches t/t pâte	1,403	1,456	1,450	1,511	1,606

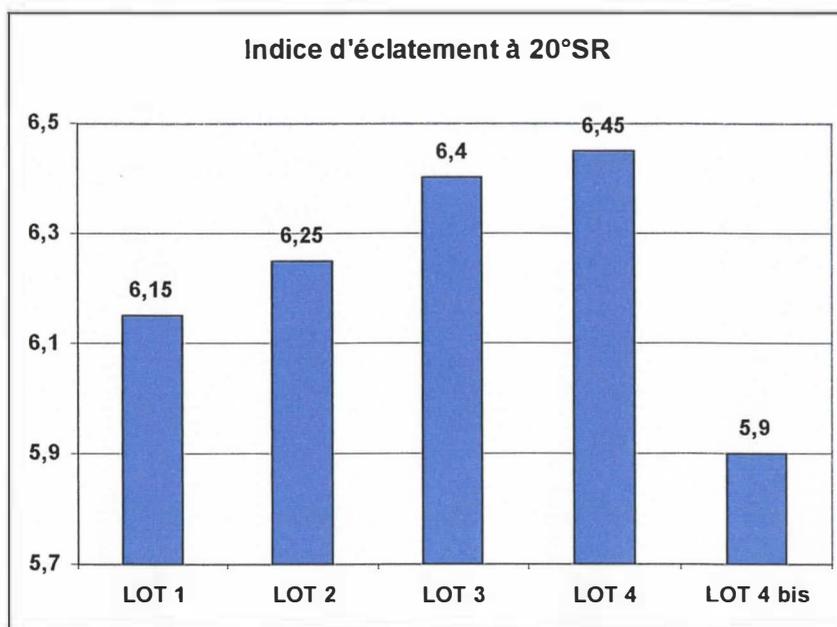
II.C Caractéristiques mécaniques des pâtes

Les propriétés mécaniques des pâtes ont été déterminées après raffinage, les mises en feuilles ont été effectuées sur formettes Noble & Wood en 150 g/m². Le tableau suivant regroupe l'ensemble des résultats.

CARACTERISTIQUES DES PATES

		lot 1			lot 2			lot 3			lot 4			lot 4 bis		
		0	32	60	0	35	56	0	48	63	0	44	58	0	50	58
temps de raffinage	mn	0	32	60	0	35	56	0	48	63	0	44	58	0	50	58
°SR		13	17	31	13	18	24	13	18	24	13	19	24	13	19	24
Grammage	g/m ²	149,2	149,2	149,1	149,7	149,3	148,7	150,3	149,2	149,3	149,4	150,9	151,1	150,8	150,9	145,7
main	cm ³ /g	1,69	1,31	1,24	1,6	1,25	1,23	1,71	1,27	1,26	1,66	1,26	1,2	1,75	1,22	1,21
Perméabilité à l'air	cm ³ /Pa.m ² .s	15	1,8	0,32	8,9	1	0,35	14	1	0,45	10	0,86	0,35	16	0,82	0,51
Eclatement	kPa.m ² /g	3,98	5,75	6,65	4,68	6,05	6,58	4,05	6,25	6,56	4,55	6,3	6,82	3,99	5,74	6,28
SCT	kN/m	4,28	5,56	5,73	4,17	5,72	5,83	3,7	5,38	5,44	4,18	5,59	5,88	4,01	5,46	5,3

L'indice d'éclatement est la caractéristique principale pour la fabrication du kraft liner, le graphique suivant montre le positionnement des différents lots de bois selon l'indice d'éclatement obtenu pour les pâtes raffinées à 20°SR.



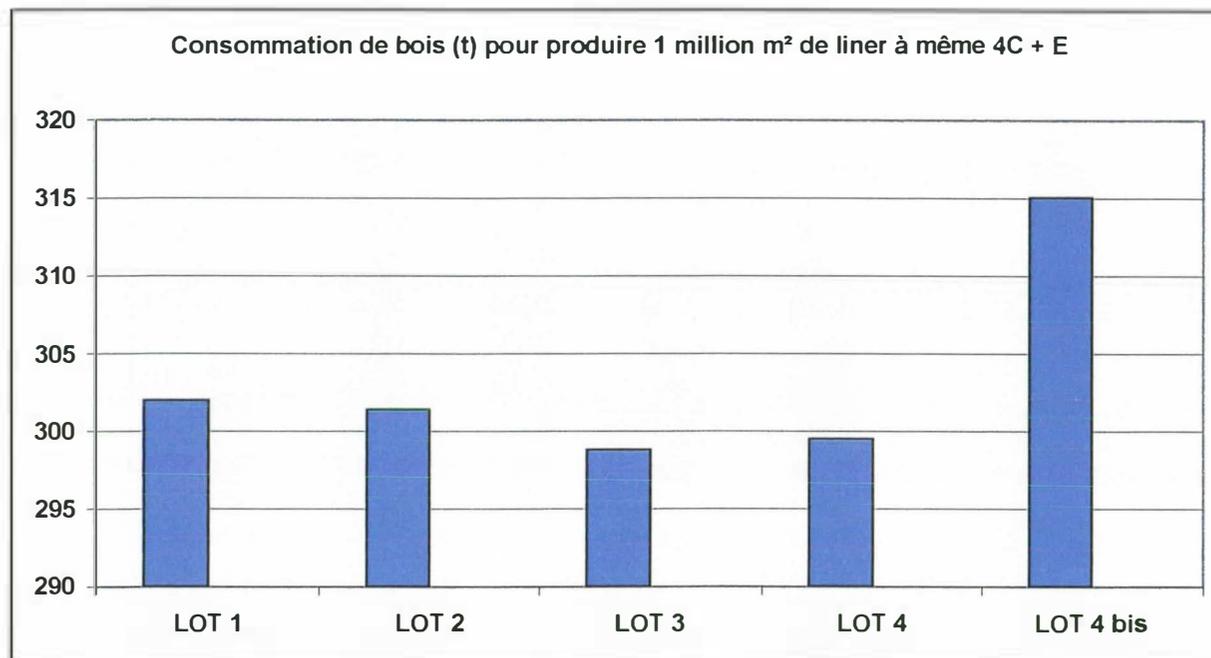
Le lot 4 bis est certainement légèrement pénalisé par le niveau de l'indice kappa de la pâte .
Le papetier peut compenser les caractéristiques de sa pâte en surgrammant son papier selon la formule du 4C + E où C représente le grammage et E l'indice d'éclatement. Il est, dès lors, possible de déterminer la quantité de bois nécessaire pour produire une surface de papier répondant à la formule du 4C + E.

Dans le tableau ci-dessous, nous avons fait figurer les grammages nécessaires pour obtenir avec les pâtes des cinq lots de bois le même 4C + E. Selon les lots de bois, les grammages évoluent de 150 à 158,33 g/m².

	LOT 1	LOT 2	LOT 3	LOT 4	LOT 4 bis
éclatement	6,15	6,25	6,4	6,45	5,9
4C + E (150g)	15,225	15,375	15,600	15,675	14,850
grammage pour 4C + E = 15,675	154,43	152,93	150,72	150,00	158,33

Si nous prenons la base de 1 million de m² de papier, selon le tableau ci-dessus, on constate qu'il faudra respectivement ; 154,43 t, 152,93 t, 150,72 t, 150 t, 158,33 t de pâte pour les lots 1, 2, 3, 4, et 4 bis. Compte tenu des rendements de cuisson, nous pouvons alors déterminer la quantité de bois nécessaire pour produire 1 million de m² de kraft liner de même 4C + E pour chacun des lots de bois. Le tableau et le graphique suivant illustrent les résultats.

	LOT 1	LOT 2	LOT 3	LOT 4	LOT 4 bis
éclatement	6,15	6,25	6,40	6,45	5,90
grammage pour 4C + E = 15,675	154,43	152,93	150,72	150,00	158,33
Rendement brut (%)	51,14	50,74	50,44	50,08	50,26
Quantité de bois (t anhydre) pour 10 ⁶ m ² de liner	301,97	301,40	298,81	299,52	315,02



La consommation de bois pour produire la même quantité de kraft liner de mêmes performances est quasiment identique pour les lots 1, 2, 3, et 4, la faiblesse des caractéristiques obtenues avec le lot 1 est compensée par son meilleur rendement. En revanche le lot 4 bis demande une consommation de bois plus importante, en raison du niveau de caractéristiques et du rendement.

III Conclusions

Les différents lots testés se différencient, tant au niveau de leur aptitude à la cuisson kraft, qu'au niveau des propriétés papetières des pâtes obtenues.

Les lots 2 et 3 ont le même comportement lors de la cuisson kraft, ils ont le même rendement et nécessitent la même quantité d'alcali pour obtenir le même niveau de délignification. Le lot 1 est celui qui donne le meilleur rendement, il possède la même cinétique de cuisson que les lots 2 et 3. Le lot 4 nécessite davantage d'alcali que les lots 1, 2, et 3 mais possède un rendement inférieur, cette tendance est observée avec le lot 4 bis, qui parmi les cinq lots est celui qui demande le plus d'alcali et qui fournit le rendement le plus faible.

Si les lots 1, 2, et 3 fournissent après cuisson une liqueur noire équivalente en ce qui concerne le pouvoir calorifique et la quantité de matières sèches produites, le lot 4 fournit une liqueur noire possédant un meilleur pouvoir calorifique que les 3 premiers lots, mais produira davantage de matières sèches par tonne de pâte produite. Le lot 4 bis, est le moins bien placé, le pouvoir calorifique de sa liqueur noire est le plus faible de tous, et de plus, il produit plus de matières sèches, ceci est lié à son faible rendement et à son fort besoin en alcali actif.

Les pâtes obtenues avec les lots 3 et 4 sont celles qui donnent les meilleures caractéristiques papetières (éclatement et résistance à la compression). On peut classer ensuite, dans l'ordre les

pâtes des lots 2, et 1, et encore une fois le lot 4 bis se positionne en retrait par rapport aux autres lots. Si l'on intègre la notion de $4C + E$, qui combine l'indice d'éclatement et le poids au m^2 du papier, et compte tenu des rendements, les lots 1, 2, 3, et 4 nécessiteront une consommation en bois très voisine, en revanche le lot 4 bis nécessitera davantage de bois.

B) Références citées dans le texte

1. Baillère H., 1994, Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'eucalyptus (Pointe Noire, Congo): hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques. Thèse Université de Bordeaux I, 162 p.
2. Baillères H., 1994. *Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'Eucalyptus (Pointe Noire-Congo) : hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques*. Thèse de doctorat en Sciences du bois, Université de Bordeaux I. 121 p.
3. Baillères H., Chanson B., Fournier-Djimbi M., 1997. *Plantations d'arbres à croissance rapide et qualité des produits forestiers sous les tropiques*. XI Congrès forestier mondial, Octobre 1997. Antalya, Turquie. Vol 3, Thème 12 pp : 54 – 62.
4. Baillères H., Verhaegen D., Gion J.M., Grima-Pettenati J., Plomion C., Rozenberg P., Chantre G., Ham-Pichavant F., Pardon P., Doignie J.C., 2000. *Introducing biotechnology to improve the selection efficiency of wood quality traits in Eucalyptus : description of a French research project*. Proceedings of the First IUFRO Workshop : The futur of Eucalypts for wood products. Country Club Casino, Launceston, Tasmania, 19-24 March 2000.p. 271-282.
5. Bruce A., Gao H.Y., 1994, S+ Wavelets User's Manual, Version 1.0, Seattle: StatSci, a division of MathSoft, Inc.
6. Chudnoff M., 1961. *The physical and mechanical properties of Eucalyptus camaldulensis*. Israelian Journal of Forestry Research 66, 39p.
7. Cornelius, J. , 1994, Heritabilities and additive genetic coefficients of variation in forest trees. Canadian Journal of Forest Research. 24: p. 372-379.
8. Downes G.M., Hudson I.L., Raymond C.A., Dean G.H., Michell A.J., Schmileck L.R., Evans R., Muneri A., 1997. *Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties*. CSIRO publishing. 132 p.
9. FAO, 1980. *Amélioration génétique des arbres forestiers*. Etude FAO Forêts (20), compte rendu du cours de formation FAO/DANIDA sur l'amélioration génétique des arbres forestiers. Pp :193 p.
10. Gérard J., 1994. *Contraintes de croissance, variations internes de densité et de module d'élasticité longitudinal, et déformations de sciage chez les eucalyptus de plantation*. Thèse de Doctorat en Sciences du bois, Université de Bordeaux I. 149 p.
11. Gibson L.J., Ashby M.F., 1999. *Cellular solids : structure and properties*. Cambridge Solid State Science Series. 510p.
12. Girosi F., 1998. *An equivalence between sparse approximation and support vector machines*. Neural Computation, 10 (6) : 1455 – 1480.
13. Grattapaglia D., Bertolucci F.L.G., Penchel R., Sederoff R., 1996. *Genetic mapping of quantitative trait loci controlling growth and wood quality traits in Eucalyptus grandis using a maternal half-sib family and RAPD markers*. Genetics, 144 : 1205 - 1214.
14. Groover A., Devey M., Fiddler T., Lee J., Megraw R., Mitchel-Olds T., Sherman B., Vujcic S., Williams C., Neale D., 1994. *Identification of quantitative trait loci influencing wood specific gravity in an outbred pedigree of loblolly pine*. Genetics, 138 :1293 - 1300.
15. Hans A.S., Burley J., Williamson P., 1972. *Wood quality in Eucalyptus grandis (Hill) Maiden, grown in Zambia*. Holzforschung, 26 : 138 - 141.
16. Hansen, C., 1994. *Analysis and solution of discrete ill posed problems*. Numerical Algorithms, 6 : 1 – 35.
17. Helinska-Rackowska L., Fabisiac E., 1999. *Radial variation of earlywood vessel lumen diameter as an indicator of the juvenile growth period in ash (Fraxinus excelsior L.)*. Holz als Roh- und Werkstoff, 57 : 283 – 286.
18. Keller R., 1994. *La constitution du bois* in Le bois matériau d'ingénierie. ARBOLOR Nancy, pp.13 – 51.
19. Kucera B., 1994. *A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce*. Wood and fiber science, 26(1) : 152 - 167.

20. Kumar S., Spelman R.J., Garrick D.J., Richardson T.E., Lausberg M., Wilcox P.L., 2000. *Multiple-marker mapping of wood density loci in an outbred pedigree of radiata pine*. Theoretical and Applied Genetics, 100 : 926 - 933.
21. Kuramoto N., Kondo T., Fujisawa Y., Nakata R., Hayashi E., Goto Y., 2000. *Detection of quantitative trait loci for wood strength in Cryptomeria japonica*. Journal of Forestry Research, 30 : 1525 - 1533.
22. Laghdir, 2000. Modélisation de la fissuration en bout de grumes liée aux contraintes de croissance Applications aux eucalyptus. Thèse de doctorat en mécanique. Université de Montpellier 2. 175 p.
23. Malan F.S., 1988. *Genetic variation in some growth properties among 18 full-sib families of South African grown Eucalyptus grandis : a preliminary investigation*. South African Forestry Journal 146 : 38 - 43.
24. Malan F.S., 1988. *Wood density variation in four trees of South African grown Eucalyptus grandis (Hill ex Maiden)*. South African Forestry Journal 144 : 36 - 42.
25. Megraw R.A., 1985. *Wood quality factors in Loblolly Pine. The influence of tree age, position in tree, and cultural practice on wood specific gravity, fiber length, and fibril angle*. TAPPI Presser Atlanta. 88 p.
26. Nanson A., 1980. *Le point sur l'amélioration des arbres forestiers*. Annales de Gembloux, 86 : 153 - 171.
27. Nepveu G. 1991. *La variabilité du bois*. INRA Centre de recherche forestière de Nancy Champenoux, 31 p.
28. P. Rozenberg, A. Franc, C. Mamdy, J. Launay, N. Schermann, J.C. Bastien, 1999, Stiffness of standing Douglas fir and genetic effect: from the standing stem to the standardized wood sample, relationships between modulus of elasticity and wood density parameters. Part II. Annals of Forest Science 56 145-154.
29. P. Rozenberg, A. Franc, G. Chantre, V. Baonza, 2001, Indirect genetic selection of end-products wood properties: a method suitable for both tropical and temperate forest trees, Southern African Forestry Journal - N° 190, March 2001, p. 99-104.
30. P. Rozenberg, A. Trubuil, A. Franc, 1997, Un exemple de l'utilisation des ondelettes : relation rigidité du bois-paramètres microdensitométriques, l'éditeur de Liens, Direction Informatique, INRA, Paris.
31. Plomion C., 2000. *Cartographie génétique chez les végétaux et utilisation des cartes de liaison*. <http://www.pierroton.inra.fr/genetics/cartogil/>
32. Purnell R.C., 1988. *Variation in wood properties of Eucalyptus nitens in a provenance trial on the Eastern transvaal highveld in South Africa*. South African Forestry Journal, 144 : 10 - 22.
33. Sewell M.M., Bassoni D.L., Megraw R.A., Wheeler N.C., Neale D.B., 2000. *Identification of QTLs influencing wood property traits in loblolly pine (Pinus taeda L.) I. Physical wood properties*. Theoretical and Applied Genetics, 101 : 1273 - 1281.
34. Skolmen R.G., 1972. *Specific gravity variation in robusta eucalyptus*. USDA Forest Service research paper, 7 p.
35. Tikhonov A.N., Arsenin V.Y., 1977. *Solutions of ill posed problems*. Scripta Series in Mathematics, John Willey Sons, New York.
36. Verhaegen D., Plomion C., Gion J.M., Poitel M., Costa P., Kremer A., 1996. *Quantitative trait dissection analysis in Eucalyptus using RAPD markers : 1. Detection of QTL in interspecific hybrid progeny, stability of QTL expression across different ages*. Theoretical and Applied Genetics, 95 : 597 - 608.
37. Vigneron, P., 1991. *Création et amélioration de variétés d'hybrides d'Eucalyptus au Congo*. In : IUFRO Symp « Intensive Forestry : the role of Eucalyptus ». Durban, South Africa. pp : 345 - 360.
38. Zobel B.J., 1985. *Juvenile wood in tropical forest plantations : its characteristics and effect on the final product*. Camcore Bulletin on tropical forestry, 2 : 1 - 1.
39. Zobel B.J., Van Buijtenen J.P., 1989. *Wood variation, its causes and control*. Springer Verlag Budapest, 363 p.
40. Zobel B.J., Jett J.B., 1995. *Genetics of wood production*. Springer Verlag Budapest, 2

C/ Dissémination des résultats de la recherche

Publications

- Plomion C (2000) La sélection assistée par marqueurs chez les arbres forestiers. Biofutur 199 :26-27
- Cervera MT, Plomion C, Malpica C (2000) Molecular markers and genome mapping in woody plants. In : Jain SM and Minocha SC (eds), Molecular Biology of Woody Plants, Volume 1, Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp375-394
- Plomion C, Raffin A, Brach J, Frigerio J-M, Pastuszka P, Kremer A (2000) Déterminisme génétique et moléculaire de la qualité du bois chez le pin maritime. Vème colloque ARBORA « De la forêt cultivée à l'industrie de demain », Propriétés et usages du pin maritime p85-90
- Chagné D, Lalanne C, Madur D, Kumar S, Frigerio J-M, Krier C, Decroocq S, Savouré A, Bou Dagher-Kharrat M, Bertocchi E, Brach J, Plomion C (2001) A high density linkage map of *Pinus pinaster* based on AFLPs. *Ann For Sci* (sous presse)
- Pot D, Chantre G, Rozenberg P, Rodrigues JC, Plomion C (2001) Mapping QTLs for pulp and timber properties in maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). en préparation
- Rozenberg P., A. Franc, C. Cahalan, 2001, Incorporating Wood Density in Breeding Programs for Softwoods in Europe: a Strategy, and Associated Methods, *Silvae Genetica*, 50, 1, 1-7.
- Rozenberg P., A. Franc, G. Chantre, V. Baonza, 2001, Indirect genetic selection of end-products wood properties: a method suitable for both tropical and temperate forest trees, *Southern African Forestry Journal* - N° 190, March 2001, p. 99-104.
- Gion J.M, Boudet C, Grima-Pettenati J, Ham Pichavant F, Plomion C, Baillères H, Verhaegen D (2001) A candidate genes approach identifies CCR, PAL and C4H as loci for Syringyl / Guaiacyl ratio in a interspecific hybrid between *E.urophylla* and *E. grandis*. Proceeding IUFRO Desarrolando el eucalipto del futuro 10-15 septembre Chili
- Baillères H, Verhaegen D, Gion Jm, Grima-Pettenati J, Plomion C, Rozenberg P, Chantre G, Ham-Pichavant F, Pardon P, Doignie Jc (2000) Introducing biotechnology to improve the selection efficiency of wood quality traits in eucalyptus: description of a French research project. In: Proceedings of an IUFRO Conference "the Future of Eucalypts for Wood Products". FIAT, Hobart, Tasmania, Australia 19--24 March 2000. Launceston, Tasmania, Australia, pp 271—282
- Henri Baillères, Fabrice Davrieux, Frédérique Ham-Pichavant (2002) Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus breeding program. *Annals of Forest Science* (soumis)
- Henri Baillères, Olivier Vitrac, Tahiana Ramanantoandro : Assessment of continuous distribution of wood properties from a low number of samples: application to the variability of wood modulus of elasticity between trees and within tree (en préparation)
- Délisée C., Jeulin D., Michaud F., 2001 : Caractérisation morphologique et porosité en 3D de matériaux fibreux cellulosiques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 329, Série II b, pp 179-185, 2001.
- Bos F., Castéra P., Bastet E., 1999, Conception de panneaux de grandes particules, *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, Vol.9, N° hors série « Les composites à base de bois » : 87-106

- P. Castéra et F. Bos *Probabilistic damage models for wood based panels* Application of Statistics and Probability – Civil engineering reliability and risk analysis, Ed. Melchers & Stewart, 2000, Balkema : 273-278.

Présentations orales

- Chagné D, Chaumeil P, Madur D, Lalanne C, Brown G, Neale D, Echt C, Plomion C (2001) Contribution of maritime pine for comparative mapping in conifers. Wood Breeding and Biotechnology Conference, Bordeaux 11-14 June, 2001
- Pot D, Chantre G, Rozenberg P, Rodrigues JC, Rosner S, Grabner M, Hannrup B, Cahalan C, Plomion C (2001) Genetic determinism of wood and end-uses properties in maritime pine. Wood Breeding and Biotechnology Conference, Bordeaux 11-14 June, 2001
- Baillères H., Verhaegen D., Gion J.M. Grima-Pettenati J., Plomion C., Rozenberg P., Chantre, G. Ham-Pichavant F., Pardon P., Doignié J.C, 2000, Introducing biotechnology to improve the selection efficiency of wood quality traits in Eucalyptus: description of a French research project. Proceedings of the First IUFRO Workshop : The futur of Eucalypts for wood products. Country Club Casino, Launceston, Tasmania, 19-24 March 2000.p. 271-282.
- Rozenberg P., Franc A., Cahalan C., 2000, Incorporating Wood Density in Breeding Programs for Softwoods in Europe, XXI IUFRO World Congress "Forest and Society: The role of Research", 7-12 August 2000, Kuala-Lumpur, Malaysia.
- Rozenberg P., Franc A., Chantre G., Baonza V., 2000, Indirect Genetic Selection for End-Products Wood Properties: a Method Suitable for Both Tropical and Temperate Softwoods, in proceedings IUFRO "Forest genetics for the next millennium" conference, 9-13 October 2000, Durban, South Africa.
- Gion J.M, Boudet C, Grima-Pettenati J, Ham Pichavant F, Plomion C, Baillères H, Verhaegen D (2001) A candidate genes approach identifies CCR, PAL and C4H as loci for Syringyl / Guaiacyl ratio in a interspecific hybrid between *E.urophylla* and *E. grandis*. Wood Breeding and Biotechnology Conference, Bordeaux 11-14 June, 2001
- Henri Bailleres, Fabrice Davrieux, Sébastien Allesfredre, Fédérique Ham-Pichavant, 2001 : Near Infrared Analysis As A Rapid Screening Tool For Some Major Wood Characteristics In Eucalyptus. International conference "Wood, Breeding, Biotechnology and industrial expectation". June 11-14 2001, La cité mondiale, Bordeaux France.
- H. Bailleres, F. Davrieux, S. Allefredre, F. Ham-Pichavant, J. Garcia, 2001 : Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus., IUFRO International Symposium, Developing The Eucalypt Of The Future. Valdivia, Chile, 10 - 15 September, 2001.
- Grima-Pettenati J, P Rech; E.Lacombe, V. Lauvergeat, P Sivadon, C Guez, D Verhaegen, J M Gion, C Plomion. Wood formation in Eucalyptus with emphasis on lignin biosynthesis. Tree Biotechnology in the new millenium IUFRO/Molecular biology of trees 22/27 july 2001, Columbia River Gorge, USA
- Grima-Pettenati J, P Rech; C Guez, D Verhaegen, J M Gion, C Plomion. Wood formation in Eucalyptus with emphasis on lignin biosynthesis. French-Japanese Workshop; Cell wall components, structure, engineering and practical exploitation, 7/9 September 2001, Toulouse (France)
- Thieule, JM, Guillemain A., Rodrigues J.C., Lloyd Jones G., Cahalan C., Chantre G. « Application of NIRS to the prediction and the analysis of chemical wood components and paper properties » 11ème congrès ISWPC Nice, 11-14 juin 2001

- Chantre G., Sabbagh P., Rodrigues J.C., Guillemain A. « Application of mid and near infra-red spectroscopy to the prediction and the analysis of the variability of the wood papermaking potential within maritime pine (pinus pinaster) : pulping yield, chemical wood components and paper properties » TAPPI Pulping Conference, Seattle 4-7 novembre 2001, Proc.
- Castéra P., Jeulin D., Bos F., Michaud F., Délisée C., 2000 : On the role of microstructural morphology on the macroscopic properties of cellulosic fibrous materials. Proceedings of the International Conference on Wood and Wood Fiber Composites, pp 481-492, Stuttgart, Germany, avril 2000.
- Délisée C., Jeulin D., Michaud F., Bos F., Castéra P., 2001 : Models of random networks for simulating cellulosic fibrous materials. Image Anal Stereol, 20 (Suppl 1), pp 408-413. Proc 8thECS and Image Analysis, Bordeaux, September 4-7, 2001.
- Michaud F., Jeulin D., Délisée C., Bos F., 2000 : Analyse morphologique et porosité de matériaux fibreux celluloseux. Comptes rendus des 12èmes Journées Nationales des Composites, pp 449-558, Cachan, novembre 2000.
- Castéra P., Faessel M., Bos F., Délisée C., 2000 : Rhéologie à haute température de mélanges bois/thermoplastique. Comptes rendus des 12èmes Journées Nationales des Composites, pp 1145-1152, Cachan, novembre 2000.

Posters

- Pot D, Rodrigues JC, Chantre G, Cahalan C, Plomion C (2001) Genetic determinism of lignin content in maritime pine and breeding implications. Wood Breeding and Biotechnology Conference, Bordeaux 11-14 June, 2001
- Plomion C, Cahalan C, Canovas F, Chagne D, Chantre G, Dubos C, Feveireiro P, Frigerio JM, Grabner M, Hofte H, Lelu MA, Le Provost G, Mouret JF, Pereira H, Pichavant F, Pot D, Rozenberg P (2001) Genetic and molecular determinism of wood quality in Maritime pine. Wood Breeding and Biotechnology Conference, Bordeaux 11-14 June, 2001
- Bailleres H., Davrieux F., Ham-Pichavant F., 2000 Near Infrared analysis as a rapid screening tool for some major wood characteristics in Eucalyptus. Poster presented at the XXI IUFRO World Congress Malaysia, 7-12 August, 2000.
- Gion J-M, Rech P, Grima-Pettenati J, Verhaegen D, Plomion C. Mapping genes of the biosynthetic pathway of lignins in Eucalypts. New frontiers in Plant Science and Plant Biotechnology 5/9 march 2000, Toulouse, labège France

Etudiants ayant travaillé dans le cadre du projet

- **David Chagné**, 2000, **DEA**, Université Nancy I. Contribution à la cartographie comparée chez les conifères, 20p
- **Catherine Krier**, 1999, 2000 **BTS**, Cartographie génétique chez le pin maritime utilisant des marqueurs RAPD et AFLP, 29p
- **Philippe Chaumeil**, 2001, **DEA**, Université Nancy I. Développement de marqueurs hypervariables (microsatellites) chez le pin maritime et applications en génétique, 20p
- **David Pot**, thèse en cours, ENSA de Rennes. Déterminisme génétique de la qualité du bois chez le pin maritime et mise au point d'outils de sélection.
- **David Chagne**, thèse en cours, Université de Nancy I. Etablissement d'une carte génétique « fonctionnelle » chez le pin maritime et cartographie génétique comparée chez les conifères.

- **Christine Boudet**, 2000, **DESS** Productivité Végétale Paris 7, Approche gènes candidats fonctionnels appliquée à la voie de biosynthèse des lignines dans un croisement entre *E. urophylla* et *E. grandis*. 37p.
- **Jean Marc Gion** 2001, **Thèse** de l'Université de Rennes I, Etude de l'architecture génétique de caractères quantitatifs chez l'*Eucalyptus* : des marqueurs anonymes aux gènes candidats. 130p.
- **Francine Boyer**, 2001, **DESS** Productivité Végétale Paris 7, Conversion de marqueurs RAPD en marqueurs SCAR, dans un croisement *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. 40p.
- **Allefresde Sébastien**, 2001 : Estimation des propriétés physiques du bois d'eucalyptus par spectrophotométrie proche infrarouge. Application à la sélection génétique. **Licence professionnelle** « Elaboration et Technologie des Matériaux Polymères Organiques ».
- **Ramanantoandro Tahiana**, 2001, **DEA**, Prise en compte des caractéristiques technologiques du bois dans les méthodes d'amélioration génétique : application aux eucalyptus tropicaux.
- **Laghdir Azziz**, 2000. **Thèse** de doctorat en mécanique. Université de Montpellier 2. Modélisation de la fissuration en bout de grumes liée aux contraintes de croissance Applications aux eucalyptus. 175 p.
- **Etienne Paux**, thèse en cours, Université de Toulouse III - Développement d'une approche de génomique fonctionnelle pour la recherche de nouveaux gènes impliqués dans la qualité du bois chez l'*Eucalyptus*
- **Franck Michaud**, 1999, **DEA**, Université Bordeaux 1. Caractéristiques morphologiques et mécaniques de panneaux de fibres de bois.
- **Mathieu Faessel**, **Thèse** en cours, Université Bordeaux 1. Modélisation de la structure et des propriétés de matériaux fibreux cellulosiques.

Autres activités de dissémination de résultats :

- Organisation d'une conférence internationale à Bordeaux en juin 2001 auquel les partenaires du projet « biotech » ont participé
- Un site web a été ouvert pour présenter le projet, accessible à l'URL : http://www.pierroton.inra.fr/MENRT_lignine. Il accueillera les bases de données pin et eucalyptus (accessible avec login et mot de passe).
- Contribution à l'alimentation de banques de biomolécules (EMBL, genbank) : **X65631 ; X79566 ; X74814 ; AJ244010 ; Y12228 ; AJ249093**

Fiche signalétique

I- IDENTIFICATION

Décision n°98C0202, 98C0203, 98C0204,
98C0205, 98C0206, 98C0207

Montant : 2 027 000 FTTC

Date de notification

Durée : 36 mois

Objet de la décision : UTILISATION DES GENES DE LA LIGNIFICATION POUR L'AMELIORATION GENETIQUE DE LA QUALITE BIOCHIMIQUE ET TECHNOLOGIQUE DU BOIS EN VUE D'UNE UTILISATION OPTIMALE POUR LA PRODUCTION DE PATE ET DE PANNEAUX.

Mots clefs : **Génétique, Qualité du bois, Lignification, Industrie de la trituration, Pin maritime, Eucalyptus**

Nom du responsable scientifique : **Christophe Plomion**

Adresse : **INRA BP45 33611 Gazinet Cestas Cédex**
Tél. **05 57 97 90 76**
Fax. **05 57 97 90 88**
Email : **plomion@pierroton.inra.fr**

II- CONFIDENTIALITE

Les documents fournis ont-ils un caractère de confidentialité ?

NON

III- RESUME SIGNALITIQUE

Ce projet a permis de mettre au point des méthodes d'analyse rapides de nombreuses composantes chimiques, anatomiques, technologiques et rhéologiques de la qualité du bois du pin maritime et de l'eucalyptus, d'étudier la variabilité génétique de ces caractères, et de montrer qu'elle avait une répercussion au niveau industriel. L'utilisation à grande échelle de ces méthodes a permis de localiser les zones chromosomiques impliquées dans le contrôle de la qualité du bois chez ces deux espèces, via une approche de cartographie génétique. D'un point de vu plus cognitif, nous avons pu tester l'hypothèse que la position de certains QTL correspondait à celle de gènes « candidats » impliqués dans la voie de biosynthèse des lignines. Ces résultats devraient permettre de mettre en place des programmes d'amélioration génétique de la qualité du bois chez ces deux espèces, qu'ils soient basés sur des critères phénotypiques ou combinés à des marqueurs moléculaires.

IV COMPTE RENDU

P1 : AFOCEL

P2 : CIRAD

Composante génétique

Pour le CIRAD, le programme d'amélioration génétique des *Eucalyptus* au Congo vise à créer des variétés productives pour la production de pâte à papier. Jusqu'à présent, la sélection ne prenait pas en compte les caractères de qualité du bois qui sont difficiles à mesurer. Les premières recherches développées avec les marqueurs moléculaires ont mis en évidence la possibilité d'utiliser des techniques de cartographie génétique pour rechercher les régions du génome impliquées dans les caractères de croissance des arbres. L'objectif visé dans ce projet était d'identifier les zones chromosomiques qui contrôlent la qualité du bois d'*Eucalyptus* afin d'obtenir des marqueurs utilisables dans le programme d'amélioration génétique.

Les gènes étudiés ont été positionnés sur les cartes génétiques existantes et l'homologie entre les groupes de liaison d'*E. urophylla* et d'*E. grandis* a ainsi été confirmée. L'absence de liaison forte entre les gènes de la voie de biosynthèse des lignines et l'hétérozygotie élevée observée dans notre croisement laisse espérer une utilisation possible du marquage moléculaire dans le programme d'amélioration génétique pour la sélection de clones. La colocalisation des gènes et des QTLs met en évidence les effets directs des gènes sur les différentes variables liées aux quantités et aux qualités des lignines. Ces résultats restent cohérents avec les travaux de transformation génétique. L'approche gène candidat développée dans ce projet représente donc bien une alternative aux travaux de transformation génétique pour valider les effets des gènes. L'effet de certains gènes est si fort qu'il est possible de sélectionner dans notre croisement des arbres avec un rapport en monolignols S/G modifié par rapport à la moyenne des *Eucalyptus* du Congo. Ces résultats sur la qualité des bois de plantation associés aux résultats de croissance des arbres et aux données d'aptitude au

bouturage (en cours) vont permettre de sélectionner quelques clones performants dans notre famille de 200 hybrides interspécifiques. Ces résultats présentés à différents congrès ont permis au CIRAD de développer une nouvelle coopération scientifique avec l'Université de Tasmanie et de développer une coopération technique avec la recherche en Afrique du Sud.

Composante qualité du bois

Les espèces du genre *Eucalyptus* exploitées en culture intensive sont en règle générale valorisée par les industries de trituration. Cependant le potentiel technologique et commerciale de certains génotypes oriente le marché vers une production de plus en plus significative de bois de service et de bois d'œuvre. En conséquence la diversité des usages implique une sélection génétique basée sur de nombreux critères technologiques d'intérêt industriel du domaine de la morphologie, de la chimie, de la physique et de la mécanique. L'étude conduite dans le cadre du projet a donc consisté à caractériser des propriétés technologiques d'intérêt selon quatre phases

1. Échantillonnage : définition d'un protocole d'échantillonnage adapté à la caractérisation de chaque arbre
2. Exploratoire : détermination sur un sous-échantillon des propriétés pertinentes pour le typage systématique des arbres du plan d'expérience
3. Méthodologique : développement et analyse d'une méthode d'estimation rapide, non destructive et peu coûteuse des caractéristiques physico-chimiques du bois
4. Typage de tous les individus du plan d'expérience.

L'échantillon de 204 arbres provenant d'une famille hybride de plein frères a permis d'identifier les propriétés les plus intéressantes pour le typage de tous les individus : contraintes de croissance, fentes en bout, densité, module d'élasticité, taux d'extrait, taux de lignines, proportion relative des monomères de lignines. Parallèlement une méthode d'évaluation rapide basée sur la spectrophotométrie proche infrarouge a été développée et analysée afin de permettre un typage plus rapide et/ou plus précis de chaque individu. Les résultats obtenus prouvent l'intérêt de ce type d'approche en génétique quantitative où un très grand nombre de données phénotypiques sont nécessaires.

Compte tenu de la forte variabilité intra-arbre des propriétés du bois une nouvelle approche non déterministe et non paramétrique a été utilisée pour interpréter les mesures intra-arbre, issues des 1161 éprouvettes prélevées, sous la forme de distributions continues et régulières dans le temps et dans l'espace. Les résultats montrent que la variabilité intra-arbre et notamment la variation radiale des propriétés est 3 fois supérieure à la variabilité inter-arbres. Ce dernier résultat justifie la prise en compte des contraintes de variabilité internes des propriétés technologiques dans les programmes d'amélioration génétique. L'étude de la distribution continue d'autres propriétés technologiques telles que le retrait au séchage n'a pas été réalisée par manque de temps et de disponibilité des moyens. En effet le développement des méthodes de calibrations et leur validation a nécessité plus temps que prévu car ce travail n'a à notre connaissance jamais été entrepris. Une longue phase de mise au point était donc nécessaire. L'équation de calibration obtenue pour le retrait tangentiel en fin de projet nous permet de caractériser l'ensemble des échantillons. Cette opération sera réalisée dans les prochains mois en même temps que les dosages des sucres afin de compléter la banque de données technologiques tout à fait originale qui sera très utile pour les travaux futurs que nous conduirons avec nos partenaires du projet. Les analyses des distributions radiales feront l'objet d'un partenariat scientifique avec l'INRA d'Orléans où des méthodes d'analyses complémentaires sont développées. L'utilisation de la SPIR fait déjà l'objet d'une coopération scientifique avec l'équipe du CNRS de Toulouse.

P3 : CNRS

Dans ce projet, l'objectif du partenaire UPS/CNRS était de fournir des séquences de gènes candidats pour la qualité du bois chez l'Eucalyptus. Ainsi la plupart des séquences des gènes de la biosynthèse des lignines a pu être obtenue et cartographiée par le CIRAD. Les résultats de colocalisation de certains de ces gènes avec des QTLs d'intérêt sont encourageants car en bonne adéquation avec les résultats obtenus par transgénèse. Au cours de la réalisation de ce projet, l'évolution de nos travaux au laboratoire ainsi que les nouvelles données bibliographique nous ont conduit à élargir la palette de gènes candidats et à nous intéresser, en plus des gènes de structure, à des gènes régulateurs, et en particulier, à des facteurs de transcription MYB exprimés dans le xylème. Les résultats de cartographie suggèrent que ces gènes jouent un rôle dans la qualité du bois, rôle que nous essayons de confirmer au laboratoire par sur/sous-expression de ces gènes *in planta*.

Les résultats prometteurs obtenus au cours de ce projet nous ont conduit à poursuivre nos recherches de gènes candidats à plus grande échelle i.e. en développant une approche de génomique fonctionnelle dans le cadre d'une collaboration technique et scientifique avec le CIRAD, et des industriels de la pâte à papier (ENCE, Espagne et RAIZ, Portugal). Cette collaboration a permis d'élaborer un projet Européen sur la qualité du bois chez l'Eucalyptus (soumis à l'appel d'offres d'octobre 01).

P4 : INRA

Trois labos INRA participaient à ce projet :

INRA Orléans

L'INRA Orléans a réalisé des analyses microdensitométriques sur 200 échantillons de pin maritime et 200 échantillons d'eucalyptus. Les données ont été, d'une part mises à la disposition des partenaires du projet, d'autres part analysées afin d'extraire de ces profils microdensitométriques des données pertinentes du point de vue de la recherche de variabilité, de l'introduction de données climatiques dans des modèles génétiques et de relations densité – propriétés mécaniques du bois. Les résultats ont mis en évidence :

1. qu'il était possible de trouver des variables de densité beaucoup plus variables que la densité moyenne ;
2. que les variations de la densité du bois considérées simultanément à tous les niveaux, depuis le niveau intra-cerne jusqu'au niveau inter-arbres et inter-clones, pouvaient être abordées simultanément en termes de variations génétiques et environnementales (entre et à l'intérieur des saisons de végétations)
3. que la prise en compte de la variabilité intra-arbre de la densité du bois pouvait améliorer la description des relations densité- propriétés mécaniques du bois.

Ces résultats ont été rendus possible grâce développement de nouvelles collaborations, en particulier au sein de l'INRA entre les équipes de Bordeaux et d'Orléans, et entre INRA Orléans et CIRAD Forêts Montpellier, équipe bois et équipe génétique des arbres forestiers.

INRA Pierroton

L'équipe de l'INRA de Pierroton se focalisait sur le pin maritime et avait la charge : (1) de fournir le matériel végétal aux autres partenaires (rondelles de bois) pour l'ensemble des arbres d'une famille de cartographie, soit 2002 arbres, (2) de construire les cartes génétiques des deux parents de cette famille, (3) de cloner et séquencer les gènes de la lignification, (4) de les positionner sur les cartes génétiques, (5) et de localiser sur les cartes génétiques des

QTL de nombreux caractères liés à la qualité du bois mesurés par les partenaires du projet. Ces objectifs ont dans l'ensemble été réalisés, seulement pour partie pour ce qui est de la localisation des gènes candidats par manque de polymorphisme dans le pedigree étudié. Une quarantaine de marqueurs orthologues (localisés sur des cartes d'autres espèces de conifères) ont cependant été localisés. Ceux-ci permettront de prédire la localisation des gènes candidats par comparaison avec leur position dans d'autres cartes génétiques de conifères. Ce projet de recherches a mobilisé 2 DEA ainsi que deux thèses (en cours). A côté des liens forts qui ont pu s'établir entre les partenaires dans le cadre de ce projet, d'autres collaborations avec l'AFOCEL et l'INRA d'Orléans se sont concrétisées par la participation à un projet européen GENIALITY (4^{ème} PCRD) et la coordination par l'INRA de Pierroton d'un projet européen GEMINI (5^{ème} PCRD :). Un troisième projet portant sur l'étude des corrélations juvénile x adulte des composantes de la qualité du bois à été soumis à l'UE à l'appel d'offre d'octobre 2001. Nous avons ainsi pu insérer progressivement le pin maritime dans la dynamique de la recherche européenne sur la qualité du bois, pour en arriver à l'imposer parmi les espèces « modèles » chez les conifères.

Composante INRA du LRBB

L'enjeu des recherches menées au LRBB était de montrer en quoi l'amélioration génétique de la qualité des fibres peut ou non modifier les propriétés de panneaux de particules ou de fibres de Pin maritime. Pour cela, l'objectif principal de cette étude était de mettre au point des outils expérimentaux et des modèles théoriques permettant d'explorer les relations entre la structure de panneaux élaborés dans des conditions contrôlées et leurs propriétés mécaniques. Cette phase s'est avérée plus importante que nous l'avions prévu, et ne nous a pas permis de mettre en œuvre la seconde partie de l'étude (SAR4.6), qui consistait à étudier la variabilité des propriétés de panneaux expérimentaux issus de 200 arbres.

L'étude s'est déroulée en deux étapes : la première a consisté à étudier les propriétés de panneaux expérimentaux issus de plaquettes déroulées à partir de 20 rondelles contrastées du point de vue des profils densitométriques ; la seconde étape consistait à développer des outils de modélisation de la structure et des propriétés multi-échelles de panneaux de fibres élaborés en laboratoire.

Les résultats montrent que la variabilité mesurée sur les 20 rondelles se traduit par une dispersion des propriétés mécaniques des plaquettes issues de déroulage, au niveau du bois initial et du bois final. Différentes configurations de panneaux ont été étudiées (aléatoire, orienté, stratifié) : même si l'effet de la configuration reste prédominant, les propriétés mécaniques des plaquettes ont une influence quantifiable sur le comportement mécanique. Des modèles d'homogénéisation classiques, prenant en compte le comportement de la colle, permettent de décrire les résultats observés.

En ce qui concerne les panneaux de fibres, on a montré que deux échelles, celle de la fibre et celle du réseau fibreux, sont importantes, et sont fortement influencées par le procédé d'élaboration. Les principaux déterminants du comportement mécanique sont : la densité du panneau, l'architecture fibreuse, les propriétés de surface des fibres encollées. On peut penser, mais cela n'a pas pu être montré, que l'effet d'une amélioration génétique pourrait porter sur les propriétés d'adhésion et la transformation chimique à haute température de la fibre.

Différentes collaborations ont été initiées dans le cadre de ce projet : avec le CERMAV, l'EFPG, le Centre des Matériaux et le CMM de l'ENSM. Des outils d'analyse d'image ont été développés pour ces matériaux, et nous avons par ailleurs acquis un savoir faire en morphologie mathématique.

Enfin, deux thèses ont été initiées à la suite, ou pendant, ces travaux.

P5 : Institut du Pin – Université Bordeaux I

La lignine est un polymère qualitativement variable en fonction de sa composition en monomères qui diffère selon leur degré de méthylation (OCH_3) : le para-hydroxyphenyl (H) ne comporte pas de groupement (OCH_3), alors que le guaiacyl (G) et le syringyl (S) en comportent respectivement 1 et 2. La lignine des gymnospermes (Pin Maritime) est majoritairement composée d'unités G et en proportion moindre d'unité H. La lignine des angiospermes (Eucalyptus) est elle surtout composée d'unités G et S. Au cours de la fabrication de pâte à papier, la délignification des bois durs est plus rapide. La vitesse de délignification est surtout liée à la nature chimique de la lignine et non à la quantité, elle est proportionnelle au rapport S/G. Il est donc intéressant d'identifier les gènes responsables lors de la lignification de la composition monomérique, afin de pouvoir éventuellement améliorer les espèces difficiles à cuire par les papetiers. Dans le cadre de ce projet de recherche interdisciplinaire, l'institut du Pin – Université Bordeaux I a une mission analytique. Nous devons mesurer les caractéristiques chimiques de la lignine sur deux espèces : Eucalyptus (~200 individus) et Pin Maritime (~200 individus) et fournir l'ensemble de nos données aux autres partenaires du projet. Dans un premier temps, nous avons comparé les méthodes d'analyse utilisées par les différents laboratoires et défini un protocole expérimental pour la préparation des échantillons : broyage extraction, etc. Ceci a été réalisé en partenariat avec le CIRAD forêt (partenaire 2). Nous avons mis en place au laboratoire la Thioacidolyse en analyse de routine, méthode d'analyse qui nous permet de définir la composition en monomères de la lignine. En parallèle, nous avons réalisé la synthèse des modèles O4 de lignine nécessaires à l'étalonnage régulier de la partie chromatographique de la Thioacidolyse. Dans un deuxième temps, nous avons réalisé l'analyse des lignines sur 193 individus d'Eucalyptus (Thioacidolyse + lignine de Klason) et pour 186 échantillons de Pin Maritime (Thioacidolyse)

P6 : SWRE

MNERT/Biotech Annexe

<i>Nom du gène</i>	<i>Pin maritime</i>		<i>Autre espèce (P.taeda)</i>		
	Fragment PCR génomique	EST	Gène	ARNm	EST
4 coumarate ligase (4cl)	3	5	1	1	9
Phenylalanine ammonia lyase (pal)	6	2	1	*	19
Cinnamyl alcool dehydrogenase (cad)	6	1	1 (P.radiata)	*	15
caffeic acid ortho- methyltransferase (comt)	4	1	1 (P.radiata)	1 (P.radiata)	8
Myb I	5				1
Myb II	6				2
cinnamoyl-CoA reductase (ccr)	0	3			1
caffeoyl-CoA O- methyltransferase (CCoAOMT)	0	5	1	1	23

disponible mais non utilisé dans l'alignement

4CL

Intron de Taeda en ROUGE ; Intron supplémentaire de Pinaster 1765-1854 en BLEU
 Seules les différences avec le gène de taeda apparaissent.

	801											
P.taeda gène	ATCTGTATTT	CCATTCCGAT	GACGTGATAC	TCTGTGTCTT	GCCTCTTTC	CACATCTATT	CTCTCAATTC	GGTTCTCCTC	TGCGCGCTCA	GAGCCGGGGC		
P.taeda ARNm	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster RS03G12	.....	.....	-G.AC..G..	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BG275445	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BG275438	.....	.....	.....	.....	.....	.....NN..	.....	.....	.....	.....
P.taeda BF220480	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BF169416	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	901											
P.taeda gène	TGCGACCTG	ATTATGCAGA	AATTCAACCT	CACGACCTGT	CTGGAGCTGA	TTCAGAAATA	CAAGGTTACC	GTTGCCCAA	TTGTGCCTCC	AATTGTCCTG		
P.taeda ARNm	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster RS03G12	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	G.....
P.taeda BG275445	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BG275438	.....	.....	.....	.....	.....	.....	...TN.....	.....	.....	.....
P.taeda BF220480	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BF169416	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BF186336	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BE656758	.....	.....	.....	.....T...	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda AW984914	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	1001											
P.taeda gène	GACATCACAA	AGAGCCCAT	CGTTTCCCAG	TACGATGTCT	CGTCCGTCCG	GATAATCATG	TCCGGCGCTG	CGCCTCTCGG	GAAGGAACTC	GAAGATGCC		
P.taeda ARNm	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster RS03G12	.....T.	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BG275445	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BG275438	T.....	.....	...N...C	.....	.....NNN	N.....	.....	.TNN.....	N.....	T.TNN.....
P.taeda BF220480	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....NN	.NNNNNN...	.....N
P.taeda BF169416	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	...NNN.NN	N.....NNN
P.taeda BF186336	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BE656758	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda AW984914	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	1101											
P.taeda gène	TCAGAGAGCG	TTTTCCAAG	GCCATCTTCG	GGCAGGTCAG	TAATCTTAAC	TTCCCTTTG	AAAACCTTA	AGAATGAAA	TTTATCTTAA	ATTTAGAAC		
P.taeda ARNm	.....	.....	.....T....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster RS03G12	.....	.....	.....T....	.A...----	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BG275445	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BG275438	...T.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BF220480	NN.....N	...NN.....	.....T....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BF169416	.....N	NNN.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BF186336	.....	.....	N.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BE656758	.....	.....	.....T....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda AW984914	.....	.....N	N.....T....	N.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
					-----INTRON-----							
	1501											
P.taeda gène	TCGTTTTTCT	TCCAATTACC	CTACCTAATT	TTGCATCTAA	CAGCCCGAAT	CGTTTAACTT	TTTCAGGGCT	ACGGCATGAC	AGAAGCAGGC	CCGGTGCTGG		
P.taeda ARNm	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster RS03G12	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....T
P.taeda BG275445	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....A.
P.taeda BF186336	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....NN	.....	
									.....NNNN	.....	

```

P.taeda BE656758 -----N.
P.taeda AW984914 -----N.

1601
P.taeda gène CAATGAACCT AGCCTTCGCA AAGAATCCTT TCCCCGTCAA ATCTGGCTCC TCGGGAACAG TCGTCCGGAA CGCTCAAATA AAGATCCTCG ATACAGAAAC
P.pinaster 4CL7 -----T....C..G..
P.pinaster 4CL11 -----T....C..G..
P.pinaster 4CL14 -----T....C..G..
P.taeda ARNm -----
P.pinaster RS03G12 -----T....C..G..
P.taeda BG275445 ..NNNN.T..
P.taeda BF186336 -----
P.taeda BE656758 -----NNN...
P.taeda AW984914 -----G -----NNN
P.taeda BF518234 -----N.....N N.....
P.taeda BF169470 -----

1701
P.taeda gène TGGCGAATCT CTCCCGCACA ATCAAGCCGG CGAAATCTGC ATCCGCGGAC CCGAAATAAT GAAAG-----
P.pinaster 4CL7 .....G... ..GTATG TTTTCTTTTA CCCTAAATCT TACCTGCCCT
P.pinaster 4CL11 .....G... ..GTATG TTTTCTTTTA CCCTAAACT TACCTGCCCT
P.pinaster 4CL14 .....G... ..GTATG TTTTCTTTTA CCCTAAACT TACCTGCCCT
P.taeda ARNm -----
P.pinaster RS03G12 .....G... -----
P.taeda BF186336 NNNNNN.... -----
P.taeda BE656758 .....G... .NNN..... ..NN ..NN..N...
P.taeda AW984914 .....NN..NNN ..NNN.....
P.taeda BF518234 -----
P.taeda BF169470 .....G... -----

1801
P.taeda gène -----GATATAT TAACGACCCG GAATCCACGG CCGCTACAAT CGATGAAGAA
P.pinaster 4CL7 TGTCCTGAAG CCTCTGTATT CTAAATATCT GACCCTAATG TCCGCCATTA AAG..C... ..T.....
P.pinaster 4CL11 TGTCCTGAAG CCTCTGTATT CTAAATATCT AACCCTAATG TCCGCCATTA AAG.....
P.pinaster 4CL14 TGTCCTGAAG CCTCTGTATT CTAAATATCT AACCCTAATG TCCGCCATTA AAG.....
P.taeda ARNm -----
P.pinaster RS03G12 -----
P.taeda BE656758 -----N.....NNN...
P.taeda AW984914 -----
P.taeda BF518234 -----
P.taeda BF169470 -----T.....

1901
P.taeda gène GGCTGGCTTC ACACAGGCGA CGTCGGGTAC ATTGACGATG ACGAAGAAAT CTTCATAGTC GACAGAGTAA AGGAGATTAT CAAATATAAG GGCTTCCAGG
P.pinaster 4CL7 .....C. ....
P.pinaster 4CL11 ..T....C. ....
P.pinaster 4CL14 ..T....C. ....
P.taeda ARNm -----AA...
P.pinaster RS03G12 ..T....C. ....
P.taeda BF518234 .....C. ....
P.taeda BF169470 .NN....C. ....

```

2001
P.taeda gène TACACCTCCA TTCCCTCTCT GCGGTAAAC TGCCTGTCGC ATTGTATTTT CAGTCATTTT CCGGGTTGTA ---CTTACAT TTGTTTGTC CAGGTGGCTCC
P.pinaster 4CL7C.....
P.pinaster 4CL11T.....C.....
P.pinaster 4CL14C.....
P.taeda ARNm
P.taeda BF518234
P.taeda BF169470

2101
P.taeda gène TGCTGAGCTG GAAGCTTTAC TTGTGGCTCA TCCGTCAATT GCTGACGCAG CAGTCGTTCC GTAAGTCCAC CTTCAGTAAT CAATGATGAC TCGATAATAT
P.pinaster 4CL7C.....
P.pinaster 4CL11C.....
P.pinaster 4CL14C.....GC.....-C...C.....C.....
P.taeda ARNm
P.taeda BF518234
P.taeda BF169470

2201
P.taeda gène TTCAGTCAGT TAAATAAATT AAATAATTTT TTTTGGTGG ATTGCCCAA -CACCATGGA ACTAAAGAGT T-CTAATTTT TAGGACATTA ATAGAGTACA
P.pinaster 4CL7N...N...GGGG.....A.....G.....T.C.....C.....
P.pinaster 4CL11-...-...A.....G.....T.C.....C.....
P.pinaster 4CL14CGC..C...-...C.....A.....G.....T.C.....C.....

2301
P.taeda gène TTATAATTTA CTTAGTGGTT TGGA----- ----GTGTTA A-----ATT TATTT----- ----A---- T-TATAATCT TGTTTCGTTT TCTTTAAATT
P.pinaster 4CL7 .G.G.GG.C.G .TA.AATTAT GTAG...AT NTGANAN... .N.TATAT GACAA.NNAT NT.....C.....A... .T.A...N
P.pinaster 4CL11T.C.G .TA.AATTAT TTAT..A..T .NNCCAC... .TATAT GACAC.CAAT .T.....C.....AN.. .T.....
P.pinaster 4CL14T.C.G .TA.GCTTAT TTAT..A..T ...CCAC... .TATAT GACAC.CCAT .T.....C.....A... .T.A.....

2401
P.taeda gène TTGTTAAAAA ATTATATGGC GATCATTTTC TCTATTAATA GTTAAAAATT TTGTTCAAAA TTATATCAGC ATCACTTTTT CTATTAATTA AACTAAATTT
P.pinaster 4CL7C....C....C.....C.....G.....T...C.....N...
P.pinaster 4CL11C....C....C.....C.....G.....G.T.....T...C.....N.N..
P.pinaster 4CL14C..N.....C....C.....G.....G.....T...C.....C.N..

2501
P.taeda gène ATATAAATA TAAAAA--- ---AATT-- -----C AAT-----
P.pinaster 4CL7ATC CAAG...TT TT.CCTTCAT CATAATTAAC AAAAAAAAT TACAGAATAA AAATAAAAAAT CACTTATAA...GTTAAAT
P.pinaster 4CL11C....ATC CAAG...TT TT.CCTTCAT CATAATTAAC AAANAAAAT TACAANATAA AAATNAAAAT CACTTATAA...GTTAAAT
P.pinaster 4CL14C....ATC CAAG...TT TTTCTTCAT CATAATTAAC AAAAAAATAA TACAAAATAA AAATAAAAAAT CACTTATAA...GTTAAAT

2601
P.taeda gène -----TA ACATTGTTAT TAATATGATG TTTTATTTAA TTGTTGTGCT TACAGTCAAA AGCACGAGGA GGCGGGCGAG GTTCCGGTGG
P.pinaster 4CL7 AAAAAATAAA ATCACTTA...A.....G.....A...A...
P.pinaster 4CL11 AAAAAATAAA ATCACTTA...A.....G.....A...
P.pinaster 4CL14 AAAAAATAAA ATCACTTA...A.....G.....A...
P.taeda ARNm
P.pinaster C3
P.pinaster C2
P.pinaster C21
P.pinaster C37
P.taeda BF518234
P.taeda BF169470

2701

P.taeda gène	CGTTCGTGGT	GAAGTCGTCG	GAAATCAGCG	AGCAGGAAAT	CAAGGAGTTC	GTGGCAAAGC	AGGTGATTTT	CTACAAGAAA	ATACACAGAG	TTTACTTTGT
P.pinaster 4CL7	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster 4CL11	.....	.....	.....	.....G...	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster 4CL14	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda ARNm	.C.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster C3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster C2	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster C21	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster C37	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BF518234	.....	.....	.....	.....	.....	.....	NNN.....	.....	.....	.....
P.taeda BF169470	.....	.....	.....	.....	.....	.....	NNNN.....	.....	.....	.....

2801

P.taeda gène	GGATGCGATT	CCTAAGTCGC	CGTCCGCAA	GATTCTGAGA	AAGGATTTGA	GAAGCAGACT	GGCAGCAAAA	TGAAAATGAA	TTTCCATATG	ATTCTAAGAT
P.pinaster 4CL7	.....	..G.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster 4CL11	.....	..G.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster 4CL14	.....	..G.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda ARNm	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster C3	.....	..G.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster C2	.....	..G.....	.....	.....A.	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster C21	.....	..G.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster C37	.....	..G.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda BF169470	.....	....NNN...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

2901

P.taeda gène	TCCTTTGCCG	ATAATTATAG	GATTCCTTTC	TGTTCACTTC	TATTTATATA	ATAAAGTGGT	GCAGAGTAAG	CGCCCTATAA	GGAGAGAGAG	AGAGCTTATC
P.pinaster 4CL7	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster 4CL11	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster 4CL14	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.taeda ARNm	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
P.pinaster C3	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	CT--.....
P.pinaster C2	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	CT--.....
P.pinaster C21	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	CT--.....
P.pinaster C37	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

3001

P.taeda gène	AATTGTATCA	TATGGATTGT	CAACGCCCTA	CACTCTTGCG	ATCGC					
P.taeda ARNm	.....	.....	.....	.....	.....TTCAA	T.TGCAT.TT	ACT..AAA.G	ATAT..GT.T	TTT..TT.	
P.pinaster C3	.....T.	A.AAA.AAAA	A..AAAAAA.	A.AAAAAAA.	.AAAAAA.AA	....AA...				
P.pinaster C2	.....T.	A.AAA.AAAA	A..AAAAAA.	-----	-----					
P.pinaster C21	.....A.	A.AAA.AAAA	A..AAAAAA.	A.						

ANNEXE EUCALYPTUS

Tableau 1 : Séquences et numeros d'accession (EMBL/genebank) des gènes de structure de la biosynthèse des lignines

ID **EGCAD; RNA; 1392 BP.**
 AC **X65631;**
 DE **E.gunnii mRNA cad for cinnamyl alcohol dehydrogenase**
 Nucleotide sequence of a cDNA encoding cinnamyl alcohol dehydrogenase from Eucalyptus
 FT [source](#) 1..1392

```
/translation="MGSLEKERTTGWAAARDPSGVLSPTYSLRNTGPEGLYIKVLSCG
VCHSDIHQIKNDLGM SHYPMVPGHEVVGLEVGSEVTKYRVGDRVGTGI VVGCCRSCS
PCNSDQEQYCNKKIWNVNDVYTDGKPTQGGFAGEI VVGERFVVKIPDGLSEQAAPLMC
AGVTVYSPLVRFGLKQSGLRGGILGLGGVGHMGV KIAKAMGHVTVI SSSDKKRTEALE
HLGADAYLVSSDENGMEATDSL D Y I FDTI PVVHPLEPYLALLKLDGKLIL TGVINAPL
QFISPMVMLGRKSI TGSF IGSMKETEEMLEFC KEKGLTSQIEVIKMDYVNTALERLEKN
DVR YRFVVDVVGSKLD"
```

SQ Sequence 1392 BP; 359 A; 290 C; 383 G; 360 T; 0 other;

gaattctctg	tcctaccgcg	aacttcccat	ctacataagc	agcaagttaa	cggctctgtc	60
gaatctctct	ccgagcacca	ctttgaaaga	agcttggatc	tttgagcaaa	aatgggcagt	120
cttgagaagg	agaggaccac	cacgggttgg	gctgcaaggg	accctgtctg	cgcttctctc	180
ccttacactt	atagcctcag	aaacacggga	ccagaagatc	tttacatcaa	ggtgttgagc	240
tgcggagtgt	gccacagtga	cattcaccag	atcaagaatg	atcttggcat	gtcccactac	300
cctatggttc	ctgggcatga	agtgggtggc	gaggttctgg	aggtgggatc	agaggtgaca	360
aagtacagag	ttgggtgacc	agtgggaacc	ggtatagtgg	ttgggtgctg	cagaagctgt	420
agcccttgca	atccggacca	ggagcaatat	tgcaacaaga	agatttggaa	ttacaatgac	480
gtgtacaccg	atggcaaacg	cactcaaggt	gggtttgctg	gtgagatagt	ggttggcgaa	540
aggtttgtgg	tgaaaatccc	agatgggta	gagtcggaac	aggcagcgcc	gctgatgtgc	600
gctgggtgtg	ccgtgtacag	ccctctgggt	cgctttgggc	tcaagcaaa	cgggttgaga	660
ggagggatat	tggggcttgg	aggggttggc	cacatggggg	tgaagatagc	caaggccatg	720
ggacaccacg	tgactgtgat	aagctcttct	gataagaaga	gaacggaggc	attggagcac	780
ctgggtgccg	atgctttact	agtgagctcc	gatgaaaatg	gaatgaaaga	ggccactgat	840
ctctctgact	acatttttga	cactatccct	gtggttcacc	ctctcgaacc	ttacctggcc	900
ttgttgaagc	tcgatggaaa	gctgatcttg	actggtgtca	tcaatgctcc	tcttcaattt	960
atctctccca	tggttatgct	tgggaggaag	tcaatcactg	ggagtttcat	agggagcatg	1020
aagaaaacag	aggagatgct	tgagtcttgc	aaagaaaagg	gattgacttc	ccagatcgaa	1080
gtgatcaaga	tggattatgt	caacaccgcc	ctagagaggg	tcgagaagaa	tgatgtcagg	1140
tacaggttcg	tcgtggacgt	cgtgggaagc	aagcttgatt	agttttgtcc	tttccccata	1200
agtaaacaa	aaatcgactt	gcttgtctct	caattcgagt	tcctcatgcc	ctctgtttga	1260
tcattgtttg	ttataccgag	agtgtctatt	tcttctgtct	tcgtattgaa	accatagacc	1320
ttctcgattg	tgtattcaat	gatgaaggtg	ttaatgattt	tatcacttaa	aaaaaaaaaa	1380
aaaaggaatt	cc					1392

ID **EGCCR RNA; 1210 BP.**
 AC **X79566;**
 DE **E.gunnii CCR mRNA.**
 KW **CCR gene; cinnamoyl CoA reductase.**

```
/translation="MPVDALPGSQTVCVTGAGGF IASWIKV KLLERGYTVRGTVRNPD
DPKNGHLRELEGASERLTLYKGD LMDYGSLEEA IKGCDGVVHTA SPVTD DPEQMVEPAV
IGTKNVI VAAA EAKVRRVVF TSSIGAVTMDPNRGP DVVVDESCWSDLEFC KSTKNWYCY
GKAVA EAKAAWPEAKERGV D LVINPVLV LGLLQSTINA SIIHILKYL TGS AKTYANSV
AYVHV KDV ALAHV L VLETPSASGRYL CAESV LHRGDVVE I LAKFFPEYNVPTKCSDEV
NPRVKPYKFSNQKLRDLGL EFTPVKQCLYETV KSLQEKGHLPV P SPPEDSVRIQG"
```

SQ Sequence 1210 BP; 279 A; 345 C; 343 G; 243 T; 0 other;

cctccacctc	ctgaaccctc	ctccccctc	gccggcaatc	ccaccatgcc	cgctcgacgcc	60
ctccccggtt	ccggccagac	cgctctcgct	accggcgccg	gcgggttcat	cgctctctgg	120
attgtcaagc	ttctcctcga	gcgaggctac	accgtgcgag	gaaccgtcag	gaaccagac	180
gacccgaaga	atggtcatct	gagagagctg	gaaggagcca	gcgagaggct	gacgctgtac	240
aagggtgata	tgatggacta	cgggagcttg	gaagaagcca	tcaaggggtg	cgacggcgctc	300
gtccacaccg	cctctccggt	caccgacgat	cctgagcaaa	tggttgagcc	agcgggtgatc	360
gggacgaaaa	atgtgatcgt	cgcagcggcg	gaggccaagg	tccggcgggt	tgtgttcacc	420
tcctccatcg	gtgcagtcac	catggacccc	aaccgggctc	cggacgttgt	ggtggacgag	480
tcttgttga	gcgacctcga	atthtgaag	agcactaaga	actggtattg	ctacggcaag	540
gcagtggcgg	agaagggccg	ttggccagag	gcgaaggaga	gaggggttga	cctcgtggtg	600
attaaccctg	tgctcgtgct	tggaccgctc	cttcagtcga	cgatcaatgc	gagcatcatc	660
cacatctca	agactctgac	tggctcagcc	aagacctacg	ccaactcgg	ccaggcgctac	720
gtgcacgtca	aggacgtcgc	gcttggcccac	gtccttctct	tggagacccc	atccgctca	780
ggccgctatt	tgtgcgcgca	gagcgtcctc	caccgtggcg	atgtgttgga	aatccttgcc	840
aagttcttcc	ctgagtataa	tgtaccgacc	aagtgtctctg	atgaggtgaa	cccaagagta	900
aaaccataca	atgtctccaa	ccagaagctg	agagacttgg	ggctcgagtt	cacccgggtg	960
aagcagtgcc	tgtacgaaac	tgtcaagagc	ttgcaggaga	aaggccacct	accagtcccc	1020
tccccgccgg	aagattcgg	gcgtattcag	ggatgatctt	agatccatca	cgggtgcgat	1080
ttgtaatccg	gagaaatgag	agaaacatgt	gggaattht	ttgtactttt	ctaagtcaaa	1140
cctggagata	ccaaccctga	gttctgcatt	ggaatggaag	ttgtcaattg	ttccaaaaaa	1200
aaaaaaaaaa						1210//

AC X74814;
DE E.gunnii OMT mRNA for O-Methyltransferase

O methyltransferase from Eucalyptus.

/protein_id="CAA52814.1"

/translation="MGSTGSETQMTPTQVSDEEANLFAMQLASASVLPMLKAAIELDL

LEIMAKAGPGAFLSPGEVAAQLPTQNPEAPVMLDRIFRLASYSVLTCTLRNLPDGKVE
RLYGLAPVCKFLVKNEGDVSI AALNLMNQDKILMESWYLLKDAVLEGGIPFNKAYGMTA
FEYHGTDPRFNKIFNRGMSDHSITTMKILETYKGFEGLETVDVGGGTGAVLSMIVAK
YPSMKGINFDLPHVIEDAPLPGVKHVGDMFVSVPKGDAIFMKWICHDWSDDHCAKFL
KNCYDALPNIGKIVIAECVLPVYPTSLATKNVIHIDCIMLAHNPPGGKERTQKEFETLA
KGAGFQGFQVMCCAFGTHVMEFLKTA"

SQ Sequence 1452 BP; 355 A; 377 C; 398 G; 322 T; 0 other;

cggagagaga	atgggttcca	tttctctgc	tttccttga	tcaagtctcg	cggaagagag	60
agaagagagg	agaggagaga	atgggttcca	cggatccga	gacccagatg	accccgaccc	120
aagtctcggg	cgaggaggcg	aacctcttcg	ccatgcagct	ggcgagcgcc	tccgtgctcc	180
ccatggctct	caaggccgcc	atcgagctcg	acctcctcga	gatcatggcc	aaggccgggc	240
cgggcgcggt	cctctccccg	ggggaagtcg	cggcccagct	cccgaccag	aaccccgagg	300
caccgctcat	gctcgaccgg	atcttccggc	tgctggccag	ctactccgty	ctcacgtgca	360
ccctccgcaa	cctccccgat	ggttaagtcg	agcggctcta	cggcttagct	ccggtgtgca	420
agttcttgg	caagaacgag	gacggggtct	ccatgcggcg	actcaacttg	atgaaccagg	480
acaaaacct	catggaagc	tggtattacc	tgaagatgc	ggtccttgaa	ggcggatcc	540
cattcaacaa	ggcgtacggg	atgaccgcat	tcgagatca	tggcaccgac	cctcgattca	600
acaagatctt	taaccgggga	atgtctgac	actccaccat	tactatgaag	aagatactgg	660
aaacgtacaa	ggcttccgag	ggcctcgaga	cgggtgctga	tgctcgagggt	ggcactgggg	720
ccgtgctcag	catgatcgtt	gccaaatacc	catcgatgaa	agggatcaac	ttcgacctgc	780
ctcacgtgat	tgaagagct	ccacccttc	ctgggtgcaa	gcacgtcggg	ggcgacatgt	840
tcgtcagcgt	tccaaaggga	gatgccattt	tcatgaagtg	gatatgcca	gactggagtg	900
acgaccattg	tgcaagttc	ctcaagaact	gctacgatgc	gcttcccaac	attggaaaag	960
tgatcgttgc	agagtgcgta	ctcctctgtt	accagacac	gagcctagcg	accaagaatg	1020
tgatccacat	cgactgcac	atgttggccc	acaaccagg	cgggaaagag	aggacacaga	1080
aggagtccga	gacattggcc	aaaggggccc	gatttcaggg	cttccaagtg	atgtgctgcg	1140
ctttcggcac	tcacgtcatg	gagttcctga	agaccgcttg	atctgctctt	ctctgtggtg	1200
atgttcatgg	ttcttggatt	tgaaggtcgc	tgaaggagcc	cttttctcac	agttggcttt	1260
cgattcggca	taccaagctt	cttctcataa	aaggaacaaa	taagaagtga	ctgtatgatg	1320
gcgcaagtgg	aagttacaag	atgtgtgtt	ttatgtctat	aaagttttga	gtcttctgta	1380
tactgatttc	acagaatgtg	taatgaaacg	gcgtatatgg	atgtgcctga	atgatggaaa	1440
aaaaaaaaaa	aa					1452

EG12228 standard; RNA; PLN; 1068 BP.

AC Y12228;

DE E.gunnii mRNA for caffeoyl-CoA O-methyltransferase

/translation="MATAGEESQTQAGRHQEVGHKSLQSDALYQYILETSVYPREPEP

MKELREITAKHPWNIMTSADEGQFLNMLLKLINAKNTMEIGVFTGYSLALALPDD
GKILAMDINRENYELGLPVIQKAGVADKIDFREGPALPILDQLIEDGKQGSFDFIFVDA
DKDNYLNYHKRLIELVKVGGGLIGYDNTLWNGSVVAPPDAPLRKYVRYRDFVLELNKAL
AADPRIEICMLPVGDI LCRRIQLSI"

FT polyA site 1038
FT /gene="COOAMT"

XX

SQ Sequence 1068 BP; 309 A; 252 C; 248 G; 259 T; 0 other;

ggaattctct	cgtggaagca	gacctactga	cttgattcaa	cctgtacatg	ccatctttct	60
ctcttctgta	atctgcaaca	tttcttgatc	acaacatatt	acaatattcc	taagcacaga	120
gagagagaga	gagagagttt	gaatcaatgg	ccaccgccgg	agaggagagc	cagacccaag	180
ccgggaggga	ccaggaggtt	ggccacaagt	ctctccttca	gagtgatgct	ctttaccaat	240
atattttgga	gaccagcgtg	taccacaagag	agcctgagcc	catgaaggag	ctcagggaaa	300
taacagcaaa	acatccatgg	aacataatga	caacatcagc	agacgaaggg	cagttcttga	360
acatgcttct	caagctcatc	aagcccaaga	acaccatgga	gattggtgtc	ttcactggct	420
actctctcct	tgccaccgct	cttgctcttc	ctgatgacgg	aaagattttg	gctatggaca	480
ttaacagaga	gaactatgaa	cttggcctgc	cggtcatcca	aaaagccggt	ggtgccgaca	540
agattgactt	cagagaaggg	cctgctttgc	ctattcttga	tcagttgatc	gaagatggga	600
agcaagggct	gttcgacttc	atattcgtgg	acgcagacaa	ggacaattac	ctcaactacc	660
acaagaggct	gatcgagctt	gtcaaggttg	gaggcctcat	tggctacgac	aacaccctat	720
ggaacggctc	cgtggttgcg	ccgcccagac	ccccgctcag	gaagtatgtg	aggtactaca	780
gggattttgt	gctggagctc	acaaggctc	ttgccgctga	tcctaggatt	gagatctgca	840
tgctccccgt	gggtgatggt	atcactctct	gccgtcggat	ccagctgagc	atctaactct	900
aagtccttat	gatcagggtt	cattcttaat	gtagaaccca	cgaaaaagag	agagatttat	960
gtatatcttg	ttgctgttct	ttttccatga	acctagaaac	gggattcgcg	atataatgcc	1020
aaattatggt	gctgtttcaa	aaaaaaaaaa	aaaaaaaaaa	aaaaaaaaaa		1068

4- Coumarate CoA ligase

EGU244010 standard; DNA; PLN; 182 BP.

XX

AC AJ244010;

Eucalyptus gunnii partial 4Cl-27 gene for 4-coumarate:CoA ligase

FT [source](#) 1..182

/translation="RELGMTEAGPVLAMCLAFKPEFEIKSGACGTVVRNAEMKIVDPE
TGASLPRNQAGEICVR"

SQ Sequence 182 BP; 34 A; 49 C; 73 G; 26 T; 0 other;

cgggagcttg g gatgacgga ggcgggccc ggtgctggca tgtgcctggc atttgc aaag 60
gagccgttcg agatcaagtc aggcgctgc gggaccgtcg tgaggaacgc ggagatgaag 120
atcgtcgacc cggagacagg ggcctcgctc ccgcggaacc aggcggcgca gatctgcgtc 180
cg

CGGGAGCTTGGGATGACGGAGGCGGGCCCGGTGCTGGCAATGTGCTGGCATTGCAAAGGAGCCGTTTCGAGATCAAGTCAGGCGCGTGCGGGACCGTCG
TGAGGAACGCGGAGATGAAGATCGTCGACCCGGAGACAGGGGCCCTCGCTCCCGCGGAACCGAGCCGCGGAGATCTGCGTCCGGGGTCACCAGATCATGAA
AGGTTATCTGAACGACCCGGAAGCGACCGCTAATACCATAGACAAAGAAGGGTGGCTGCACACGGCGACATCGGCTACGTAGACGATGACGACCAGCTC
TTCATTGTCTGATCGGTTGAAGGACCTCATCAAGTACAAGGGCTTCCAGGTCCCTCCGGCCGAATTAGAGGCGNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNNN
NN
GCAATACATCTCGAAGCAGGTCGTGTTTTACAAGAGGATCAACCGGGTTTTCTTCACGGACGCAATTCCGAAAGCCCCCTCCGGCAAAATCTTGAGGAAG
GACCTAAGAGCAAAGTTGGCCTCCGGTGTTTACAATTAATTTCTCATACCCTTTCTTTTCAACCTTGCCCTGTACTTGCTTAAAGACCCATGTAATT
GAAATGAATGTAACCTCTTCGGAGGGGCCAAATATGGAAGGGGAAAGAAAGACATATGGCGATGATTTGATTTACATGCTATTGTGATGATTTATTG
TTTCAATCCGAATTAGACAAAGTGCTTAAAGCTCTCTTTTCGGATTTTTTTTTTCCATTAATGTATAATAATTGCGGACATTACAATATAGTGTAACAAC
GTGATTTGAGCTTTGATGAATTACAAAAA

ID EGU249093 standard; DNA; PLN; 209 BP.

AC AJ249093;

DE Eucalyptus gunnii F5H gene for ferulate-5-hydroxylase

XX

KW f5h gene; ferulate-5-hydroxylase.

/translation="KYGGIFHLRMGFLHMVAVSSPDVARQVLQVHDGIFSNRPATIAIS
FT YLTYDRADMAFAHYGPFWRQMRKL"

SQ Sequence 209 BP; 32 A; 74 C; 60 G; 43 T; 0 other;

taagtatggc gggatcttcc acctccgcat gggcttctcg cacatgggtg ctgtgtcgtc 60
ccccgacgtg gcccgccagg tcctccaggt ccacgacggg atcttctcga accggcctgc 120
caccatcgcg atcagctacc tcacgtatga ccggccgac atggccttcg cgcactacgg 180
ccgcttctgg cggcagatgc ggaagctgt 209

Tableau 2: Recherche de QTL sur le génome d'*E. urophylla* par Interval Mapping (Mapmaker/QTL); par Composite Interval Mapping (Qgene) et par Analyse de variance (ANOVA).

Résultats obtenus avec Mapmaker								Résultats obtenus avec Qgene					Anov	
Groupe de liaison	Traits	N°	Marqueur	Position	Lod score	% de variation	% cumulé	Marqueur	F value	99 %ile	F max	Lod	r ²	p value
Groupe 2	1QS6	12	I14_1288_1+	0	1.76	4.1	21.20 lod = 8.55	ld	8.11	6.86	17.47	1.74	16.9	NS
Groupe 3		26	Z09_808_1-	0	2.12	4.8		ld	10.41	6.64	15.70	2.22		0.00148
Groupe 4		36	R15_671_1-	10	2.63	7.7		ld	9.61	6.74	13.48	2.05		NS
Groupe 6		53	EMBRA10b	16	2.41	6.9		A20_867/1+	9.95	6.96	14.50	2.12		NS
Groupe 5	3QD2	47	E04_318_1+	0	2.89	6.5	17.70 lod = 7.40	ld	12.84	-	-	2.72	13.9	0.00043
Groupe 7		61	N12_460_1+	6	2.45	6.6		Z12_730/1-	10.50	-	-	2.24		0.00140
Groupe 10		91	G14_765_1+	8	2.49	6.9		ld	9.85	-	-	2.10		NS
Groupe 3	3QD3	24	N19_253_1+	0	2.04	4.6	17.00 lod = 7.91	ld	9.12	-	-	1.95	16.9	NS
Groupe 5		47	E04_318_1+	0	2.45	5.5		ld	11.29	-	-	2.40		0.00094
Groupe 6		59	G12_606_1+	0	1.71	3.9		ld	8.29	-	-	1.78		NS
Groupe 7		61	N12_460_1+	6	1.81	4.4		ld	8.22	-	-	1.76		NS
Groupe 4	3QD4	39	D03_396_2-	0	2.50	5.7	18.30 lod = 6.08	ld	11.62	-	-	2.47	13.3	0.00079
Groupe 11		103	L17_1430_1+	0	3.42	7.6		ld	16.21	-	-	3.41		0.00008
Groupe 2	3QD5	18	Z08_1626_1-	0	2.17	4.9	7.90 lod = 3.55	ld	9.59	-	-	2.05	7.9	NS
Groupe 6		59	G12_606_1+	0	1.72	3.9		ld	8.52	-	-	1.82		NS
Groupe 1	3QS6	6	K10_474/2-	0	1.92	4.5	15.70 lod = 5.91	ld	8.57	-	-	1.84	11.4	NS
Groupe 4		36	R15_671_1-	10	2.33	6.9		ld	8.39	-	-	1.80		NS
Groupe 6		53	EMBRA10b	10	2.52	7.9		J04_611/2+	10.02	-	-	2.14		0.00181
Groupe 4	ageu_E	38	A10_1304_1+	0	2.04	4.8	-	ld	10.68	-	-	2.28	-	0.00129
Groupe 4	ageu_MV	38	A10_1304_1+	0	2.11	5.0	-	ld	10.86	-	-	2.31	-	0.00118
Groupe 1	DM62	2	A09_586_1+	8	4.38	11.2	32.40 lod = 14.71	ld	19.58	6.93	22.71	4.07	29.5	0.00002
Groupe 2		14	myb4b	6	2.76	7.4		Z08_1626/1-	12.09	6.50	15.52	2.57		0.00063
Groupe 3		26	Z09_808_1-	0	2.00	4.6		ld	8.55	6.78	15.51	1.83		NS
Groupe 4		36	R15_671_1-	0	2.98	6.7		ld	14.05	6.72	17.09	2.97		0.00023
Groupe 9		84	X12_383_1-	4	3.30	8.2		ld	14.84	6.77	14.79	3.13		0.00016
Groupe 11		98	4CLb	0	2.36	5.5		X19_562/1+	9.77	6.61	13.24	2.09		NS
Groupe 7	DRLM moy	67	COMT1b	6	2.93	7.1	18.00 lod = 7.83	EMRA16b	12.65	6.56	16.09	2.68	16.0	0.00048
Groupe 9		84	X12_383_1-	0	2.17	4.9		ld	10.13	6.41	15.99	2.16		0.00170
Groupe 10		92	K16_474_2-	0	3.45	7.7		ld	16.37	6.74	16.00	3.44		0.00008
Groupe 2	E2xagei	13	myb1b	0	2.02	5.9	22.70 lod = 8.3	I14_1288/1+	9.21	6.67	18.21	1.96	21.6	NS
Groupe 6		55	PAL2a	0	1.93	6.0		ld	8.34	6.87	15.04	1.78		NS
Groupe 7		62	Z12_730_1-	0	4.40	12.5		ld	20.76	6.97	16.48	4.27		0.00001
Groupe 5	Einf_Emoe	45	K12_701_1+	0	2.37	5.6	-	ld	10.25	-	-	2.19	-	0.00161
Groupe 2	Emoelle	11	A20_938_1+	0	3.09	7.4	23.10 lod = 10.39	Myb1b	13.03	6.70	15.89	2.76	20.0	0.00040
Groupe 3		26	Z09_808_1-	0	1.83	4.4		ld	9.06	6.80	18.59	1.94		NS
Groupe 6		51	O06_1543_1-	0	2.52	6.0		Z03_1269/1+	9.12	6.76	17.05	1.95		NS
Groupe 7		65	Y17_1307_1+	0	4.32	9.9		ld	19.09	6.83	21.49	3.98		0.00002
Groupe 2	Emoy30	11	A20_938_1+	0	3.86	9.2	40.00 lod = 13.37	I14_1288/1+	17.16	7.15	16.16	3.60	24.6	0.00005
Groupe 6		53	EMBRA10b	12	2.93	9.1		Z03_1269/1+	10.48	6.88	14.61	2.23		0.00143
Groupe 6		60	CCRb	0	2.08	5.3		ld	9.98	6.65	18.65	2.12		NS
Groupe 7		65	Y17_1307_1+	0	5.38	12.2		ld	25.17	6.84	19.89	5.18		0.00000
Groupe 3	EnergyD2	24	N19_253_1+	0	1.93	4.4	19.60 lod = 5.76	ld	8.92	-	-	1.91	9.3	NS
Groupe 4		35	ELF2a	36	1.72	10.5		ld	NS	-	-	NS		NS
Groupe 10		88	U16_1352_1-	4	1.87	5.3		ld	NS	-	-	NS		NS
Groupe 4	EnergyD3	34	N12_1348_1+	0	2.59	6.4	-	ld	14.36	-	-	3.03	0.00021	
Groupe 9		-	NS	NS	NS	NS	-	EMBRA19b	9.83	-	-	2.09	NS	
Groupe 4	EnergyD4	36	R15_671_1-	0	1.80	4.1	-	ld	8.37	-	-	1.80	-	NS

Groupe 3	EnergyS6	26	Z09_808_1-	5	2.08	5.2	15.90	ld	10.95	-	-	2.33	12.3	0.00112
Groupe 4		36	R15_671_1-	8	3.41	9.6	lod = 6.04	ld	14.38	-	-	3.04		0.00020
Groupe 6	ES2xagei	55	PAL2a	0	2.21	6.8	16.60	ld	9.35	-	-	1.99	16.3	NS
Groupe 7		62	Z12_730_1-	0	3.70	10.9	lod = 5.92	ld	17.28	-	-	3.59		0.00005
Groupe 5	Esinf_Esmo	45	K12_701_1+	0	2.03	4.8	-	ld	10.25	-	-	2.19	-	0.00161
Groupe 2	ESmoelle	11	A20_938_1+	0	3.79	9.1	23.10	ld	16.46	6.22	14.94	3.45		0.00008
Groupe 6		51	O06_1543_1-	0	3.47	8.2		Z03_1269/1+	11.84	6.74	19.38	2.52	19.7	0.00072
Groupe 7		65	Y17_1307_1+	0	4.02	9.2	lod = 10.43	ld	17.63	6.85	17.37	3.69		0.00004
Groupe 2	ESmoy30	11	A20_938_1+	0	4.14	9.9		I14_1288/1+	18.25	6.55	17.38	3.82		0.00003
Groupe 6		53	EMBRA10b	12	3.73	11.3	37.00	Z03_1269/1+	13.27	6.85	15.25	2.81	25.4	0.00035
Groupe 6		60	CCRB	0	2.12	5.4	2 de G6 = 22 %	ld	9.63	6.54	18.64	2.05		NS
Groupe 7		65	Y17_1307_1+	0	5.14	11.7	lod = 14.49	ld	23.90	6.34	17.58	4.93		0.00000
Groupe 6	FibLar	60	CCRB	0	2.48	6.7	-	ld	10.23	-	-	2.17	-	0.00170
Groupe 2	FibLongar	10	EMBRA07a	20	1.78	5.6	-	ld	NS	-	-	NS	-	NS
Groupe 1	FibLongp	6	K10_474/2-	14	2.15	6.8	13.10	M06_1453/1+	8.68	-	-	1.86		NS
Groupe 2		11	A20_938_1+	0	2.94	7.6	lod = 4.71	ld	11.72	-	-	2.48	14.8	0.00079
Groupe 3		-	NS	NS	NS	NS	-	EMBRA15b	8.49	-	-	1.81		NS
Groupe 6	Fibsouple	60	CCRB	0	1.81	4.9	-	ld	NS	-	-	NS	-	NS
Groupe 1	Genµmole	4	K10_528/1+	16	3.59	10.6	18.00	Y11_815/1+	15.36	-	-	3.24	-	0.00012
Groupe 3		21	G14_912_1-	14	1.62	5.6		ld	NS	-	-	NS		NS
Groupe 6		58	G14_841_1-	8	1.86	5.9	lod = 6.30	ld	NS	-	-	NS		NS
Groupe 1	Genbois	4	K10_528/1+	12	3.92	11.9	25.40	Y11_815/1+	15.31	-	-	3.22		0.00013
Groupe 5		45	K12_701_1+	10	2.21	7.6		ld	10.84	-	-	2.31	18.5	0.00119
Groupe 6		58	G14_841_1-	8	4.08	12.6	lod = 9.07	ld	14.66	-	-	3.09		0.00018
Groupe 4	Henµmole	38	A10_1304_1+	0	1.80	4.6	11.90	ld	8.27	-	-	1.77	11.3	NS
Groupe 5		40	B08_2322_2-	0	3.28	8.2	lod = 4.86	ld	17.32	-	-	3.62		0.00005
Groupe 3	HGSenµmole	28	A08_479_2+	0	1.77	4.3	19.50	ld	9.78	-	-	2.08		NS
Groupe 4		38	A10_1304_1+	0	2.65	6.3		ld	11.64	-	-	2.47	19.7	0.00079
Groupe 8		79	X09_1757_1+	2	2.29	5.9	lod = 7.78	EMBRA05a	11.84	-	-	2.51		0.00165
Groupe 4	HsurG	38	A10_1304_1+	0	1.94	4.6	13.30	ld	8.87	-	-	1.90		NS
Groupe 5		40	B08_2322_2-	0	3.66	9.1	lod = 5.4	ld	18.15	-	-	3.78	15.8	0.00003
Groupe 8		-	NS	NS	NS	NS	-	E06_756/1+	8.46	-	-	1.81		NS
Groupe 7	IE1jour	65	Y17_1307_1+	4	4.43	11.5	-	ld	17.52	-	-	3.67	-	0.00004
Groupe 7	IE1sem	64	B08_365_1+	4	5.22	13.2	-	Y17_1307/1+	21.95	-	-	4.55		0.00001
Groupe 7	IE2mois	66	COMT2a	0	4.11	9.7	18.00	ld	17.88	-	-	3.73		0.00004
Groupe 9		-	NS	NS	NS	NS	-	M04_468/1+	8.82	-	-	1.89	19.1	NS
Groupe 10		92	K16_474_2-	0	4.05	9.4	lod = 7.96	ld	19.12	-	-	3.99		0.00002
Groupe 6	larfente	53	EMBRA10b	0	1.90	4.5	11.20	ld	7.93	-	-	1.70	10.3	NS
Groupe 7		64	B08_365_1+	4	1.90	5.0	lod = 4.63	ld	8.26	-	-	1.77		NS
Groupe 3	LigKlaAE	28	A08_479_2+	0	3.44	8.2		ld	18.12	6.93	16.48	3.77		0.00003
Groupe 5		47	E04_318_1+	0	2.28	5.5	39.10	ld	8.79	6.51	16.34	1.88	29.0	NS
Groupe 6		60	CCRB	0	5.46	13.2	lod = 14.26	ld	29.68	6.83	14.31	5.97		0.00000
Groupe 8		78	EMBRA09b	0	2.28	5.7		EMBRA05a	9.57	6.83	15.28	2.04		NS
Groupe 3	LigKlasSE	28	A08_479_2+	0	3.61	8.6		ld	17.76	6.71	21.14	3.70		0.00004
Groupe 5		47	E04_318_1+	0	2.14	5.1	40.70	ld	8.34	6.81	17.84	1.79	29.1	NS
Groupe 6		60	CCRB	0	5.56	13.4	lod = 14.37	ld	28.79	6.76	22.63	5.80		0.00000
Groupe 8		78	EMBRA09b	0	2.54	6.3		EMBRA05a	11.41	6.92	17.03	2.42		0.00091
Groupe 6	Longfente	53	EMBRA10b	0	1.80	4.2	11.40	ld	8.69	-	-	1.86	-	NS
Groupe 7		64	B08_365_1+	6	1.84	5.2	lod = 4.44	ld	NS	-	-	NS		NS
Groupe 5	MADS6	40	B08_2322_2-	0	2.03	4.9	-	ld	8.30	-	-	1.78	-	NS
Groupe 1	MaxD1	2	A09_586_1+	0	3.37	8.0	-	ld	19.01	-	-	3.96	-	0.00002
Groupe 4	MaxD3	34	N12_1348_1+	0	2.38	5.6	14.30	ld	11.16	-	-	2.37	12.3	0.00102
Groupe 9		85	X01_623_1-	4	3.01	7.5	lod = 6.00	EMBRA19b	12.98	-	-	2.74		0.00046

Groupe 5	MaxD4	46	K17_1254_1-	0	2.34	5.3	-	ld	10.60	-	-	2.26	-	0.00133
Groupe 9	MaxD6	83	U13_451_1-	0	2.27	5.2	-	ld	11.41	-	-	2.42	-	0.00089
Groupe 4	MaxS6	36	R15_671_1-	12	2.23	6.9	-	B08_1945/2+	8.80	-	-	1.88	-	NS
Groupe 5		45	K12_701_1+	10	2.13	6.8	21.50	ld	9.99	-	-	2.13	16.3	NS
Groupe 6		53	EMBRA10b	16	2.80	8.1	lod = 8.31	A20_867/1+	10.12	-	-	2.16	-	0.00173
Groupe 7		62	Z12_730_1-	0	1.97	4.5	-	ld	9.68	-	-	2.07	-	NS
Groupe 1	MeanS6	6	K10_474_2-	0	1.65	3.8	-	ld	NS	-	-	NS	-	NS
Groupe 2		12	I14_1288_1+	0	1.71	4.0	24.50	ld	7.89	-	-	1.70	-	NS
Groupe 3		-	NS	NS	NS	NS	-	Z09_808/1-	8.29	-	-	1.78	20.9	NS
Groupe 4		36	R15_671_1-	10	3.32	9.8	-	ld	11.82	-	-	2.51	-	0.00071
Groupe 6		53	EMBRA10b	14	3.03	9.5	lod = 10.23	A20_867/1+	10.50	-	-	2.24	-	0.00143
Groupe 7		62	Z12_730_1-	0	1.97	4.5	-	ld	9.27	-	-	1.98	-	NS
Groupe 4	MedianS6	36	R15_671_1-	10	3.39	9.8	14.90	ld	12.83	-	-	2.72	9.8	0.00043
Groupe 6		53	EMBRA10b	12	2.07	6.7	lod = 5.18	J04_611/2+	8.51	-	-	1.82	-	NS
Groupe 3	MinS6	26	Z09_808_1-	0	1.91	4.5	-	ld	8.30	-	-	1.78	-	NS
Groupe 4		37	B08_1945_2+	4	2.93	7.5	21.20	ld	11.55	-	-	2.45	14.5	0.00084
Groupe 6		54	A20_867_1+	0	1.70	4.2	lod = 9.41	ld	NS	-	-	NS	-	NS
Groupe 7		66	COMT2a	0	2.27	5.2	-	Z12_730/1-	8.40	-	-	1.80	-	NS
Groupe 1	pilsous50	3	Z03_925_1+	0	2.19	4.9	16.60	ld	10.69	6.58	17.40	2.28	-	0.00127
Groupe 3		26	Z09_808_1-	10	3.51	8.9	-	Y20_375/1-	15.43	6.47	15.43	3.25	15.4	0.00012
Groupe 11		98	4CLb	0	1.85	4.3	lod = 7.16	ld	10.78	6.24	13.98	2.28	-	0.00130
Groupe 2	pilsous62	14	myb4b	0	3.20	7.3	-	ld	12.33	6.73	15.55	2.62	-	0.00056
Groupe 4		37	B08_1945_2+	0	2.38	5.8	21.90	ld	12.78	6.73	16.75	2.70	15.4	0.00045
Groupe 5		44	R15_519_2-	6	2.06	5.2	lod = 10.50	ld	8.46	6.72	14.90	1.81	-	NS
Groupe 11		98	4CLb	0	1.95	4.7	-	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 6	pilsur26	60	CCRb	0	1.89	6.3	26.20	ld	8.65	7.07	20.96	1.86	12.1	NS
Groupe 11		98	gen4CLb	4	2.70	10.5	lod = 4.19	X19_562/1+	8.75	6.63	21.14	1.86	-	NS
Groupe 5	pilsur38	44	R15_519_2-	0	1.85	4.2	11.90	ld	8.93	6.39	17.05	1.91	9.6	NS
Groupe 11		98	4CLb	0	3.11	7.3	lod = 4.84	X19_562/1+	11.70	7.00	16.14	2.49	-	0.00076
Groupe 3	pilsur50	26	Z09_808_1-	10	2.97	7.4	12.60	Y20_375/1-	13.99	5.94	13.29	2.96	-	0.00024
Groupe 4		-	NS	NS	NS	NS	-	B08_1945/2+	8.05	-	-	1.72	15.4	NS
Groupe 11		96	X19_562_1+	0	2.37	5.3	lod = 5.50	ld	10.11	6.03	14.88	2.16	-	0.00172
Groupe 3	pilsur62	30	X19_709_1-	0	2.40	5.5	28.30	ld	10.47	6.54	18.19	2.23	11.1	0.00143
Groupe 11		98	4CLb	0	3.23	7.6	lod = 5.43	M05_722/1+	13.29	6.49	17.47	2.84	-	0.00033
Groupe 5	SDD2	47	E04_318_1+	0	2.67	6.0	11.80	ld	11.81	-	-	2.51	10.8	0.00072
Groupe 7		61	N12_460_1+	8	2.49	6.5	lod = 4.97	Z12_730/1-	11.29	-	-	2.40	-	0.00094
Groupe 4	SDD3	34	N12_1348_1+	0	2.58	6.3	12.50	ld	14.44	-	-	3.04	10.6	0.00020
Groupe 9		85	X01_623_1-	2	2.15	5.3	lod = 5.23	EMBRA19b	12.55	-	-	2.65	-	0.00052
Groupe 9	SDD6	81	Y19_1398_2-	2	2.41	6.0	-	ld	11.79	-	-	2.50	-	0.00074
Groupe 5	SDS6	43	U13_428_2-	18	1.82	5.8	-	K12_701/1+	8.98	-	-	1.92	-	NS
Groupe 3	Senpmole	28	A08_479_2+	0	1.59	3.8	-	ld	9.20	6.77	16.38	1.96	-	NS
Groupe 4		38	A10_1304_1+	0	2.91	6.9	27.30	ld	12.86	7.04	17.10	2.72	24.5	0.00043
Groupe 6		60	CCRb	0	2.39	6.0	lod = 10.36	ld	10.47	6.69	20.69	2.22	-	0.00149
Groupe 8		79	X09_1757_1+	0	2.66	6.7	-	EMBRA05a	13.32	6.51	13.54	2.81	-	0.00035
Groupe 4	Senbois	38	A10_1304_1+	0	3.50	8.2	16.80	ld	15.73	6.57	14.65	3.31	18.2	0.00010
Groupe 6		55	PAL2a	14	1.76	5.5	-	ld	8.56	6.53	15.01	1.83	-	NS
Groupe 8		79	X09_1757_1+	0	1.90	4.9	lod = 6.73	EMBRA05a	9.36	6.99	14.05	2.00	-	NS
Groupe 1	SsurG	3	Z03_925_1+	4	1.72	4.6	-	ld	7.84	6.69	18.28	1.70	-	NS
Groupe 4		38	A10_1304_1+	0	1.85	4.4	40.80	ld	8.13	6.53	14.61	1.74	-	NS
Groupe 6		56	J04_611_2+	0	5.53	13.1	-	ld	26.75	7.08	17.60	5.46	30.4	0.00000
Groupe 6		60	CCRb	0	8.50	20.0	lod = 16.58	G14_841/1-	41.13	6.76	15.59	8.15	-	0.00000
Groupe 8		79	X09_1757_1+	0	2.54	6.2	-	EMBRA05a	9.75	6.93	15.99	2.08	-	NS
Groupe 3	Txextrait	20	A09_1084_1+	14	4.63	13.8	24.80	G14_841/1-	19.77	6.86	24.34	4.12	-	0.00002
Groupe 6		55	PAL2a	16	2.67	8.7	-	I14_1209/1+	11.67	6.58	13.93	2.48	14.7	0.00078

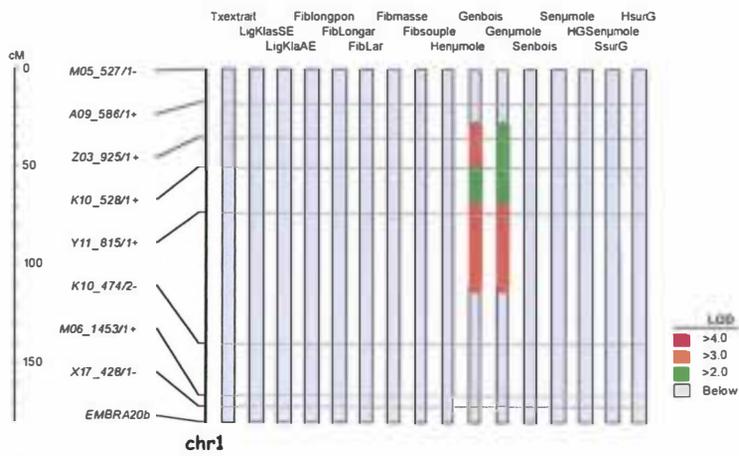
Groupe 10		92	K16_474_2-	16	1.90	6.8	lod = 8.47	ld	NS	NS	NS	NS		NS
Groupe 1	V62reel	2	A09_586_1+	6	5.27	13.3	22.40	ld	26.78	6.47	15.95	5.47		0.00000
Groupe 2		12	I14_1288_1+	2	2.20	5.3		ld	9.84	7.09	14.44	2.10	16.6	NS
Groupe 3		30	X19_709_1-	0	2.18	5.0	lod = 8.28	ld	9.91	6.65	16.81	2.12		NS

Tableau 3 Recherche de QTL sur le génome d'*E. grandis* par Interval Mapping (Mapmaker/QTL) ; par Composite Interval Mapping (Qgene) et par Analyse de variance (ANOVA).

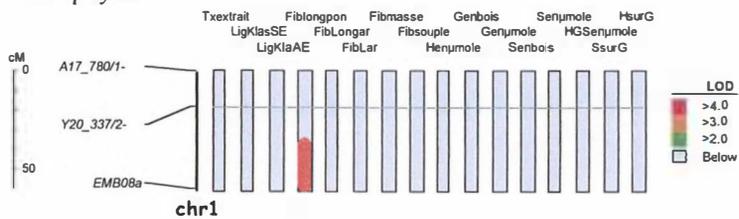
Résultats obtenus avec Mapmaker								Résultats obtenus avec Qgene					Anova	
Groupe de liaison	Traits	N°	Marqueur	Position	Lod score	% de variation	% cumulé	Marqueur	F value	99%ile	F max	Lod	r ²	p value
Groupe 11	1QS6	73	B01_576/1-	0	2.07	4.7	-	ld	10.00	7.05	18.75	2.13	-	0.00184
Groupe 3	3QD4	15	E15_910/1+	4	3.02	7.5	-	ld	12.90	6.64	18.08	2.74	-	0.00042
Groupe 2	3QD6	9	A19_694/1+	18	2.18	5.9	-	myb2b	8.51	7.22	17.43	1.82	-	NS
Groupe 9	3QS6	58	A08_438/2+	0	1.90	4.9	-	ld	9.75	6.74	13.75	2.08	-	NS
Groupe 2	DM62	5	EgTubb	6	2.67	7.6	-	ld	9.48	6.82	18.25	2.02	-	NS
Groupe 5		30	X12_633/1+	2	2.04	5.0	26.2	ld	9.26	6.88	20.18	1.98	-	NS
Groupe 6		35	K12_657/1-	8	3.18	8.9	lod = 11.3	ld	15.70	6.72	13.06	3.31	23.7	0.00010
Groupe 8		46	Q05_525/1+	4	3.03	7.7	-	ld	12.98	6.55	16.08	2.75	-	0.00040
Groupe 11		74	X07_1583/1+	0	2.33	5.3	-	ld	11.77	6.59	16.47	2.50	-	0.00074
Groupe 11	DRLM	76	A09_1368/1-	14	2.45	7.2	-	U20_1601/2-	9.97	6.58	14.73	2.13	-	NS
Groupe 2	E2xagei	8	M10_372/1-	8	1.90	6.5	11.1	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 5		30	X12_633/1+	0	1.97	5.8	lod = 3.49	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 2	Emoelle	9	A19_694/1+	14	1.92	5.8	11.0	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 11		73	B01_576/1-	6	2.22	5.5	lod = 4.15	X07_1583/1+	8.14	6.75	14.17	1.74	-	NS
Groupe 2	Emoy30	8	M10_372/1-	8	1.74	4.8	13.4	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 6		35	K12_657/1-	20	1.84	6.4	lod = 4.87	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 11		73	B01_576/1-	4	1.84	4.7	-	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 6	EnergyD1	35	K12_657/1-	0	2.45	5.6	12.0	ld	11.80	6.71	16.56	2.51	-	0.00072
Groupe 9		53	M05_1310/1+	16	1.81	5.5	lod = 4.14	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 6	EnergyD2	34	CCRb	0	2.05	4.8	9.6	K12_657/1-	8.54	6.67	15.48	1.83	8.1	NS
Groupe 9		54	X15_1457/2+	0	1.87	4.3	lod = 3.98	ld	8.41	6.74	16.30	1.80	-	NS
Groupe 9	EnergyD6	53	M05_1310/1+	0	1.78	4.1	-	ld	8.13	6.13	14.19	1.74	-	NS
Groupe 6	EnergyS6	35	K12_657/1-	16	1.92	6.0	-	K06_1092/1+	8.47	6.83	16.11	1.81	-	NS
Groupe 3	Esinf_Esmo	-	-	-	-	-	-	A20_751/1-	8.76	6.62	13.44	1.87	-	NS
Groupe 5		30	X12_633/1+	0	2.02	4.8	10.3	ld	9.57	6.65	16.65	2.04	11.6	NS
Groupe 11		78	N12_1746/1+	14	2.30	6.6	lod = 4.03	Z09_855/1+	8.68	6.94	19.39	1.86	-	NS
Groupe 11	Esmoelle	74	X07_1583/1+	0	1.90	4.5	-	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 4	F62	23	B06_798/1+	0	2.25	5.1	-	ld	10.11	6.48	15.51	2.16	-	0.00172
Groupe 2	FibLar	8	M10_372/1-	4	1.75	5.1	25.8	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 7		42	N12_482/1+	0	1.99	5.2	3.7	ld	8.35	6.69	15.16	1.79	-	NS
Groupe 1	Fiblongpon	3	EMB08a	0	3.34	9.0	-	ld	15.57	6.63	13.16	3.26	11.8	0.00012
Groupe 2		-	-	-	-	-	-	O06_1402/1-	8.10	7.00	19.21	1.73	-	NS
Groupe 4	Fibmasse	22	EMB02b	0	2.00	5.3	-	ld	10.62	6.76	23.61	2.26	-	0.00137
Groupe 7	Fibsouple	42	N12_482/1+	0	2.58	6.7	-	ld	11.10	6.62	18.23	2.36	-	0.00106
Groupe 11	Henµmole	69	C4Hb	0	2.01	5.2	-	ld	10.09	6.85	19.36	2.15	-	0.00177
Groupe 2	HGSenµmole	6	N11_1405/2-	12	1.95	5.7	-	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 3	HsurG	-	-	-	-	-	-	M05_1784/2+	7.89	6.93	20.32	1.70	8.2	NS
Groupe 9		53	M05_1310/1+	18	1.85	6.2	-	X15_1457/2+	8.35	6.66	12.76	1.79	-	NS
Groupe 7	IE1jour	39	N14_1588/2-	18	2.19	7.6	-	A16/759/1-	8.35	6.61	14.59	1.78	6.3	NS
Groupe 8		-	-	-	-	-	-	A08_438/2+	8.01	6.49	16.32	1.72	-	NS
Groupe 2	IE2mois	7	O06_1402/1-	0	1.74	4.2	-	ld	8.55	6.54	15.53	1.83	-	NS
Groupe 4	LigKlaAE	22	EMB02b	22	1.98	7.8	-	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS
Groupe 7		39	N14_1588/2-	12	2.32	8.0	28.6	ld	8.24	6.87	15.56	1.76	16.6	NS
Groupe 8		50	M12_712/1+	0	1.75	4.2	-	ld	8.15	6.67	14.28	1.75	-	NS
Groupe 10		62	A20_800/1-	0	2.35	5.7	lod = 10.34	ld	9.37	6.90	15.72	2.00	-	NS
Groupe 11		74	X07_1583/1+	0	2.07	5.0	-	ld	10.44	6.50	15.80	2.22	-	0.00147
Groupe 2	LigKlasSE	10	myb2b	0	1.71	4.4	-	ld	NS	NS	NS	NS	-	NS

Groupe 3		18 Y01_494/1-	0	1.89	4.5	41.2	ld	8.81	6.85	22.36	1.89	19.6	NS
Groupe 4		22 EMB02b	22	2.66	10.7		B06_798/1+	9.35	7.22	18.33	2.00		NS
Groupe 7		39 N14_1588/2-	14	2.82	9.9	lod = 11.94	ld	9.44	6.94	16.73	2.02		NS
Groupe 8		50 M12_712/1+	0	1.98	4.7		ld	9.26	6.65	13.03	1.98		NS
Groupe 11		72 I14_797/1+	0	2.05	4.9		ld	10.28	6.87	19.09	2.15		0.00158
Groupe 8	Longfente	45 EMB09b	0	1.80	4.2		ld	NS	NS	NS	NS		NS
Groupe 9	MaxD1	57 N05_840/2+	30	2.05	9.6		ld	NS	NS	NS	NS		NS
Groupe 3	MaxD2	18 Y01_494/1-	12	2.30	6.8		ld	8.78	6.74	18.82	1.88		NS
Groupe 3	MaxS6	14 K02_1251/1-	10	1.94	5.7	19.2	ld	NS	NS	NS	NS		NS
Groupe 9		58 A08_438/2+	0	2.09	5.5	lod = 4.44	ld	10.90	6.44	16.98	2.32		0.00117
Groupe 3	MinS6	-	-	-	-		D03_618/1+	8.20	7.15	14.79	1.76		NS
Groupe 6		35 K12_657/1-	18	2.04	7.1		ld	NS	NS	NS	NS		NS
Groupe 11	Mvinf_Mvmo	71 X02_1169/1+	0	1.95	4.6		ld	9.10	5.35	9.23	1.95		NS
Groupe 6	Mvmoelle	-	-	-	-		K16_1193/1+	7.88	6.30	15.36	1.70	9.0	NS
Groupe 11		71 X02_1169/1+	6	2.71	6.9		ld	12.39	6.08	17.31	2.63		0.00054
Groupe 2	MVmoy30	5 EgTubb	14	1.80	6.6	13.8	ld	NS	NS	NS	NS		NS
Groupe 6		35 K12_657/1-	24	1.82	5.5		ld	NS	NS	NS	NS		NS
Groupe 11		71 X02_1169/1+	10	2.37	6.2	lod = 4.91	I14_797/1+	11.64	6.76	14.62	2.47		0.00079
Groupe 2	Pilsous50	4 D03_618/1+	0	1.73	4.0	10.3	ld	7.98	6.26	15.38	1.71	8.3	NS
Groupe 6		35 K12_657/1-	22	1.97	6.1	lod = 3.72	K16_1193/1+	8.10	6.71	14.26	1.74		NS
Groupe 2	Pilsous62	7 O06_1402/1-	0	2.18	5.2	18.9	ld	13.63	6.79	14.74	2.88	11.2	0.00030
Groupe 6		35 K12_657/1-	16	4.15	14.8	lod = 6.15	ld	14.29	6.42	18.56	3.02		0.00021
Groupe 2	Pilsur14	4 D03_618/1+	0	1.79	5.7	26.2	O06_1402/1-	7.97	6.92	17.01	1.70		NS
Groupe 5		30 X12_633/1+	10	2.96	9.9		M12_469/1-	12.33	6.64	15.71	2.60	20.7	0.00060
Groupe 11		73 B01_576/1-	0	3.18	10.0	lod = 8.65	ld	14.36	6.69	20.85	2.99		0.00023
Groupe 5	Pilsur26	30 X12_633/1+	6	2.93	10.5		ld	12.27	6.77	15.06	2.59		0.00062
Groupe 4	Pilsur38	25 R15_625/1+	0	3.30	7.5	25.0	ld	15.20	7.11	13.82	3.21		0.00013
Groupe 6		35 K12_657/1-	16	3.33	11.9		ld	12.08	7.13	16.61	2.57	15.7	0.00063
Groupe 8		49 A09_1192/1+	36	2.35	7.2	lod = 8.54	M12_712/1+	10.35	6.88	14.51	2.21		0.00151
Groupe 6	Pilsur50	35 K12_657/1-	24	2.45	6.8		K16_1193/1+	10.72	6.27	21.63	2.28		0.00125
Groupe 2	Pilsur62	4 D03_618/1+	8	2.09	5.2		ld	8.83	6.79	20.37	1.89		NS
Groupe 3		17 M05_1572/1+	0	2.96	6.6	29.6	ld	14.41	6.84	23.58	3.05	18.9	0.00020
Groupe 4		25 R15_625/1+	0	2.15	4.9	lod = 11.40	ld	10.01	6.84	14.90	2.14		0.00181
Groupe 6		35 K12_657/1-	18	3.56	11.9		ld	12.55	6.52	12.92	2.66		0.00050
Groupe 9	SDD6	53 M05_1310/1+	0	1.82	4.1		ld	8.28	6.72	17.51	1.78		NS
Groupe 2	Senpmole	6 N11_1405/2-	12	1.94	5.7	10.3	ld	NS	NS	NS	NS		NS
Groupe 11	Senpmole	69 C4Hb	0	2.07	5.1	lod = 3.87	ld	8.32	6.81	15.29	1.78		NS
Groupe 2	Senbois	6 N11_1405/2-	12	2.35	6.8	11.2	ld	8.22	6.73	16.95	1.76	8.6	NS
Groupe 11		69 C4Hb	0	2.06	5.0	lod = 4.26	ld	7.87	6.56	19.73	1.70		NS
Groupe 6	SsurG	32 X07_396/2+	0	3.17	7.6	18.3	ld	12.95	6.64	18.77	2.74	15.4	0.00042
Groupe 11		69 C4Hb	6	4.71	13.6	lod = 7.10	ld	20.82	6.67	17.34	4.31		0.00001
Groupe 4	Txextrait	21 Q14_944/1+	0	2.00	4.9	8.9	ld	9.61	6.91	25.59	2.05	9.0	NS
Groupe 9		54 X15_1457/2+	0	2.08	5.0	lod = 3.77	ld	8.87	7.05	14.78	1.90		NS
Groupe 2	V62reel	8 M10_372/1-	0	2.05	4.6		ld	9.58	6.63	15.47	2.05		NS
Groupe 4		22 EMB02b	26	2.47	9.2	26.3	B06_798/1+	9.48	6.70	16.21	2.03	18.5	NS
Groupe 5		30 X12_633/1+	4	2.63	7.0	lod = 9.72	ld	11.69	7.10	17.02	2.49		0.00076
Groupe 6		35 K12_657/1-	14	2.12	6.5		ld	10.59	7.03	19.19	2.26		0.00134

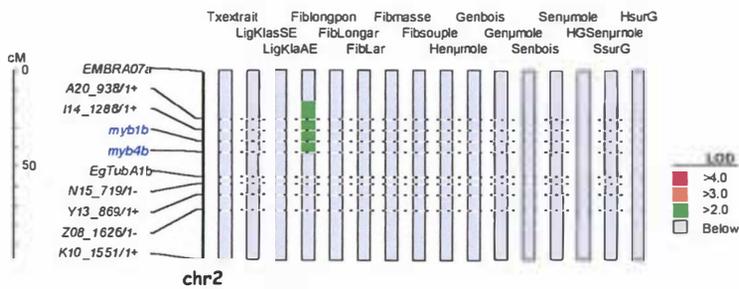
Figures 1 : Détection de QTLs sur les génomes d'*Eucalyptus urophylla* et *Eucalyptus grandis* pour les propriétés chimiques du bois.



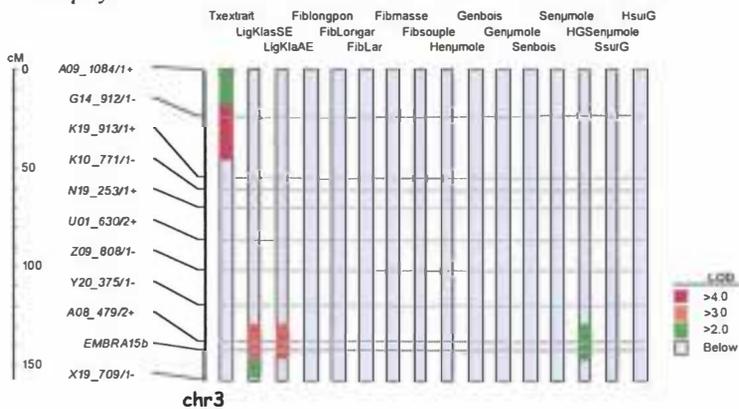
E. urophylla



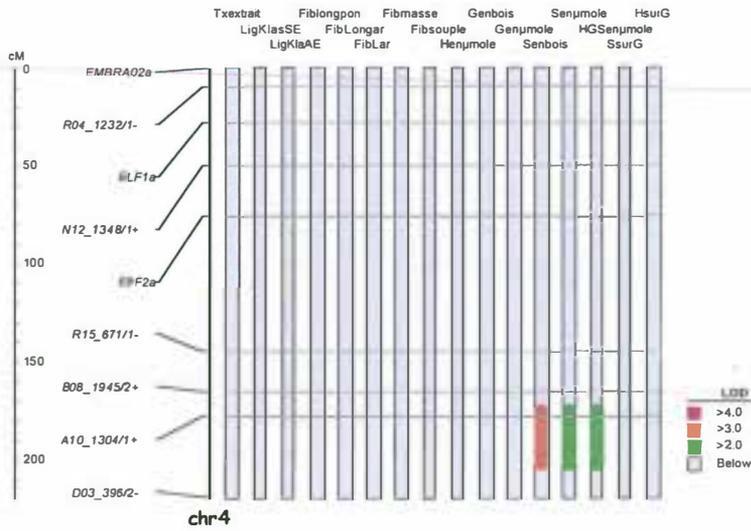
E. grandis



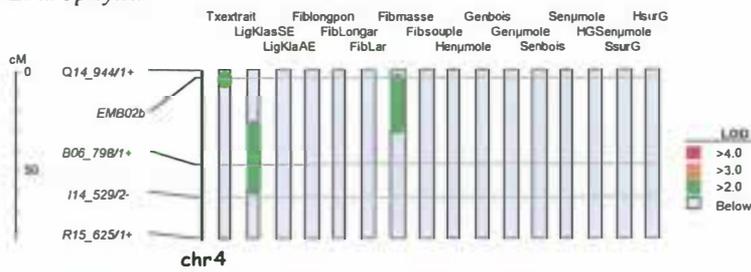
E. urophylla



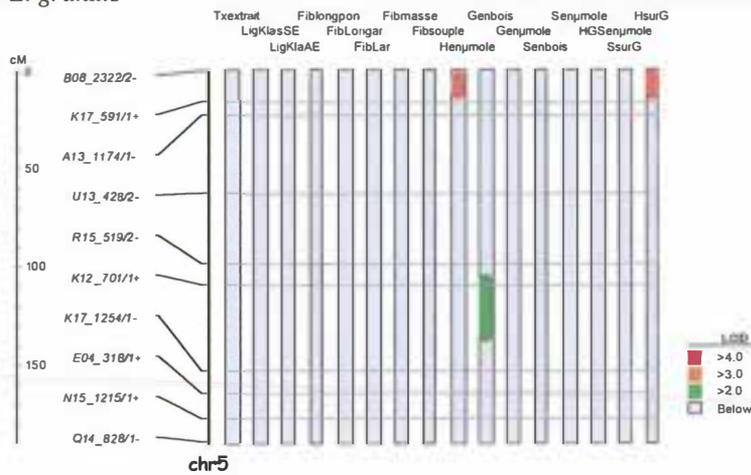
E. urophylla



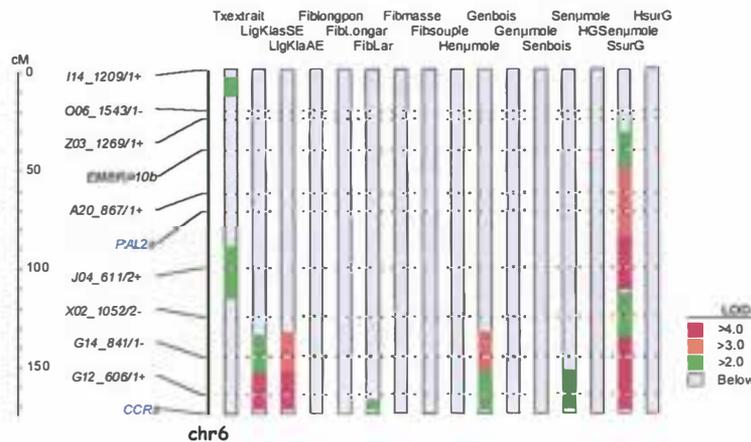
E. urophylla



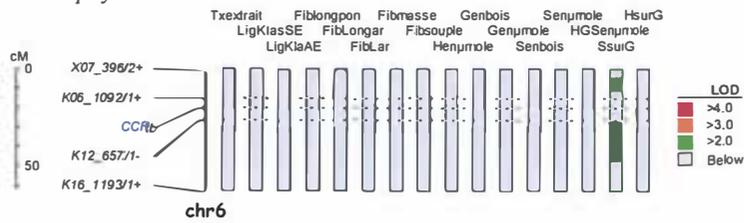
E. grandis



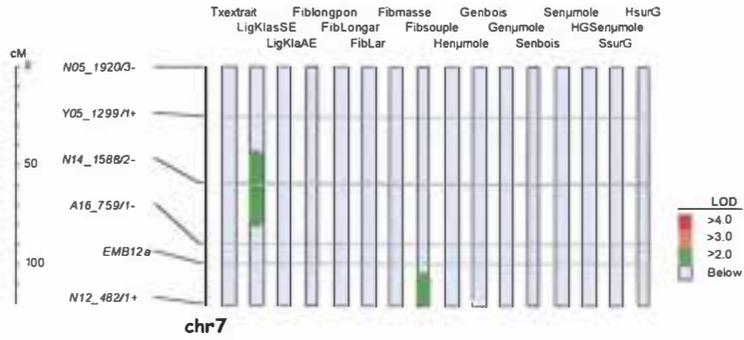
E. urophylla



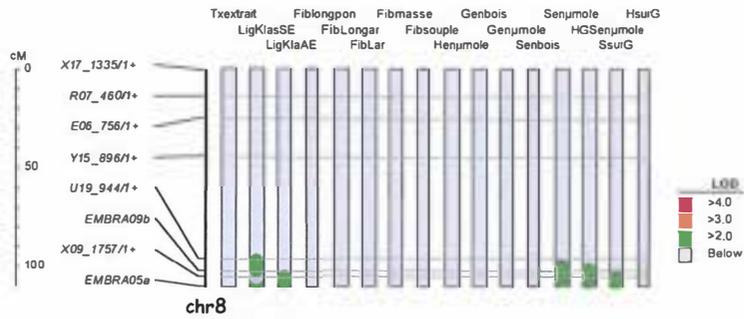
E. urophylla



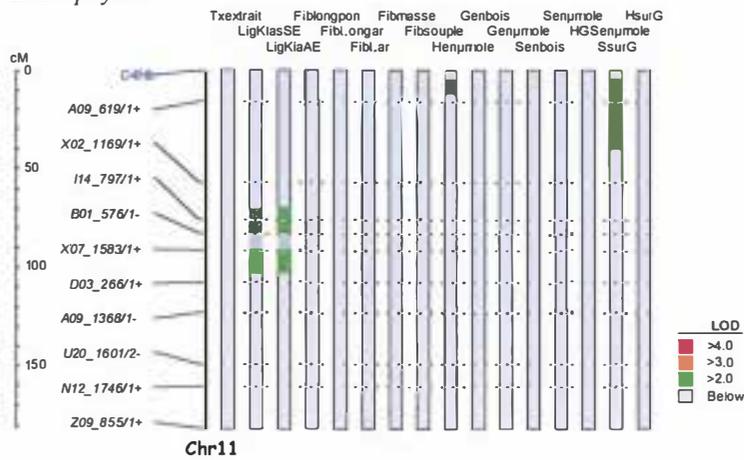
E. grandis



E. grandis

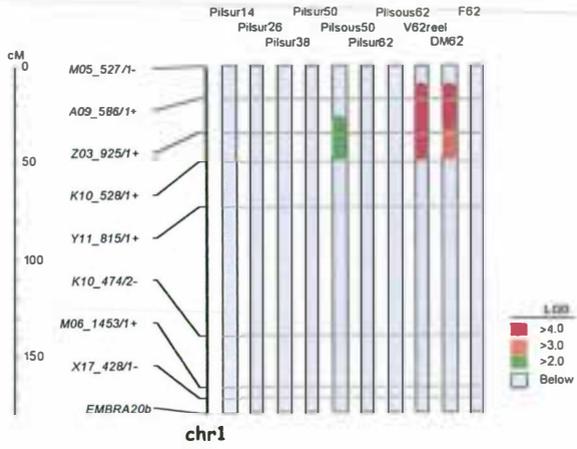


E. urophylla

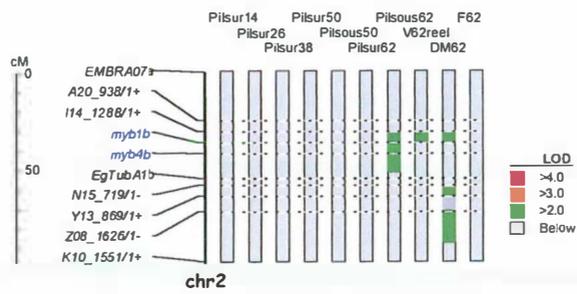


E. grandis

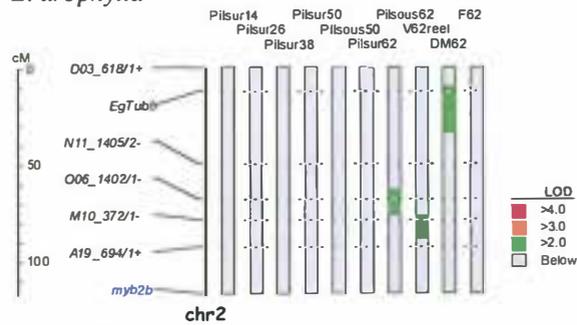
Variables dendrométriques :



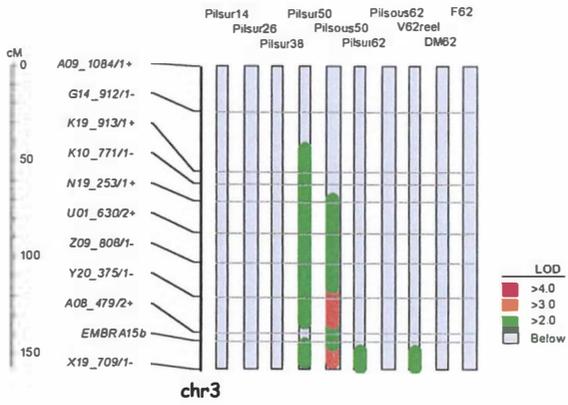
E. urophylla



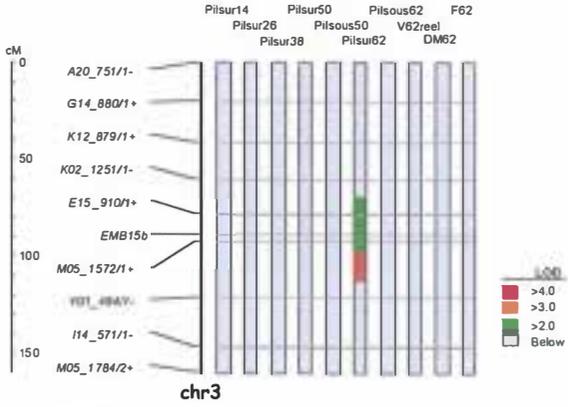
E. urophylla



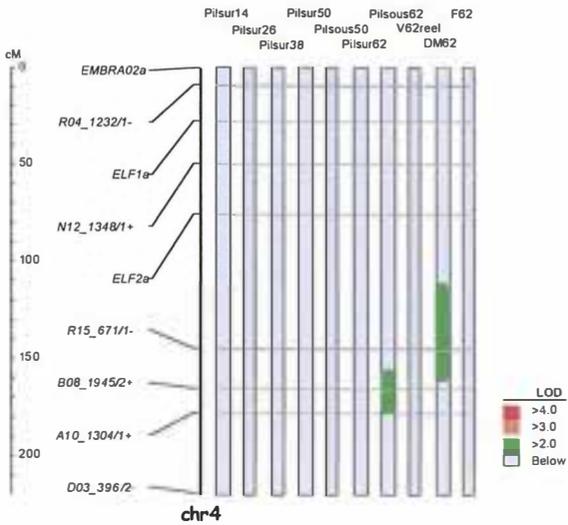
E. grandis



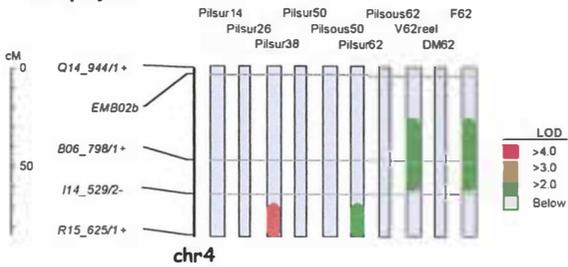
E. urophylla



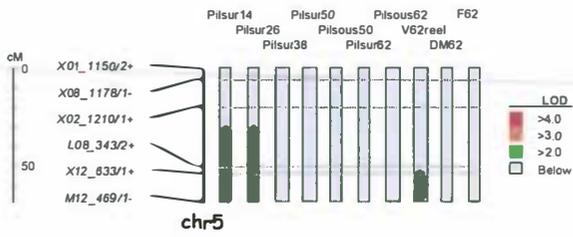
E. grandis



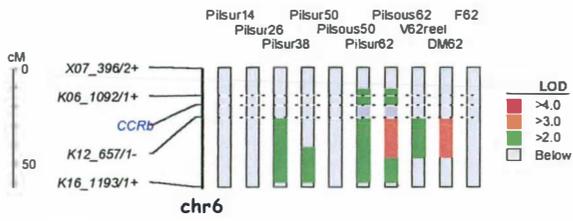
E. urophylla



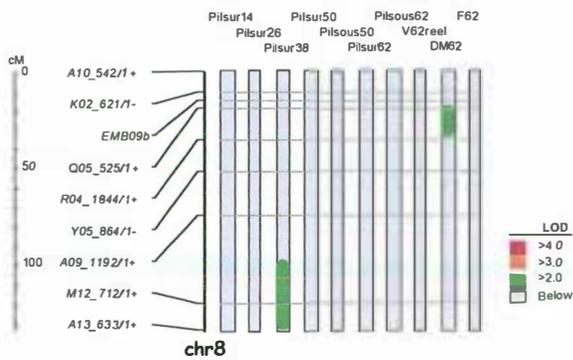
E. grandis



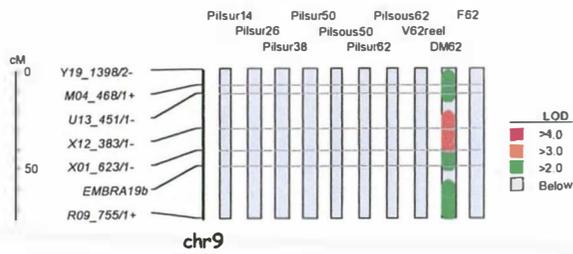
E. grandis



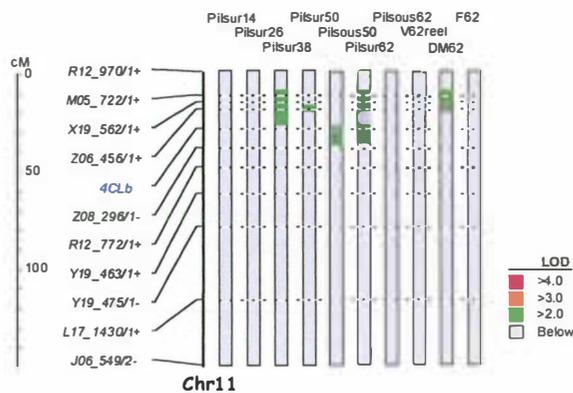
E. grandis



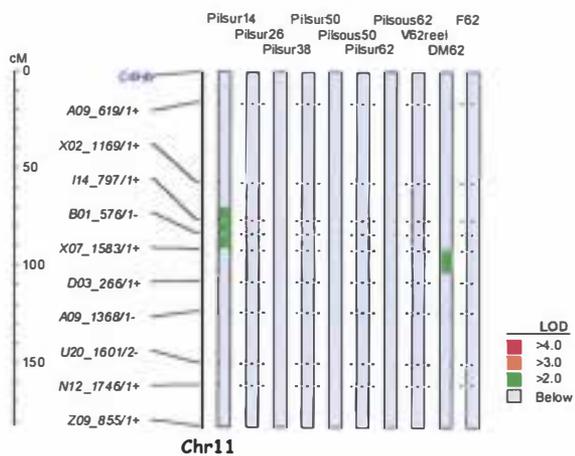
E. grandis



E. urophylla

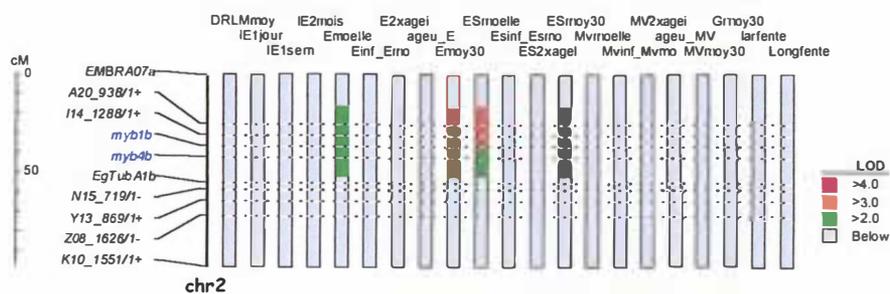


E. urophylla

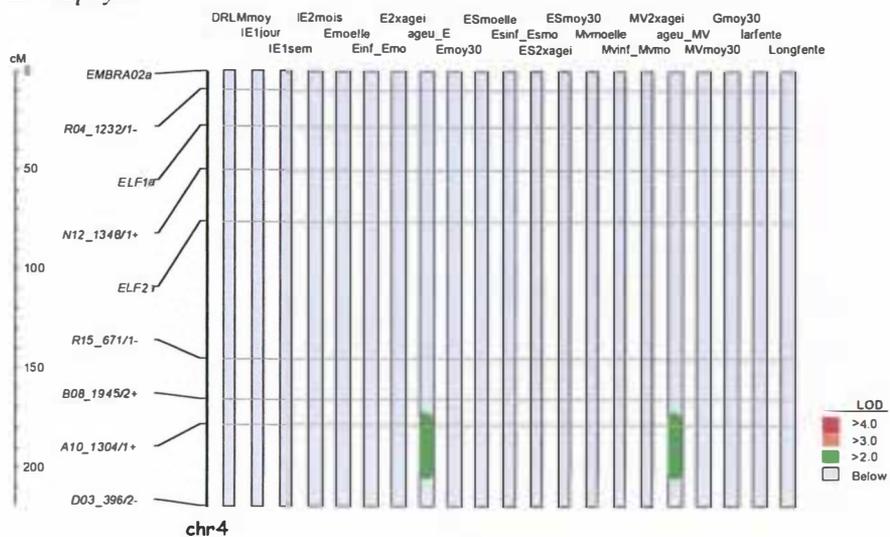


E. grandis

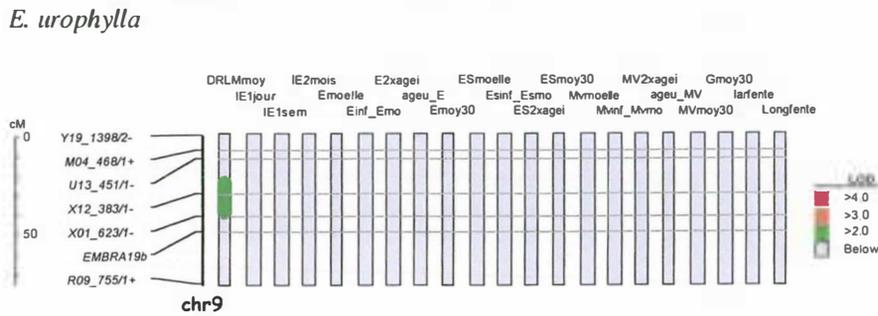
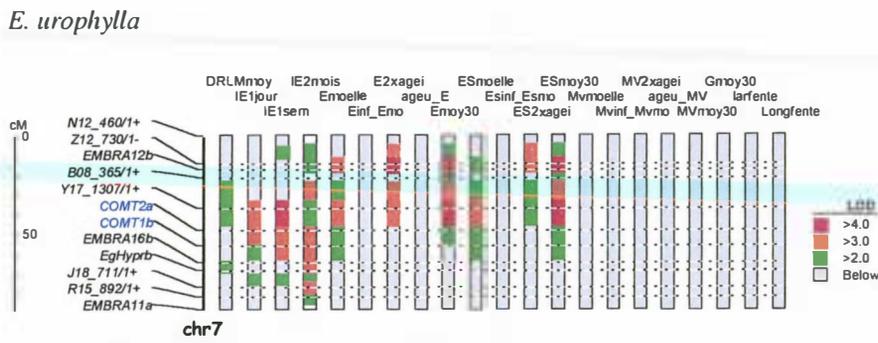
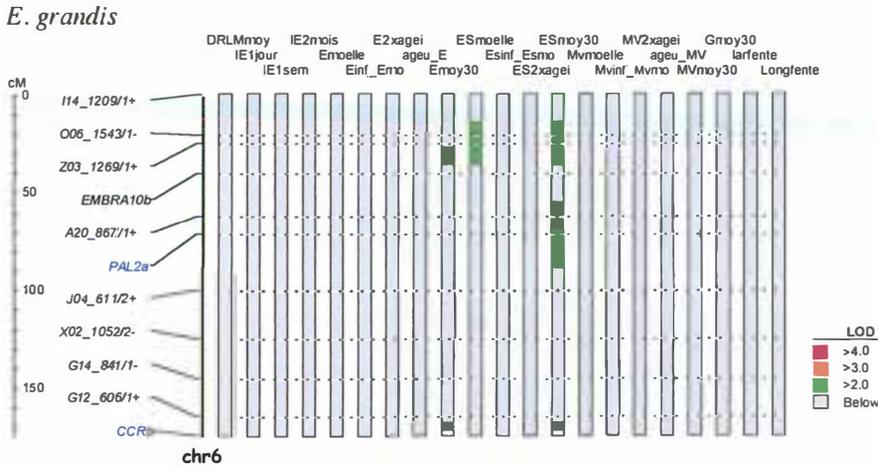
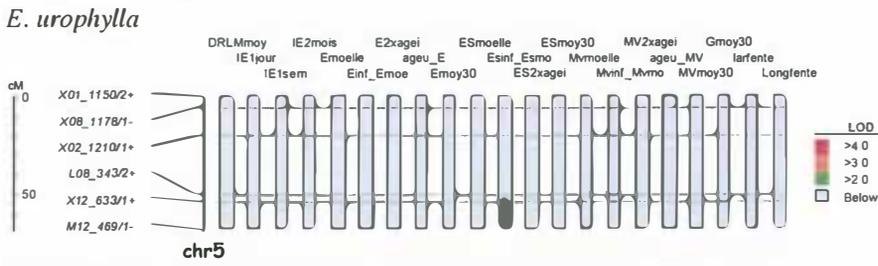
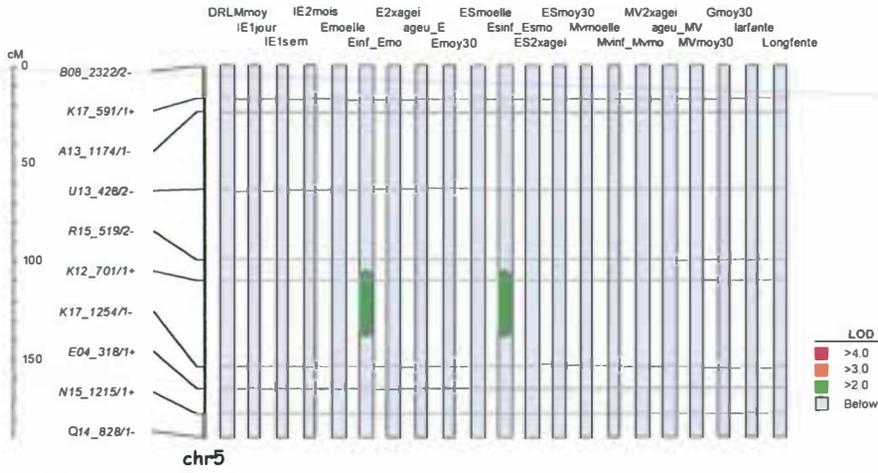
Propriétés mécaniques du bois

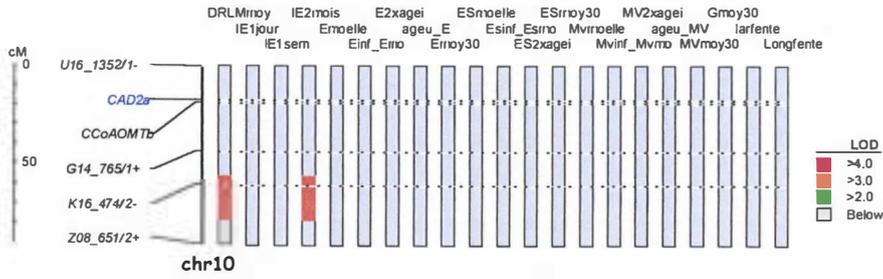


E. urophylla

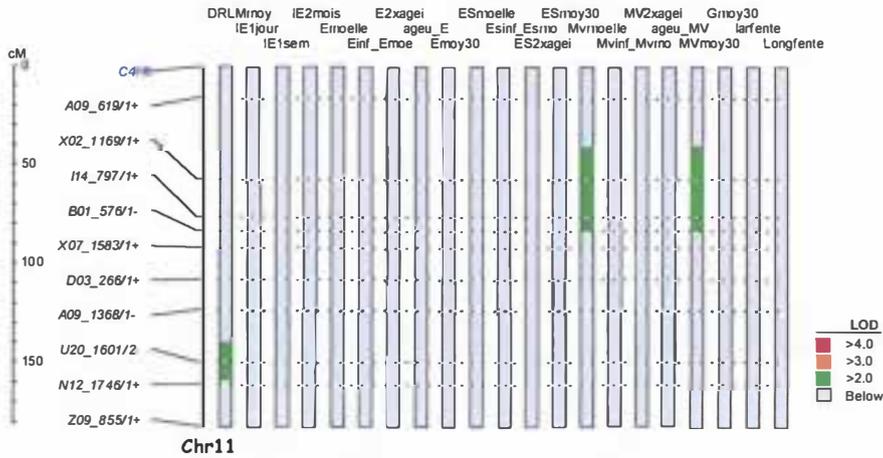


E. urophylla



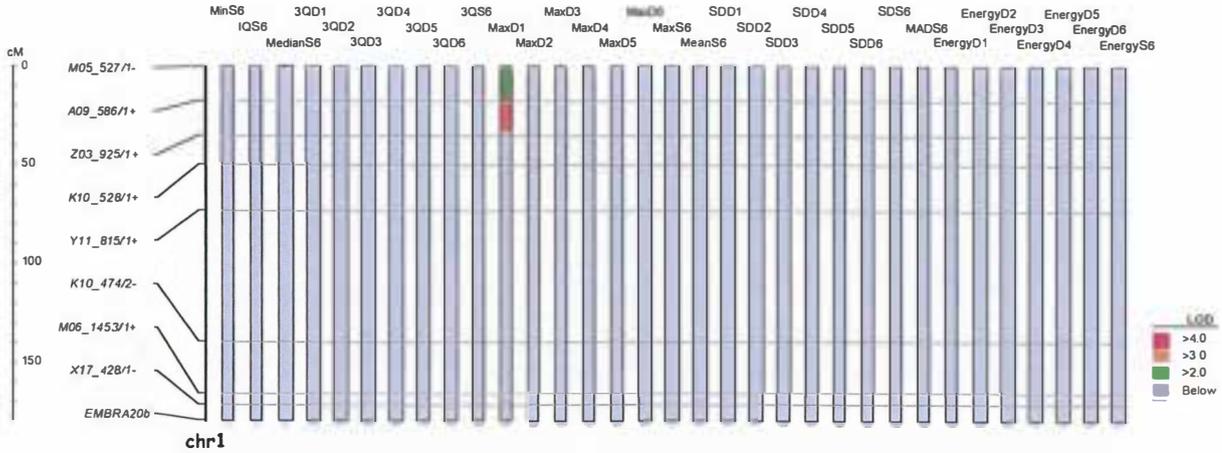


E. urophylla

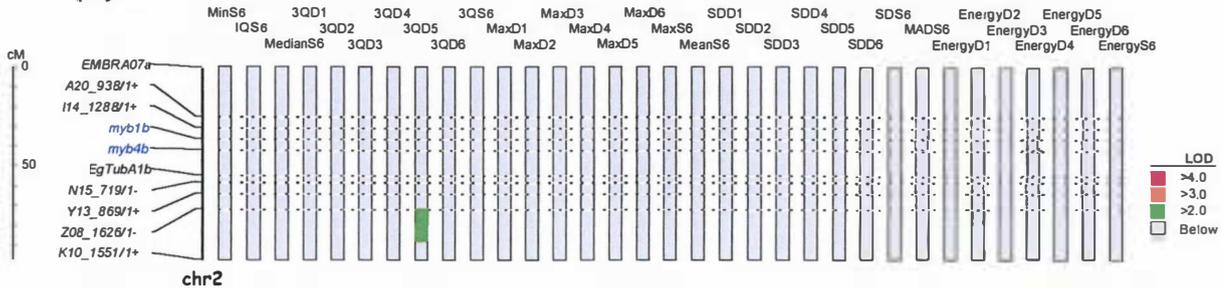


E. grandis

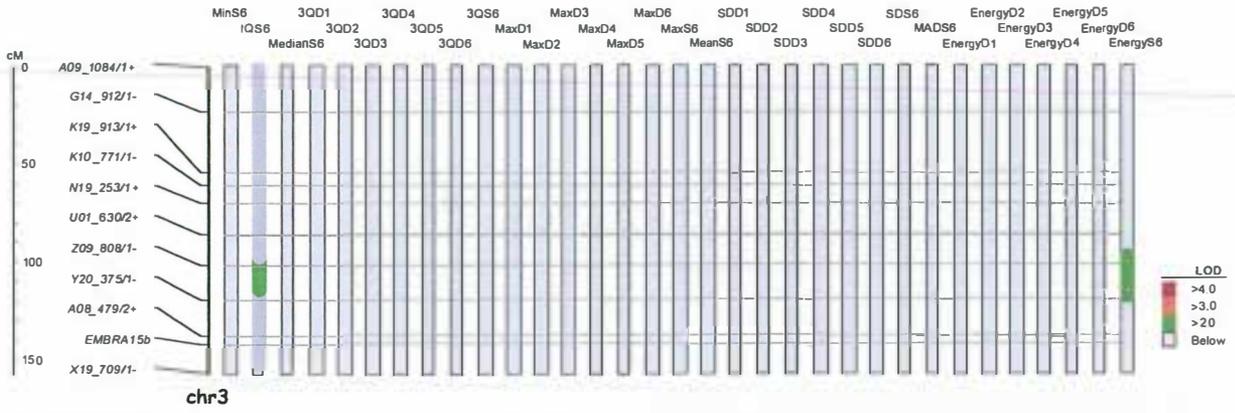
Variables d'infra-densité du bois



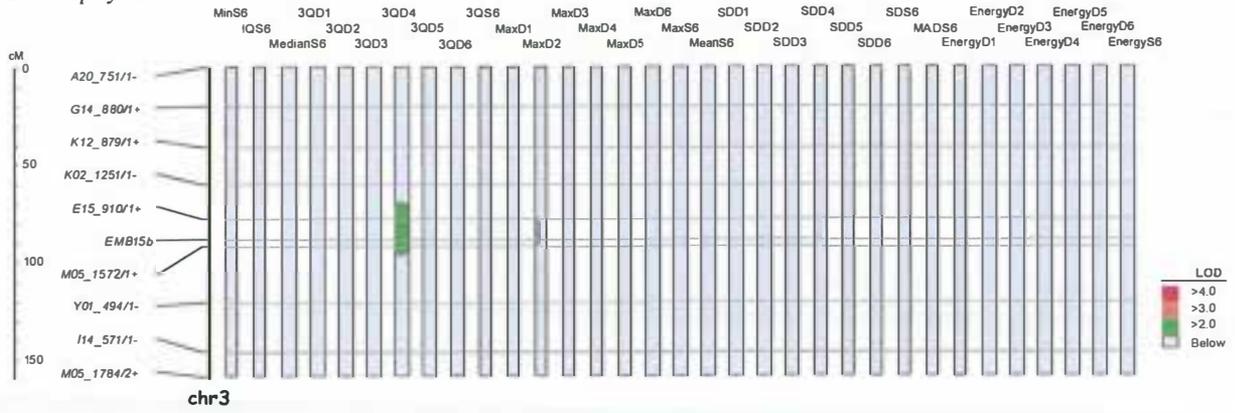
E. urophylla



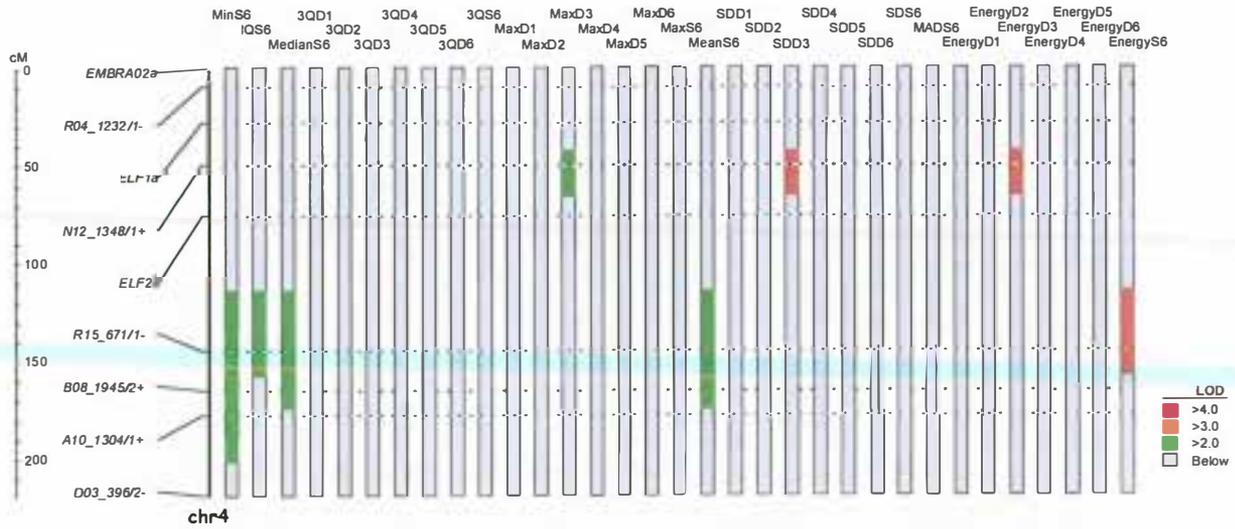
E. urophylla



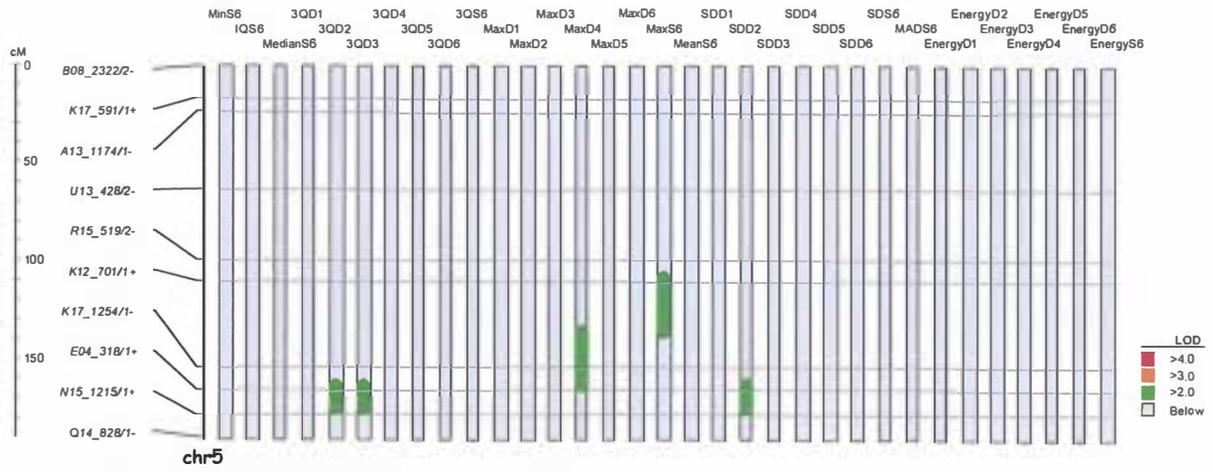
E. urophylla



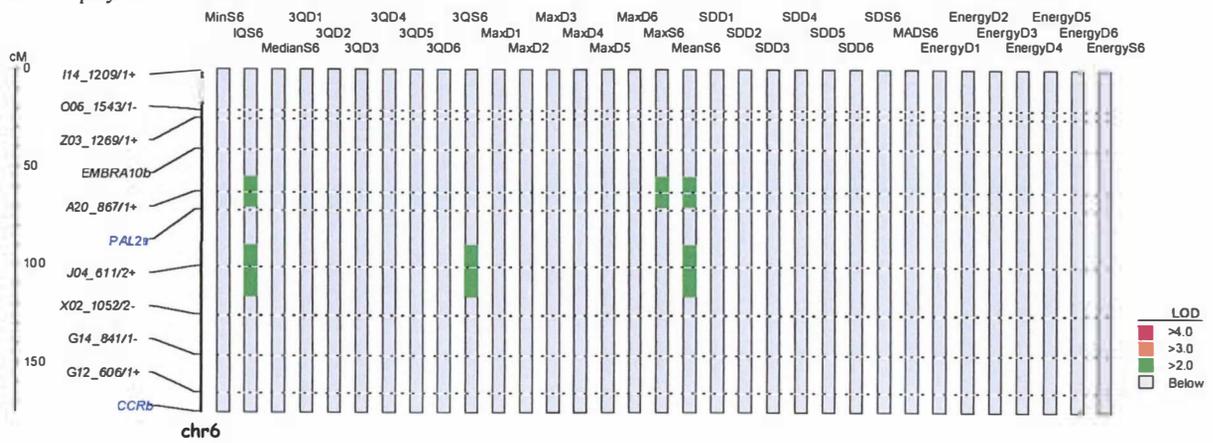
E. grandis



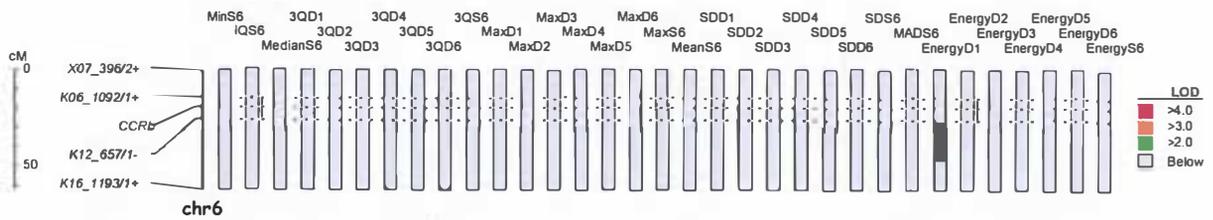
E. urophylla



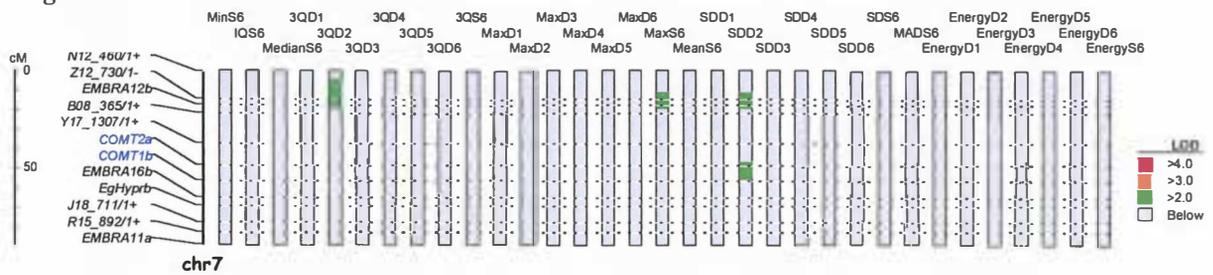
E. urophylla



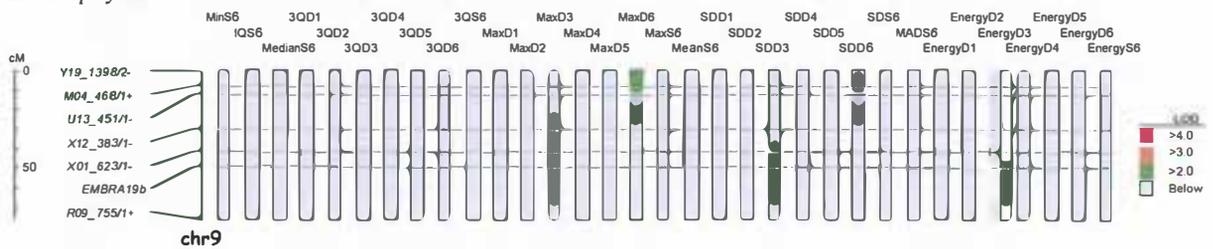
E. urophylla



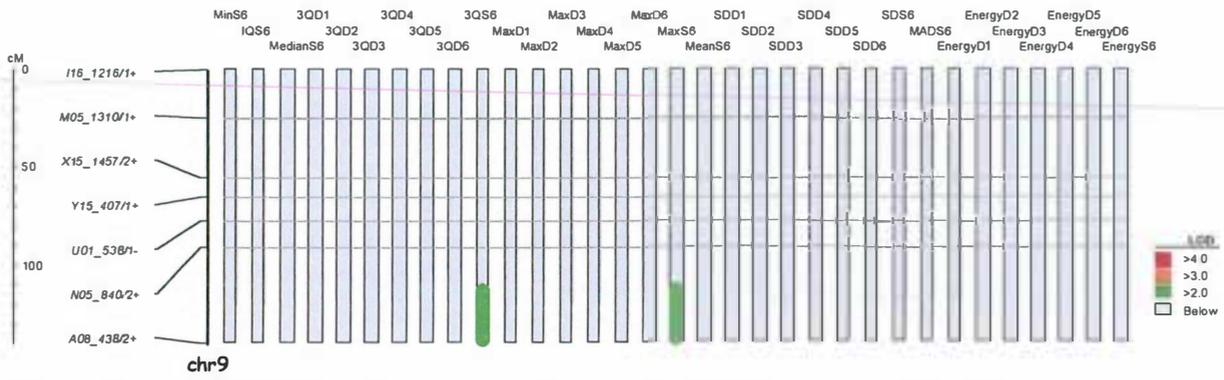
E. grandis



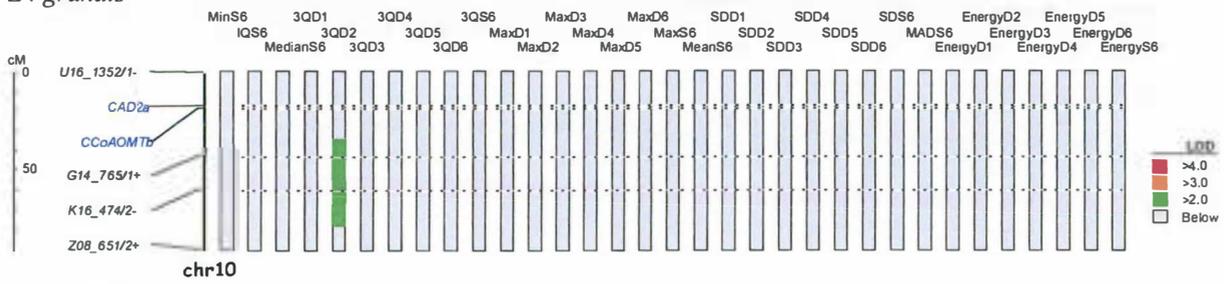
E. urophylla



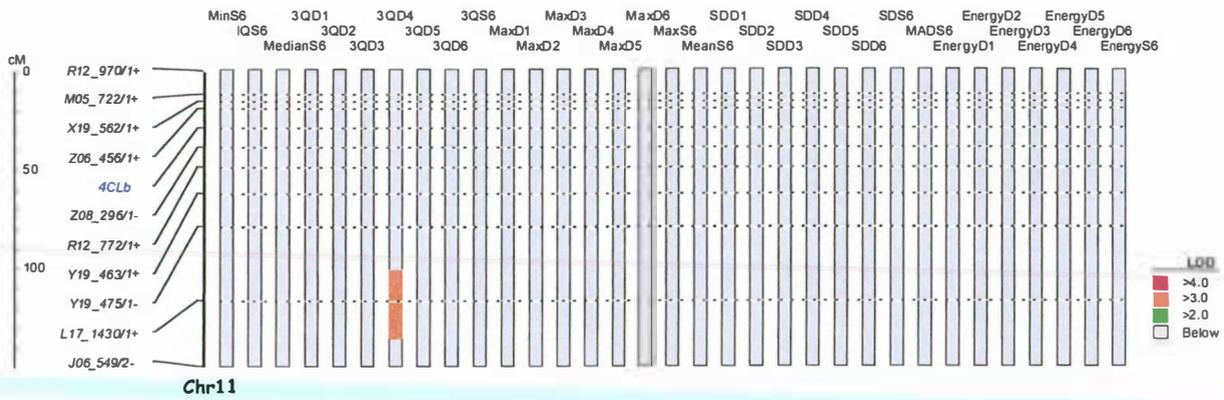
E. urophylla



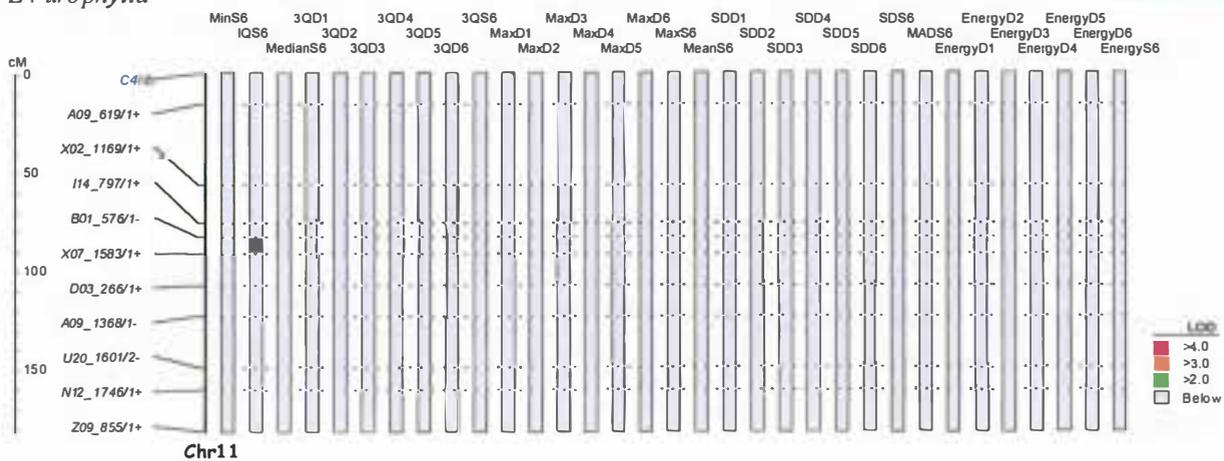
E. grandis



E. urophylla



E. urophylla



E. grandis

Annexe : Liste des caractères mesurés sur le pin maritime (arbres abattus en Mars 98)

caractères	partenaires	définition
TH97mes	INRA Pierroton	Hauteur totale mesurée en 1997
TH94mes	INRA Pierroton	Hauteur totale mesurée en 1994
circ97mes	INRA Pierroton	circonférence mesurée en 1997
circ94mes	INRA Pierroton	circonférence mesurée en 1994
pyleast	INRA Pierroton	mesure de l'enfoncement de l'aiguille du pylodin à 1.3m du sol (côté est)
pylwest	INRA Pierroton	mesure de l'enfoncement de l'aiguille du pylodin à 1.3m du sol (côté ouest)
meanpyl	INRA Pierroton	moyenne du pylodin
TH97	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 97
Hi97	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 97
TH96	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 96
Hi96	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 96
TH95	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 95
Hi95	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 95
TH94	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 94
Hi94	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 94
TH93	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 93
Hi93	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 93
TH92	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 92
Hi92	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 92
TH91	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 91
Hi91	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 91
TH90	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 90
Hi90	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 90
TH89	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 89
Hi89	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 89
TH88	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 88
Hi88	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 88
TH87	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 87
Hi87	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 87
TH86	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 86
Hi86	INRA Pierroton	accroissement en hauteur réalisé en 86
TH85	INRA Pierroton	hauteur totale mesurée après abattage en 85
La84	INRA Orléans	largeur des cernes en 84
Li84	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 84
Lf84	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 84
Do84	INRA Orléans	densité en 84
Di84	INRA Orléans	densité du bois initial en 84
Df84	INRA Orléans	densité du bois final en 84
Po84	INRA Orléans	masse des cernes en 84
Pi84	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 84
Pf84	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 84
Mi84	INRA Orléans	densité minimale en 84
Ma84	INRA Orléans	densité maximale en 84
Ei84	INRA Orléans	écarts types de la densité en 84
Ei84	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 84
Ef84	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 84
Co84	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 84
La85	INRA Orléans	largeur des cernes en 85
Li85	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 85
Lf85	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 85
Do85	INRA Orléans	densité en 85
Di85	INRA Orléans	densité du bois initial en 85
Df85	INRA Orléans	densité du bois final en 85
Po85	INRA Orléans	masse des cernes en 85
Pi85	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 85
Pf85	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 85
Mi85	INRA Orléans	densité minimale en 85
Ma85	INRA Orléans	densité maximale en 85
Ei85	INRA Orléans	écarts types de la densité en 85
Ei85	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 85
Ef85	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 85
Co85	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 85
La86	INRA Orléans	largeur des cernes en 86
Li86	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 86
Lf86	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 86
Do86	INRA Orléans	densité en 86
Di86	INRA Orléans	densité du bois initial en 86
Df86	INRA Orléans	densité du bois final en 86
Po86	INRA Orléans	masse des cernes en 86
Pi86	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 86
Pf86	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 86
Mi86	INRA Orléans	densité minimale en 86
Ma86	INRA Orléans	densité maximale en 86
Ei86	INRA Orléans	écarts types de la densité en 86
Ei86	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 86
Ef86	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 86
Co86	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 86
La87	INRA Orléans	largeur des cernes en 87
Li87	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 87
Lf87	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 87
Do87	INRA Orléans	densité en 87
Di87	INRA Orléans	densité du bois initial en 87
Df87	INRA Orléans	densité du bois final en 87
Po87	INRA Orléans	masse des cernes en 87
Pi87	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 87
Pf87	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 87
Mi87	INRA Orléans	densité minimale en 87
Ma87	INRA Orléans	densité maximale en 87
Ei87	INRA Orléans	écarts types de la densité en 87
Ei87	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 87

Ef87	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 87
Co87	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 87
La88	INRA Orléans	largeur des cernes en 88
Li88	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 88
Lf88	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 88
Do88	INRA Orléans	densité en 88
Di88	INRA Orléans	densité du bois initial en 88
Df88	INRA Orléans	densité du bois final en 88
Po88	INRA Orléans	masse des cernes en 88
Pi88	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 88
Pf88	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 88
Mi88	INRA Orléans	densité minimale en 88
Ma88	INRA Orléans	densité maximale en 88
Ei88	INRA Orléans	écarts types de la densité en 88
Ei88	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 88
Ef88	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 88
Co88	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 88
La89	INRA Orléans	largeur des cernes en 89
Li89	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 89
Lf89	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 89
Do89	INRA Orléans	densité en 89
Di89	INRA Orléans	densité du bois initial en 89
Df89	INRA Orléans	densité du bois final en 89
Po89	INRA Orléans	masse des cernes en 89
Pi89	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 89
Pf89	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 89
Mi89	INRA Orléans	densité minimale en 89
Ma89	INRA Orléans	densité maximale en 89
Ei89	INRA Orléans	écarts types de la densité en 89
Ei89	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 89
Ef89	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 89
Co89	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 89
La90	INRA Orléans	largeur des cernes en 90
Li90	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 90
Lf90	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 90
Do90	INRA Orléans	densité en 90
Di90	INRA Orléans	densité du bois initial en 90
Df90	INRA Orléans	densité du bois final en 90
Po90	INRA Orléans	masse des cernes en 90
Pi90	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 90
Pf90	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 90
Mi90	INRA Orléans	densité minimale en 90
Ma90	INRA Orléans	densité maximale en 90
Ei90	INRA Orléans	écarts types de la densité en 90
Ei90	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 90
Ef90	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 90
Co90	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 90
La91	INRA Orléans	largeur des cernes en 91
Li91	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 91
Lf91	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 91
Do91	INRA Orléans	densité en 91
Di91	INRA Orléans	densité du bois initial en 91
Df91	INRA Orléans	densité du bois final en 91
Po91	INRA Orléans	masse des cernes en 91
Pi91	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 91
Pf91	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 91
Mi91	INRA Orléans	densité minimale en 91
Ma91	INRA Orléans	densité maximale en 91
Ei91	INRA Orléans	écarts types de la densité en 91
Ei91	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 91
Ef91	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 91
Co91	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 91
La92	INRA Orléans	largeur des cernes en 92
Li92	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 92
Lf92	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 92
Do92	INRA Orléans	densité en 92
Di92	INRA Orléans	densité du bois initial en 92
Df92	INRA Orléans	densité du bois final en 92
Po92	INRA Orléans	masse des cernes en 92
Pi92	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 92
Pf92	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 92
Mi92	INRA Orléans	densité minimale en 92
Ma92	INRA Orléans	densité maximale en 92
Ei92	INRA Orléans	écarts types de la densité en 92
Ei92	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 92
Ef92	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 92
Co92	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 92
La93	INRA Orléans	largeur des cernes en 93
Li93	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 93
Lf93	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 93
Do93	INRA Orléans	densité en 93
Di93	INRA Orléans	densité du bois initial en 93
Df93	INRA Orléans	densité du bois final en 93
Po93	INRA Orléans	masse des cernes en 93
Pi93	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 93
Pf93	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 93
Mi93	INRA Orléans	densité minimale en 93
Ma93	INRA Orléans	densité maximale en 93
Ei93	INRA Orléans	écarts types de la densité en 93
Ei93	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 93
Ef93	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 93
Co93	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 93
La94	INRA Orléans	largeur des cernes en 94

Li94	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 94
Lf94	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 94
Do94	INRA Orléans	densité en 94
Di94	INRA Orléans	densité du bois initial en 94
Df94	INRA Orléans	densité du bois final en 94
Po94	INRA Orléans	masse des cernes en 94
Pi94	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 94
Pf94	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 94
Mi94	INRA Orléans	densité minimale en 94
Ma94	INRA Orléans	densité maximale en 94
Ei94	INRA Orléans	écarts types de la densité en 94
Ei94	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 94
Ef94	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 94
Co94	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 94
La95	INRA Orléans	largeur des cernes en 95
Li95	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 95
Lf95	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 95
Do95	INRA Orléans	densité en 95
Di95	INRA Orléans	densité du bois initial en 95
Df95	INRA Orléans	densité du bois final en 95
Po95	INRA Orléans	masse des cernes en 95
Pi95	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 95
Pf95	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 95
Mi95	INRA Orléans	densité minimale en 95
Ma95	INRA Orléans	densité maximale en 95
Ei95	INRA Orléans	écarts types de la densité en 95
Ei95	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 95
Ef95	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 95
Co95	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 95
La96	INRA Orléans	largeur des cernes en 96
Li96	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 96
Lf96	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 96
Do96	INRA Orléans	densité en 96
Di96	INRA Orléans	densité du bois initial en 96
Df96	INRA Orléans	densité du bois final en 96
Po96	INRA Orléans	masse des cernes en 96
Pi96	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 96
Pf96	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 96
Mi96	INRA Orléans	densité minimale en 96
Ma96	INRA Orléans	densité maximale en 96
Ei96	INRA Orléans	écarts types de la densité en 96
Ei96	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 96
Ef96	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 96
Co96	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 96
La97	INRA Orléans	largeur des cernes en 97
Li97	INRA Orléans	largeur des cernes (bois initial) en 97
Lf97	INRA Orléans	largeur des cernes (bois final) en 97
Do97	INRA Orléans	densité en 97
Di97	INRA Orléans	densité du bois initial en 97
Df97	INRA Orléans	densité du bois final en 97
Po97	INRA Orléans	masse des cernes en 97
Pi97	INRA Orléans	masse des cernes (bois initial) en 97
Pf97	INRA Orléans	masse des cernes (bois final) en 97
Mi97	INRA Orléans	densité minimale en 97
Ma97	INRA Orléans	densité maximale en 97
Ei97	INRA Orléans	écarts types de la densité en 97
Ei97	INRA Orléans	écarts types de la densité initiale en 97
Ef97	INRA Orléans	écarts types de la densité finale en 97
Co97	INRA Orléans	contrast (Ma-Mi) en 97
Hi8488	INRA Pierroton	moyenne des accroissements en hauteur de 84 à 88
La8488	INRA Orléans	largeur moyenne des cernes de 84 à 88
Li8488	INRA Orléans	largeur moyenne des cernes (bois initial) de 84 à 88
Lf8488	INRA Orléans	largeur moyenne des cernes (bois final) de 84 à 88
Do8488	INRA Orléans	densité moyenne de 84 à 88
Di8488	INRA Orléans	densité moyenne du bois initial de 84 à 88
Df8488	INRA Orléans	densité moyenne du bois final de 84 à 88
Po8488	INRA Orléans	masse moyenne des cernes de 84 à 88
Pi8488	INRA Orléans	masse moyenne des cernes (bois initial) de 84 à 88
Pf8488	INRA Orléans	masse moyenne des cernes (bois final) de 84 à 88
Mi8488	INRA Orléans	moyenne de la densité minimale de 84 à 88
Ma8488	INRA Orléans	moyenne de la densité maximale de 84 à 88
Ei8488	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité de 84 à 88
Ei8488	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité initiale de 84 à 88
Ef8488	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité finale de 84 à 88
Co8488	INRA Orléans	moyenne du contrast (Ma-Mi) de 84 à 88
Hi8993	INRA Pierroton	moyenne des accroissements en hauteur de 89 à 93
La8993	INRA Orléans	largeur moyenne des cernes de 89 à 93
Li8993	INRA Orléans	largeur moyenne des cernes (bois initial) de 89 à 93
Lf8993	INRA Orléans	largeur moyenne des cernes (bois final) de 89 à 93
Do8993	INRA Orléans	densité moyenne de 89 à 93
Di8993	INRA Orléans	densité moyenne du bois initial de 89 à 93
Df8993	INRA Orléans	densité moyenne du bois final de 89 à 93
Po8993	INRA Orléans	masse moyenne des cernes de 89 à 93
Pi8993	INRA Orléans	masse moyenne des cernes (bois initial) de 89 à 93
Pf8993	INRA Orléans	masse moyenne des cernes (bois final) de 89 à 93
Mi8993	INRA Orléans	moyenne de la densité minimale de 89 à 93
Ma8993	INRA Orléans	moyenne de la densité maximale de 89 à 93
Ei8993	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité de 89 à 93
Ei8993	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité initiale de 89 à 93
Ef8993	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité finale de 89 à 93
Co8993	INRA Orléans	moyenne du contrast (Ma-Mi) de 89 à 93
Hi9497	INRA Pierroton	moyenne des accroissements en hauteur de 94 à 97
La9497	INRA Orléans	largeur moyenne des cernes de 94 à 97

Lf9497	INRA Orléans	largeur moyenne des cernes (bois initial) de 94 à 97
Lf9497	INRA Orléans	largeur moyenne des cernes (bois final) de 94 à 97
Do9497	INRA Orléans	densité moyenne de 94 à 97
Di9497	INRA Orléans	densité moyenne du bois initial de 94 à 97
Df9497	INRA Orléans	densité moyenne du bois final de 94 à 97
Po9497	INRA Orléans	masse moyenne des cernes de 94 à 97
Pi9497	INRA Orléans	masse moyenne des cernes (bois initial) de 94 à 97
Pf9497	INRA Orléans	masse moyenne des cernes (bois final) de 94 à 97
Mi9497	INRA Orléans	moyenne de la densité minimale de 94 à 97
Ma9497	INRA Orléans	moyenne de la densité maximale de 94 à 97
Ei9497	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité de 94 à 97
Ei9497	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité initiale de 94 à 97
Ef9497	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité finale de 94 à 97
Co9497	INRA Orléans	moyenne du contraste (Ma-Mi) de 94 à 97
La14	INRA Orléans	moyenne de largeur de cerne pour les âges cambiaux 1 à 4
Li14	INRA Orléans	moyenne de largeur de cerne initiale pour les âges cambiaux 1 à 4
Lf14	INRA Orléans	moyenne de largeur de cerne finale pour les âges cambiaux 1 à 4
Do14	INRA Orléans	moyenne de la densité pour les âges cambiaux 1 à 4
Di14	INRA Orléans	moyenne de la densité initiale pour les âges cambiaux 1 à 4
Df14	INRA Orléans	moyenne de la densité finale pour les âges cambiaux 1 à 4
Po14	INRA Orléans	moyenne de la masse pour les âges cambiaux 1 à 4
Pi14	INRA Orléans	moyenne de la masse initiale pour les âges cambiaux 1 à 4
Pf14	INRA Orléans	moyenne de la masse finale pour les âges cambiaux 1 à 4
Mi14	INRA Orléans	moyenne de la densité minimale pour les âges cambiaux 1 à 4
Ma14	INRA Orléans	moyenne de la densité maximale pour les âges cambiaux 1 à 4
Ei14	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité pour les âges cambiaux 1 à 4
Ei14	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité initiale pour les âges cambiaux 1 à 4
Ef14	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité finale pour les âges cambiaux 1 à 4
Co14	INRA Orléans	Moyenne du contraste (Ma-Mi) pour les âges cambiaux 1 à 4
La59	INRA Orléans	moyenne de largeur de cerne pour les âges cambiaux 5 à 9
Li59	INRA Orléans	moyenne de largeur de cerne initiale pour les âges cambiaux 5 à 9
Lf59	INRA Orléans	moyenne de largeur de cerne finale pour les âges cambiaux 5 à 9
Do59	INRA Orléans	moyenne de la densité pour les âges cambiaux 5 à 9
Di59	INRA Orléans	moyenne de la densité initiale pour les âges cambiaux 5 à 9
Df59	INRA Orléans	moyenne de la densité finale pour les âges cambiaux 5 à 9
Po59	INRA Orléans	moyenne de la masse pour les âges cambiaux 5 à 9
Pi59	INRA Orléans	moyenne de la masse initiale pour les âges cambiaux 5 à 9
Pf59	INRA Orléans	moyenne de la masse finale pour les âges cambiaux 5 à 9
Mi59	INRA Orléans	moyenne de la densité minimale pour les âges cambiaux 5 à 9
Ma59	INRA Orléans	moyenne de la densité maximale pour les âges cambiaux 5 à 9
Ei59	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité pour les âges cambiaux 5 à 9
Ei59	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité initiale pour les âges cambiaux 5 à 9
Ef59	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité finale pour les âges cambiaux 5 à 9
Co59	INRA Orléans	Moyenne du contraste (Ma-Mi) pour les âges cambiaux 5 à 9
La1014	INRA Orléans	moyenne de largeur de cerne pour les âges cambiaux 10 à 14
Li1014	INRA Orléans	moyenne de largeur de cerne initiale pour les âges cambiaux 10 à 14
Lf1014	INRA Orléans	moyenne de largeur de cerne finale pour les âges cambiaux 10 à 14
Do1014	INRA Orléans	moyenne de la densité pour les âges cambiaux 10 à 14
Di1014	INRA Orléans	moyenne de la densité initiale pour les âges cambiaux 10 à 14
Df1014	INRA Orléans	moyenne de la densité finale pour les âges cambiaux 10 à 14
Po1014	INRA Orléans	moyenne de la masse pour les âges cambiaux 10 à 14
Pi1014	INRA Orléans	moyenne de la masse initiale pour les âges cambiaux 10 à 14
Pf1014	INRA Orléans	moyenne de la masse finale pour les âges cambiaux 10 à 14
Mi1014	INRA Orléans	moyenne de la densité minimale pour les âges cambiaux 10 à 14
Ma1014	INRA Orléans	moyenne de la densité maximale pour les âges cambiaux 10 à 14
Ei1014	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité pour les âges cambiaux 10 à 14
Ei1014	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité initiale pour les âges cambiaux 10 à 14
Ef1014	INRA Orléans	moyenne des écarts types de la densité finale pour les âges cambiaux 10 à 14
Co1014	INRA Orléans	Moyenne du contraste (Ma-Mi) pour les âges cambiaux 10 à 14
rendkappa30	Afocel	rendement en pale à kappa 30
kappa30	Afocel	kappa obtenu pour cuisson théorique à kappa30
rendajkappa30	Afocel	rendement en pale à kappa 30 ajusté au kappa réel obtenu
rendkappa40	Afocel	rendement en pale à kappa 40
kappa40	Afocel	kappa obtenu pour cuisson théorique à kappa 40
rendajkappa40	Afocel	rendement en pale à kappa 40 ajusté au kappa réel obtenu
longk30	Afocel	longueur des fibres à Kappa30
longarlk30	Afocel	longueur arithmétique des fibres à kappa 30
largk30	Afocel	largeur des fibres à kappa 30
maslink30	Afocel	masse linéique des fibres à kappa 30
souplk30	Afocel	souplesse des fibres à kappa 30
Ewaterafocel	Afocel	extrait à l'eau AFOCEL
Eacetonafocel	Afocel	extrait à l'acétone AFOCEL
Elotafocel	Afocel	extrait total AFOCEL
lignklasonboisextafocel	AFOCEL	lignine klason
lignirafocel	AFOCEL	lignine mesuré par NIR
Breakinglength	AFOCEL	résistance de la pâte, mesure du breaking length
Zerospan	AFOCEL	résistance de la pâte, mesure au Zero span
Ewaterisa	ISA	extrait à l'eau ISA
Eacetonisa	ISA	extrait à l'acétone ISA
Elotalisa	ISA	extrait total ISA
lignklasonboisextisa	ISA	lignine klason
lignfinsa	ISA	lignine mesuré par FTIR
lignirisa	ISA	lignine mesurée par NIR
alphacel	ISA	taux d'alpha cellulose
hemichel	ISA	taux d'hémicellulose
lignklasontot	AFOCEL + ISA	lignine klason
Hper	IP	p hydroxyphénylpropane (% de bois extrait)
Gper	IP	galacyl (% de bois extrait)
Honc	IP	concentration en unité H (µmol/g de lignine)
Honc	IP	concentration en unité G (µmol/g de lignine)
H/G	IP	rapport H/G (% de bois extrait)
MA9LW	BOKU	angle des microfibrilles (degré) mesuré dans le cerne n°9 du bois final, en partant du coeur (moyenne de 40 mesures)
MA4LW	BOKU	angle des microfibrilles (degré) mesuré dans le cerne n°4 du bois final, en partant du coeur (moyenne de 40 mesures)

CWR4EW	BOKU	épaisseur de la paroi des trachéides initiales du cerne n°4 (moyenne de 40 mesures radiales)
LDR4EW	BOKU	diamètre du lumen des trachéides initiales du cerne n°4 (moyenne de 40 mesures radiales)
CWT4EW	BOKU	épaisseur de la paroi des trachéides initiale du cerne n°4 (moyenne de 40 mesures tangentiellles)
LDT4EW	BOKU	diamètre du lumen des trachéides initiales du cerne n°4 (moyenne de 40 mesures tangentiellles)
CWR4LW	BOKU	épaisseur de la paroi des trachéides finales du cerne n°4 (moyenne de 40 mesures radiales)
LDR4LW	BOKU	diamètre du lumen des trachéides finales du cerne n°4 (moyenne de 40 mesures radiales)
CWT4LW	BOKU	épaisseur de la paroi des trachéides finales du cerne n°4 (moyenne de 40 mesures tangentiellles)
LDT4LW	BOKU	diamètre du lumen des trachéides finales du cerne n°4 (moyenne de 40 mesures tangentiellles)
CWR9EW	BOKU	épaisseur de la paroi des trachéides initiales du cerne n°9 (moyenne de 40 mesures radiales)
LDR9EW	BOKU	diamètre du lumen des trachéides initiales du cerne n°9 (moyenne de 40 mesures radiales)
CWT9EW	BOKU	épaisseur de la paroi des trachéides initiale du cerne n°9 (moyenne de 40 mesures tangentiellles)
LDT9EW	BOKU	diamètre du lumen des trachéides initiales du cerne n°9 (moyenne de 40 mesures tangentiellles)
CWR9LW	BOKU	épaisseur de la paroi des trachéides finales du cerne n°9 (moyenne de 40 mesures radiales)
LDR9LW	BOKU	diamètre du lumen des trachéides finales du cerne n°9 (moyenne de 40 mesures radiales)
CWT9LW	BOKU	épaisseur de la paroi des trachéides finales du cerne n°9 (moyenne de 40 mesures tangentiellles)
LDT9LW	BOKU	diamètre du lumen des trachéides finales du cerne n°9 (moyenne de 40 mesures tangentiellles)
SDMA4LW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'angle des microfibrilles du cerne n°4 dans le bois final
SDMA9LW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'angle des microfibrilles du cerne n°9 dans le bois final
SDCWR4EW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'épaisseur de la paroi des trachéides initiales du cerne n°4 (radial)
SDLDR4EW	BOKU	moyenne de l'écart type du diamètre du lumen des trachéides initiales du cerne n°4 (radial)
SDCWT4EW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'épaisseur de la paroi des trachéides initiales du cerne n°4 (tangentiell)
SDLDT4EW	BOKU	moyenne de l'écart type du diamètre du lumen des trachéides initiales du cerne n°4 (tangentiell)
SDCWR4LW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'épaisseur de la paroi des trachéides finales du cerne n°4 (radial)
SDLDR4LW	BOKU	moyenne de l'écart type du diamètre du lumen des trachéides finales du cerne n°4 (radial)
SDCWT4LW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'épaisseur de la paroi des trachéides finales du cerne n°4 (tangentiell)
SDLDT4LW	BOKU	moyenne de l'écart type du diamètre du lumen des trachéides finales du cerne n°4 (tangentiell)
SDCWR9EW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'épaisseur de la paroi des trachéides initiales du cerne n°9 (radial)
SDLDR9EW	BOKU	moyenne de l'écart type du diamètre du lumen des trachéides initiales du cerne n°9 (radial)
SDCWT9EW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'épaisseur de la paroi des trachéides initiales du cerne n°9 (tangentiell)
SDLDT9EW	BOKU	moyenne de l'écart type du diamètre du lumen des trachéides initiales du cerne n°9 (tangentiell)
SDCWR9LW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'épaisseur de la paroi des trachéides finales du cerne n°9 (radial)
SDLDR9LW	BOKU	moyenne de l'écart type du diamètre du lumen des trachéides finales du cerne n°9 (radial)
SDCWT9LW	BOKU	moyenne de l'écart type de l'épaisseur de la paroi des trachéides finales du cerne n°9 (tangentiell)
SDLDT9LW	BOKU	moyenne de l'écart type du diamètre du lumen des trachéides finales du cerne n°9 (tangentiell)

1. Stratégie d'échantillonnage et de mesures technologiques de terrain pour l'eucalyptus

2. Phase exploratoire : analyse des corrélations et recherche des caractéristiques pertinentes pour la sélection génétique

2.1. *Caractéristiques rhéologiques*

- 2.1.1. Choix du sous échantillon
- 2.1.2. Déformations résiduelles longitudinales de maturation
- 2.1.3. Observation et mesures des fentes en bout de billon
- 2.1.4. Mesure de l'énergie de rupture ($G_{F,I}$) sur des éprouvettes à l'état vert
 - 2.1.4.1. Essai de fissilité
 - 2.1.4.2. Echantillonnage
 - 2.1.4.3. Description du dispositif
- 2.1.5. Mesure des constantes élastiques
 - 2.1.5.1. Echantillonnage
 - 2.1.5.2. Description de la machine d'essai
- 2.1.6. Module d'élasticité longitudinal et densité
 - 2.1.6.1. Echantillonnage
 - 2.1.6.2. Méthode de détermination du module d'élasticité longitudinal
- 2.1.7. Infradensité
 - 2.1.7.1. Echantillonnage
 - 2.1.7.2. Méthode de mesure

2.2. *Résultats sur les caractéristiques rhéologiques*

- 2.2.1. Déformations résiduelles longitudinales de maturation
- 2.2.2. Modules d'élasticité longitudinal et de cisaillement - densité
 - 2.2.2.1. Module d'élasticité longitudinal
 - 2.2.2.2. Comparaison des modules $E_{Lv}(TL)$ et $E_{Lv}(RL)$
 - 2.2.2.3. Comparaison entre le module d'élasticité longitudinal déterminé sur bois sec et sur bois vert
 - 2.2.2.4. Variation radiale du module d'élasticité longitudinal sur bois vert et bois sec
- 2.2.3. Densité et Infradensité
 - 2.2.3.1. Variation de la densité et l'infradensité en fonction de la distance à la moelle
 - 2.2.3.2. Relation entre l'infradensité et la densité
- 2.2.4. Relation entre le module d'élasticité longitudinal et l'infradensité ou la densité
 - 2.2.4.1. Relation entre le module d'élasticité longitudinal déterminé sur bois vert et l'infradensité
 - 2.2.4.2. Relation entre le module spécifique du bois sec et la densité
- 2.2.5. Relation entre le module d'élasticité longitudinal et les DRLM
- 2.2.6. Variation radiale des modules de cisaillement G_{TL} et G_{RL} obtenus sur du bois vert
- 2.2.7. Conclusion

2.3. *Autres constantes élastiques*

- 2.3.1. Résultats

2.3.2. Comparaison entre modules d'élasticité longitudinaux obtenus par compression statique et par méthode acoustique

2.3.3. Variation des constantes élastiques en fonction de l'infradensité

2.3.4. Relations entre modules

2.4. Énergie de rupture

2.4.1. Variation radiale de l'énergie de rupture

2.4.2. Relation entre le niveau des DRLM et l'énergie de rupture

2.4.3. Variation radiale de la force maximale et de la rigidité apparente

2.5. Conclusions

3. Caractéristiques physico-chimiques : utilisation de la spectrophotométrie proche infrarouge

3.1. Principe de la mesure

3.2. Principe de l'étalonnage

3.3. Développement des calibrations pour les caractéristiques physico-chimiques sur échantillons broyés

3.4. Développement des calibrations pour les caractéristiques physico-mécaniques sur échantillons massifs

3.4.1. Matériel utilisé : NIRSystems 5000 (Foss/Perstorp)

3.4.2. Technique de développement d'une calibration

3.4.2.1. Construction de la population : analyse en composantes principales (ACP).

3.4.2.2. La calibration à proprement dit

3.4.2.2.1. Méthode de régression : comment déterminer les coefficients « b ».

3.4.2.2.2. Critères de jugement de la qualité d'une calibration

3.4.2.2.3.

Ecart type de validation croisée SECV

3.4.2.2.4. Validation d'un modèle

3.4.3. Échantillonnage

3.4.3.1. Découpe des échantillons de bois.

3.4.3.2. Marquage des échantillons

3.4.3.3. Conservation des échantillons.

3.4.3.4. Sélection des échantillons pour la calibration.

3.4.4. Méthodes de mesure

3.4.4.1. Le retrait

3.4.4.1.1. introduction

3.4.4.1.2. Définition

3.4.4.1.3. Matériel utilisé

3.4.4.1.4. Figure 42 : dispositif de mesure du retrait

3.4.4.1.5. Principe de la mesure avec un capteur Laser

3.4.4.1.6. Manipulation

3.4.4.1.7. Séchage des échantillons

3.4.4.1.8. Analyse des valeurs obtenues

3.4.4.1.9. Corrélations entre les trois retraits.

3.4.4.2. Le gonflement

3.4.4.2.1. Introduction

- 3.4.4.2.2. Définition et matériel utilisé
- 3.4.4.2.3. Estimation de l'erreur de mesure.
- 3.4.4.2.4. Analyse des valeurs obtenues
- 3.4.4.3. Le module d'élasticité
- 3.4.4.4. La densité
 - 3.4.4.4.1. Estimation de l'incertitude commise sur la détermination de la densité.(SEL)
 - 3.4.4.4.2. Etude des valeurs obtenues.
- 3.4.5. Méthode d'acquisition des spectres proches infrarouges
 - 3.4.5.1. Introduction
 - 3.4.5.2. Mesure
 - 3.4.5.2.1. réglage du spectromètre.
 - 3.4.5.2.2. manipulation.
 - 3.4.5.3. Analyse spectrale
- 3.4.6. Traitement des données spectrales et résultats de calibration.
 - 3.4.6.1. Traitement des données spectrales avant la calibration.
 - 3.4.6.2. Traitement mathématique.
 - 3.4.6.3. Analyse des populations spectrales : ACP.
 - 3.4.6.4. Calibration des propriétés mesurées.
- 3.4.7. Analyse des calibrations
- 3.4.8. Prédiction des caractéristiques.

3.5. Conclusions sur la spectrométrie proche infrarouge

4. Extraction systématique des caractéristiques technologiques destinées à la cartographie génétique

4.1. Fentes en bout

- 4.1.1. Typologie
- 4.1.2. Corrélation avec le niveau de DRLM

4.2. Caractéristiques chimiques (taux d'extrait)

4.3. Caractéristiques physico-mécaniques

- 4.3.1. Matériels et méthodes
 - 4.3.1.1. Mesure de la cinétique de croissance radiale des arbres
 - 4.3.1.2. Méthode d'échantillonnage au sein de l'arbre
 - 4.3.1.3. Caractérisation des propriétés technologiques
 - 4.3.1.4. Mesures in situ
 - 4.3.1.4.1. Déformation résiduelle longitudinale de maturation (DRLM)
 - 4.3.1.4.2. Proportions de fentes
 - 4.3.1.5. Mesures après coupe sur échantillons
 - 4.3.1.5.1. Masse volumique à l'état saturé
 - 4.3.1.5.2. Module d'élasticité à l'état saturé
 - 4.3.1.5.3. Module spécifique à l'état saturé
 - 4.3.1.6. Méthode pour le calcul de la distribution continue des propriétés
 - 4.3.1.7. Principe de l'approximation polynomiale de $Y=f(X)$ par une méthode MCR
 - 4.3.1.8. Application à la détermination de la courbe de croissance continue
 - 4.3.1.9. Application à l'identification de la distribution radiale des propriétés
 - 4.3.1.10. Interprétation de la variation des propriétés avec l'âge cambial

4.4. Résultats et discussions

- 4.4.1. Exemples typiques de distribution continues des propriétés technologiques au sein d'un arbre
 - 4.4.1.1. Module d'élasticité (E)
 - 4.4.1.2. Masse volumique (ρ)
 - 4.4.1.3. Module spécifique (E/ ρ)
 - 4.4.1.4. Evaluation des différentes sources de variabilité des propriétés technologiques au sein de la population d'étude
 - 4.4.1.5. Paramétrisation des variations des propriétés technologiques au cours du fonctionnement du cambium (paramètres endogènes)
- 4.4.2. Variation des paramètres au sein d'une population de plein frères
 - 4.4.2.1. Distribution des paramètres endogènes
 - 4.4.2.2. Étude de la colinéarité des paramètres
- 4.4.3. Définition des critères endogènes pour l'identification de marqueurs génétiques contrôlant la variation des propriétés technologiques
- 4.4.4. Analyse du problème technologique de fentes en bout à l'aide des distributions endogènes des propriétés technologiques

4.5. Conclusions et perspectives

5. Bibliographie

6. Publications

7. Mémoires de fin d'études

Résumé « court »

Les espèces du genre *Eucalyptus* exploitées en culture intensive sont en règle générale valorisée par les industries de trituration. Cependant le potentiel technologique et commerciale de certains génotypes oriente le marché vers une production de plus en plus significative de bois de service et de bois d'œuvre. En conséquence la diversité des usages implique une sélection génétique basée sur de nombreux critères technologiques d'intérêt industriel du domaine de la morphologie, de la chimie, de la physiques et de la mécanique. L'étude conduite dans le cadre du projet a donc consistée à caractériser des propriétés technologiques d'intérêt selon quatre phases :

1. Échantillonnage : définition d'un protocole d'échantillonnage adapté à la caractérisation de chaque arbre
2. Exploratoire : détermination sur un sous-échantillon des propriétés pertinentes pour le typage systématique des arbres du plan d'expérience
3. Méthodologique : développement et analyse d'une méthode d'estimation rapide, non destructive et peu coûteuse des caractéristiques physico-chimiques du bois
4. Typage de tous les individus du plan d'expérience.

L'échantillon de 204 arbres provenant d'une famille hybride de plein frères a permis d'identifier les propriétés les plus intéressantes pour le typage de tous les individus : contraintes de croissance, fentes en bout, densité, module d'élasticité, taux d'extrait, taux de lignines, proportion relative des monomères de lignines. Parallèlement une méthode d'évaluation rapide basée sur la spectrophotométrie proche infrarouge a été développée et analysée afin de permettre un typage plus rapide et/ou plus précis de chaque individu. Les résultats obtenus prouvent l'intérêt de ce type d'approche en génétique quantitative où un très grand nombre de données phénotypiques sont nécessaires.

Compte tenu de la forte variabilité intra-arbre des propriétés du bois une nouvelle approche non déterministe et non paramétrique a été utilisée pour interpréter les mesures intra-arbre, issues des 1161 éprouvettes prélevées, sous la forme de distributions continues et régulières dans le temps et dans l'espace. Les résultats montrent que la variabilité intra-arbre et notamment la variation radiale des propriétés est 3 fois supérieure à la variabilité inter-arbres. Ce dernier résultat justifie la prise en compte des contraintes de variabilité internes des propriétés technologiques dans les programmes d'amélioration génétique. L'étude de la distribution continue d'autres propriétés technologiques telles que le retrait au séchage n'a pas été réalisée par manque de temps et de disponibilité des moyens. En effet le développement des méthodes de calibrations et leur validation a nécessité plus temps que prévu car ce travail n'a à notre connaissance jamais été entrepris. Une longue phase de mise au point était donc nécessaire. L'équation de calibration obtenue pour le retrait tangentiel en fin de projet nous permet de caractériser l'ensemble des échantillons. Cette opération sera réalisée dans les prochains mois en même temps que les dosages des sucres afin de compléter la banque de données technologiques tout à fait originale qui sera très utile pour les travaux futurs que nous conduirons avec nos partenaires du projet. Les analyses des distributions radiales feront l'objet d'un partenariat scientifique avec l'INRA d'Orléans où des méthodes d'analyses complémentaires sont développées. L'utilisation de la SPIR fait déjà l'objet d'une coopération scientifique avec l'équipe du CNRS de Toulouse.

Résumé « long »

La caractérisation des propriétés technologiques d'intérêt a été réalisée selon les quatre phases définies dans le projet initial :

1. Échantillonnage : définition d'un protocole d'échantillonnage adapté à la caractérisation de chaque arbre
2. Exploratoire : détermination sur un sous-échantillon des propriétés pertinentes pour le typage systématique des arbres du plan d'expérience
3. Méthodologique : développement et analyse d'une méthode d'estimation rapide, non destructive et peu coûteuse des caractéristiques physico-chimiques du bois
4. Typage de tous les individus du plan d'expérience.

La campagne de récolte des arbres du plan croisement a été réalisé de Février à Mars 1998 sur des descendants hybrides de la deuxième génération issus d'un croisement interspécifique *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* provenant du programme d'amélioration génétique des eucalyptus mené par le CIRAD au Congo. La famille de plein-frères est issue du croisement des individus 14-144 x 9-21. Les arbres étaient âgés de 59 mois au moment du prélèvement en 1998. A la plantation les parcelles étudiées contenaient 224 arbres soit une parcelle de 160 arbres et 4 parcelles de 16 arbres chacune. Lors des prélèvements 20 arbres étaient morts. D'où un prélèvement total de 204 arbres.

L'étude des constantes élastiques du tenseur des complaisances a permis de constater que la densité et le module d'élasticité longitudinal sont de bons estimateurs de l'ensemble des constantes élastiques. Les analyses ont montré aussi des corrélations plus au moins fortes entre le module tangentiel et certaines constantes élastiques. Sur le matériel végétal étudié, aucune relation n'a été mise en évidence entre le niveau des déformations résiduelles longitudinales de maturation et le module d'élasticité longitudinal.

L'ouverture des fentes à cœur est causée par une sur-tension tangentielle occasionnée par une découpe transverse. La fissilité matérielle dans le plan de faiblesse naturel RL, estimée par la mesure de la ténacité $G_{F,I}$, est un paramètre clef pour l'analyse des fentes radiales. Une variation radiale de $G_{F,I}$ n'a pas été mise en évidence, bien que certains individus présentent des variations marquées. De même, aucune relation significative n'a été observée entre le niveau des déformations résiduelles de maturation et la fissilité $G_{F,I}$. Enfin il ne semble pas y avoir d'effet arbre marqué malgré le choix d'un échantillon dont la proportion de fentes en bout est contrastée. Nous retiendrons donc de cette analyse préliminaire que les caractéristiques qui présentent un intérêt pour la sélection génétique au sein de la famille étudiée sont la DRLM, la densité et le module d'élasticité longitudinal.

La spectrophotométrie dans le proche infrarouge s'est révélée particulièrement intéressante pour la prédiction des caractéristiques chimiques (taux d'extrait, lignine de Klason, ratio S/G) avec précision suffisante. Son utilisation peut être généralisée à l'ensemble de la famille hybride. Pour les caractéristiques physiques et mécaniques son utilisation s'est révélée peu satisfaisante hormis pour le module d'élasticité et éventuellement pour le retrait tangentiel. L'utilisation d'un spectromètre de type « industriel » munit d'une fibre optique n'est pas une solution optimale pour la prédiction des caractéristiques physiques et mécaniques dans le cadre d'une évaluation quantitative sur des individus issus d'une même famille de plein frères.

La variation intra-arbre de trois propriétés technologiques (module d'élasticité, masse volumique et module spécifique à l'état saturé) du bois, au sein de 204 arbres issus d'une population de plein frères d'eucalyptus hybrides, a été étudiée à partir de mesures de croissance radiale et des mesures sur des éprouvettes appartenant à un même plateau diamétral. Une approche nouvelle non déterministe et non paramétrique a été utilisée pour interpréter les mesures, issues des 1161 éprouvettes prélevées, sous la forme de distributions continues et régulières dans le temps et dans l'espace. La méthode basée sur des approximations polynomiales (polynômes de Hermite de degrés variables) identifiées à l'aide d'une méthode des moindres carrés régularisée (recherche de maximum de vraisemblance) a montré une robustesse importante même en présence d'un faible nombre d'échantillons, d'échantillons dissymétriques ou d'incertitude sur les mesures.

L'allure sigmoïdale de la variation des propriétés technologiques au cours du temps a été utilisée pour paramétrer le fonctionnement du cambium en termes de mise en place de propriétés. Les paramètres endogènes et indépendants retenus sont l'âge cambial à la fin de la période de latence et au point d'inflexion, les propriétés à la moelle, au point d'inflexion et au double de l'âge au point d'inflexion. Le caractère régulier des distributions a en outre permis le calcul du module d'élasticité et de la contrainte de croissance périphériques. Ces caractéristiques ont permis de mettre en évidence deux domaines de valeurs des paramètres précédents ($20 \leq C_p \leq 25$ Mpa et $110 \leq dE/dr_{\max} \leq 120$ Gpa/m⁻¹ ; $27 \leq C_p \leq 32$ Mpa et $200 \leq dE/dr_{\max} \leq 250$ Gpa/m⁻¹) pour les quels l'indice d'éclatement est maximum.

Par ailleurs, les résultats montrent que la variabilité intra arbre et notamment la variation radiale des propriétés est 3 fois supérieure à la variabilité inter arbres. Ce dernier résultat justifie la prise en compte des contraintes de variabilité internes des propriétés technologiques

dans les programmes d'amélioration génétique. Les paramètres endogènes ainsi que la propriété globale de l'arbre à 40 mois sont retenus pour la recherche des QTL contrôlant la variation des propriétés technologiques du bois. Les résultats sont analysés par le laboratoire de génétique forestière de l'INRA de Bordeaux et par le programme « arbres et plantations » (Amélioration génétique et création variétale).

L'étude de la distribution continue d'autres propriétés technologiques telles que le retrait au séchage n'a pas été réalisée par manque de temps et de disponibilité des moyens. En effet le développement des méthodes de calibrations et leur validation a nécessité plus temps que prévu car ce travail n'a à notre connaissance jamais été entrepris. Une longue phase de mise au point était donc nécessaire. L'équation de calibration obtenue pour le retrait tangentiel en fin de projet nous permet de caractériser l'ensemble des échantillons. Cette opération sera réalisée dans les prochains mois en même temps que les dosages des sucres afin de compléter la banque de données technologiques tout à fait originale qui sera très utile pour les travaux futurs que nous conduirons avec nos partenaires du projet.

1. Stratégie d'échantillonnage et de mesures technologiques de terrain pour l'eucalyptus

La campagne de récolte des arbres du plan croisement a été réalisé de Février à Mars 1998 sur des descendants hybrides de la deuxième génération issus d'un croisement interspécifique *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* provenant du programme d'amélioration génétique des eucalyptus mené par le CIRAD au Congo. La famille de plein-frères est issue du croisement des individus 14-144 x 9-21. Les arbres étaient âgés de 59 mois au moment du prélèvement en 1998. A la plantation les parcelles étudiées contenaient 224 arbres soit une parcelle de 160 arbres et 4 parcelles de 16 arbres chacune. Lors des prélèvements 20 arbres étaient morts. D'où un prélèvement total de 204 arbres. Sur ces 204 arbres il faut noter que 5 arbres n'ont pas subis toutes les mensurations au moment du prélèvement car l'ADN n'a pas pu être extraite sur ces individus (voir ANNEXE 1).

Les mesures réalisées au moment de la récolte sur les arbres sur pied sont les suivantes :

Caractéristiques	Nom de la variable
Mesure de la hauteur totale	HT
Circonférence à 1,30 m	C 1,3
Nombre de grandes branches	GB
Nombre de petites branches	PB
Rectitude	R
Fourche	F
Pilodyn sur écorce	Pil sur
Pilodyn sous écorce	Pil sous

Le **Tableau 1** récapitule la dimension des arbres étudiés en termes de mesures de hauteurs et de circonférences à 1.3m sur écorce lors de l'abattage des arbres des arbres.

	Effectif	Minimum (cm)	Maximum (cm)	Moyenne (cm)	Ecart type (cm)	Coefficient de variation (%)
H ₅₉	199	1150	2800	2256.28	218.17	9.67
C ₅₉	199	28	78	54.02	8.54	15.81

Tableau 1: Distribution de la hauteur (H) et de la circonférence © des arbres étudiés à l'âge de 59 mois

La faible valeur du coefficient de variation (tableau 1) montre une croissance homogène en hauteur et en circonférence. La variation du diamètre est plus forte.

Au moment de l'abattage les mesures suivantes ont été relevées :

Caractéristiques	Nom de la variable
Mesure de la hauteur totale abattu	HT abattu
Mesure de la hauteur totale commerciale	HT com
Cubage tous les 2 mètres	Cir 0....cir 22

Trois heures après l'abattage les mesures de fentes en bout (gros bout et fin bout) sont relevées sur 3 billons de 3 mètres sur chaque arbre (204 au total), repéré par rapport à, la hauteur commerciale (hauteur au diamètre de 8 cm) :

- Le billon de pied de 0 à 3 m,
- Le billon noté A centré sur la moitié de la hauteur commerciale,
- Le billon noté B dont le fin bout correspond à la hauteur commerciale.

La mesure des fentes en bout permet de définir un indice d'éclatement (IE) défini par :

$$IE = \frac{\sum \text{longueur totale des fentes observées sur la coupe transversale et sur la périphérie du billon}}{\text{Diamètre de la section}}$$

Les billons ont été ensuite badigeonné de Cryptogyl.

Une semaine après l'abattage, les mesures de **Déformations Résiduelles Longitudinales de Maturation (DRLM)** ont été réalisées sur les billons de pied. L'estimation de cette caractéristique intrinsèque de l'arbre permet d'évaluer les efforts internes supportés par le bois des arbres sur pied. La libération de ces contraintes dites «contraintes de croissance» entraînent lors de l'abattage des effets indésirables tels que l'apparition des fentes et la déformation des planches.

La DRLM est mesurée en 8 points numérotés à partir de l'axe Nord dans le sens anti-horaire (figure 1).

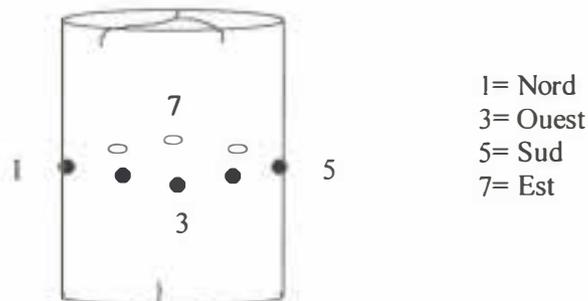


Figure 1 : Distribution angulaire des mesures de DRLM à la périphérie de l'arbre

La DRLM est estimée à l'aide d'un capteur développé par le CIRAD (Mariaux, 1983, Archer, 1986) dont le principe métrologique est basé sur la méthode du trou unique connue en métallurgie. Le principe physique s'appuie sur la mesure de variation de distance entre 2 pointes distantes de 45 mm enfoncées à 10 mm dans le bois, après perçage d'un trou central de 20 mm de diamètre.

Les mesures de fentes en bout ont été réalisées de nouveau sur tous les billons. A la suite de cette opération les billons ont été aspergés de Cryptogyl et stockés dans un conteneur étanche pour être expédiés de Pointe Noire à Montpellier.

Environ 2 mois après l'expédition les mesures de fentes en bout ont été réalisés à Montpellier sur les billons de pied. Les autres billons pour des raisons de place dans le conteneur ont été tronçonnés avant l'expédition pour avoir une longueur maximale de 1 m. Cette longueur n'est pas compatible avec la mesure des fentes en bout puisque la libération du champ de contrainte de croissance affecte alors tout le billon et perturbe la propagation des fentes en bout.

Les billons de pied ont ensuite été sciés pour produire un plateau diamétral (de 1.5m de long sur 40 mm d'épaisseur) et des dosses contenant les mesures de DRLM. La profondeur

et la largeur des fentes observées ont été mesurés sur les plateaux. Les planches sont prélevées dans une direction Nord-Sud, correspondant à l'axe des mesures de DRLM 1 et 5. Cette méthodologie permet de s'appuyer sur une mesure localisée qui correspond à une région où les « déformations de maturation » sont mesurées.

A partir des plateaux, des découpes et des prélèvements ont été réalisés sur les 204 arbres de l'étude. Notons que 8 arbres n'ont pas fait l'objet de mesure en raison de leur très petite dimension ce qui réduit la population d'étude à 191 arbres. Les prélèvements et mesures réalisés sur ces plateaux sont représentés à la Figure 2. et sont détaillés ci-dessous :

- (A) Niveau des mesures des déformations longitudinales de maturation (*DRLM*).
- (B) Mesures des longueurs des fentes transversales et débouchantes, une semaine et un mois après abattage, réalisées sur les billons de base de $1,50\text{ m}$ de long.
- (C) Prélèvement d'un plateau à proximité de la couronne des mesures de *DRLM* duquel on prélève systématiquement sur un diamètre des éprouvettes pour les mesures d'énergie de rupture, de dimensions $R=24\text{ mm}$, $T=40\text{ mm}$ et $L=40\text{ mm}$.
- (D) Prélèvement d'un plateau duquel on extrait des "bras" de $R=24\text{ mm}$, $T=40\text{ mm}$ et $L=120\text{ mm}$, utilisés pour la fabrication des éprouvettes d'énergie de rupture.
- (E) Des éprouvettes, au nombre de 3 à 8, de dimensions constantes ($40\text{ cm} \times 40\text{ mm} \times 20\text{ mm}$), sont prélevées sur le plateau diamétral à la hauteur de coupe de $1,30\text{ m}$. Cette dimension a été adoptée afin de concilier la pertinence de l'information avec la qualité du travail à réaliser. Ces éprouvettes servent pour les essais au "Bing" (méthode acoustique pour la détermination des modules d'élasticité).
- (F) Prélèvement d'un plateau de 200 mm de long, duquel on extrait des éprouvettes pour les tests de compression statique en vue de déterminer les différentes constantes élastiques de la matrice de rigidité.
- (G) Prélèvement d'un barreau diamétral pour l'analyse microdensitométrique (INRA Orléans).

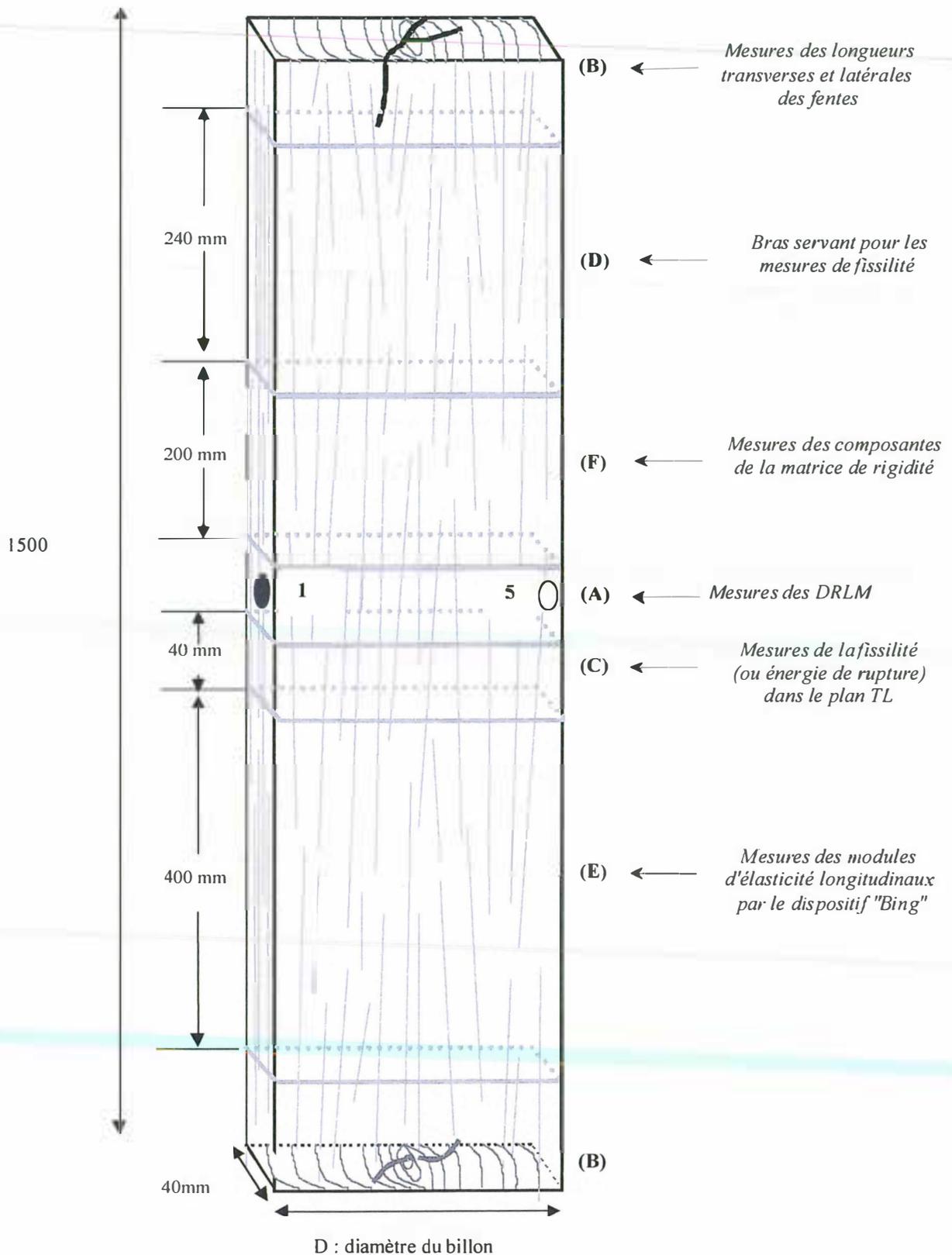


Figure 2 : plans des différents premiers prélèvements sur une planche

Sur les billons prélevés à mi-hauteur de la hauteur commerciale 1 disque a été prélevé pour être broyé afin de procéder aux analyses chimiques. Un autre disque épais a été prélevé pour la réalisation des mesures des caractéristiques papetières (AFOCEL).

Pour la phase exploratoire des sous échantillons ont été créés : un premier pour l'analyse des corrélations entre propriétés et la calibration de certaines propriétés par spectrophotométrie proche infrarouge, et un second pour l'étude des propriétés rhéologiques du matériaux.

Les différents prélèvements réalisés sur les arbres sur la tige de l'arbre sont récapitulés aux Figures 3 et 4.

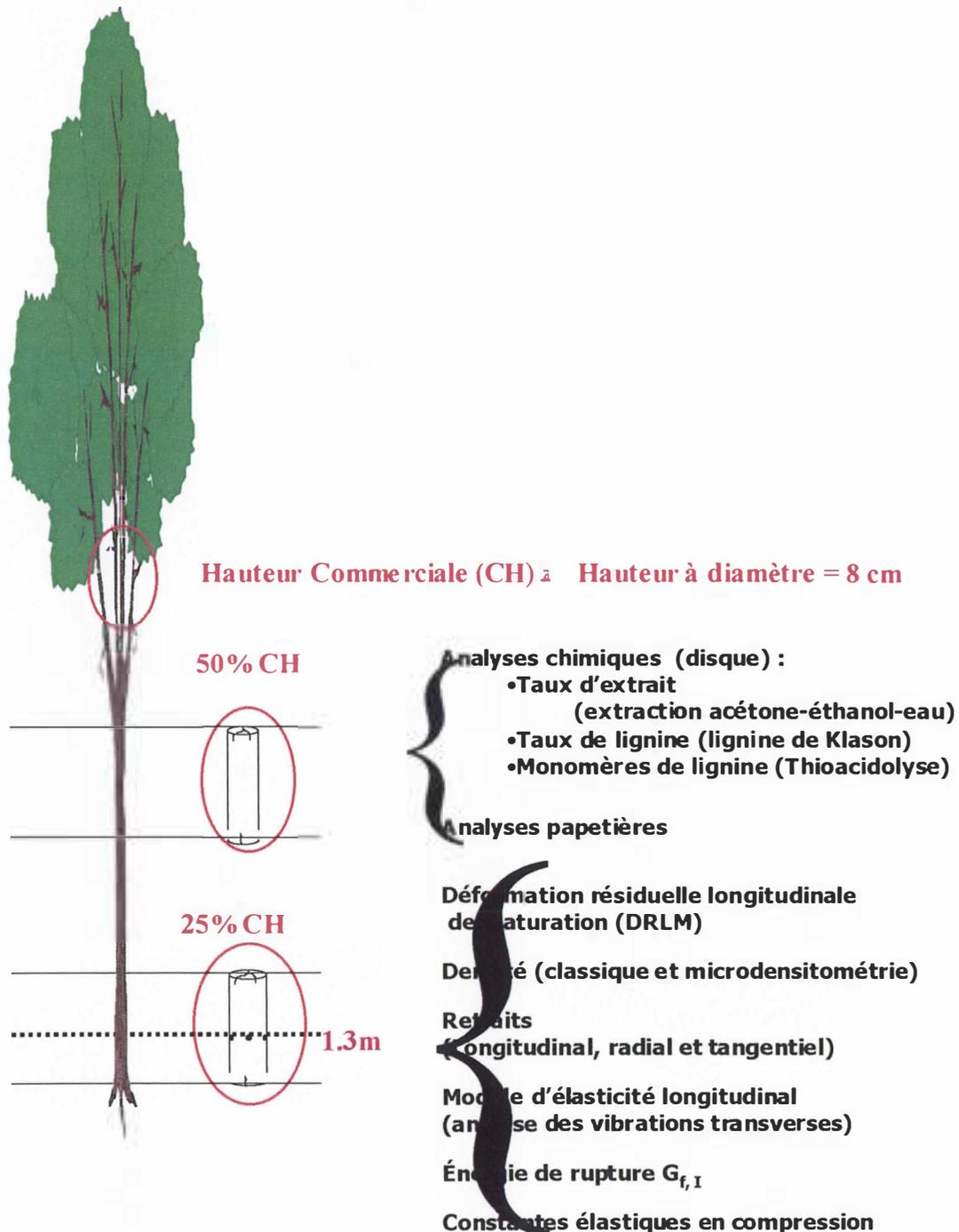


Figure 3 : Hauteurs de prélèvements pour les différentes mesures technologiques

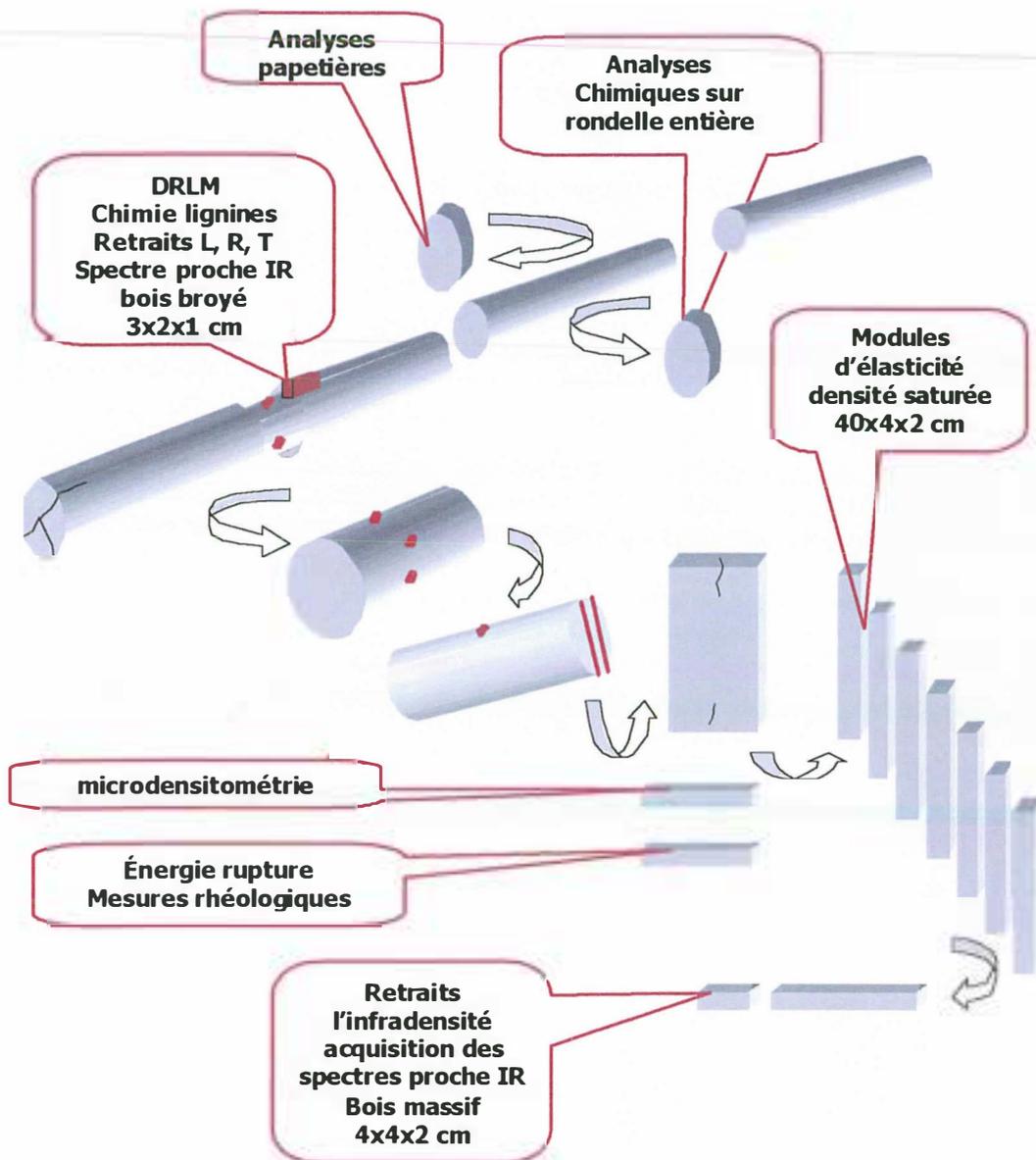


Figure 4 : description des différents types d'échantillons prélevés

2. Phase exploratoire : analyse des corrélations et recherche des caractéristiques pertinentes pour la sélection génétique

SAR4.7 : caractérisation rhéologique de fibres d'eucalyptus : phase exploratoire (P2)

SAR6.2 : chez l'eucalyptus (P1, 2, 5), piloté par P2

Au cours de cette phase d'étude l'objectif est d'une part de rechercher des corrélations pertinentes entre les différentes caractéristiques technologiques étudiées pour n'en retenir qu'un petit nombre pour la recherche de QTL, d'autre part de s'assurer d'une variabilité inter-arbre suffisante permettant la sélection dans la population étudiée et enfin d'étudier la possibilité d'exploiter la spectrophotométrie dans le proche infrarouge pour améliorer en temps et en coût la récolte des données.

2.1. Caractéristiques rhéologiques

2.1.1. Choix du sous échantillon

Afin de rechercher les caractéristiques rhéologiques impliquées dans la formation des fentes en bout autres que le niveau des déformations périphériques de déformation, nous avons choisi d'une part des planches issues d'arbres présentant de fortes valeurs de *DRLM* avec un indice d'éclatement soit faible soit fort et d'autre part des planches issues d'arbres présentant de faibles valeurs de *DRLM* avec un indice d'éclatement fort et faible. Afin de couvrir tous les cas possibles, nous avons complété la sélection en choisissant des planches issues d'arbres présentant des valeurs moyennes de *DRLM* avec un indice d'éclatement fort, moyen et faible.

Le tableau ci-dessous récapitule les arbres sélectionnés, leur circonférence et les *DRLM* mesurées à une hauteur de 1.40 m ainsi que leur indice d'éclatement.

N° d'arbre	C _i (cm)	IE	DRLM (µm)								DRLM Moy
			1	2	3	4	5	6	7	8	
37	46,3	3,56	58	73	67	74	65	57	59	77	66
91	48,0	0,52	61	48	69	68	59	55	62	47	59
136	48,8	0,77	97	55	142	84	271	/	22	75	149
189	57,5	0,85	61	58	165	109	59	73	57	53	79
192	63,8	0,80	85	49	59	68	48	53	46	58	58
193	54,5	2,1	42	64	88	168	165	56	72	74	91
223	54,0	0,91	62	80	107	/	195	95	67	69	96

Tableau 2 : Description des arbres : circonférence, indice d'éclatement et DRLM

C_i : circonférence de l'arbre mesurée à 1.40 m du sol

IE : moyenne des indices d'éclatements des deux bouts du billon

1, 2, 3.....8 : positions des mesures de DRLM sur une couronne à 1.40 m

Drlm moy : la moyenne des mesures de DRLM par arbre

2.1.2. Déformations résiduelles longitudinales de maturation

Afin d'estimer le niveau et le caractère plus ou moins équilibré de ces contraintes de croissance en périphérie de l'arbre nous avons utilisé la procédure expérimentale du "trou unique" développé au CIRAD Forêt (FOURNIER et al. 1994 ; GERARD 1994 ; BAILLERES 1994). Cette méthode consiste à mesurer le déplacement instantané relatif de deux pointes fixées à la surface écorcée de l'arbre, suite au perçage d'un trou entre les deux pointes. Le déplacement résulte de la modification du champ de contrainte provoquée par l'usinage du trou et peut donc être relié aux déformations bloquées dans l'arbre (Figure 5)

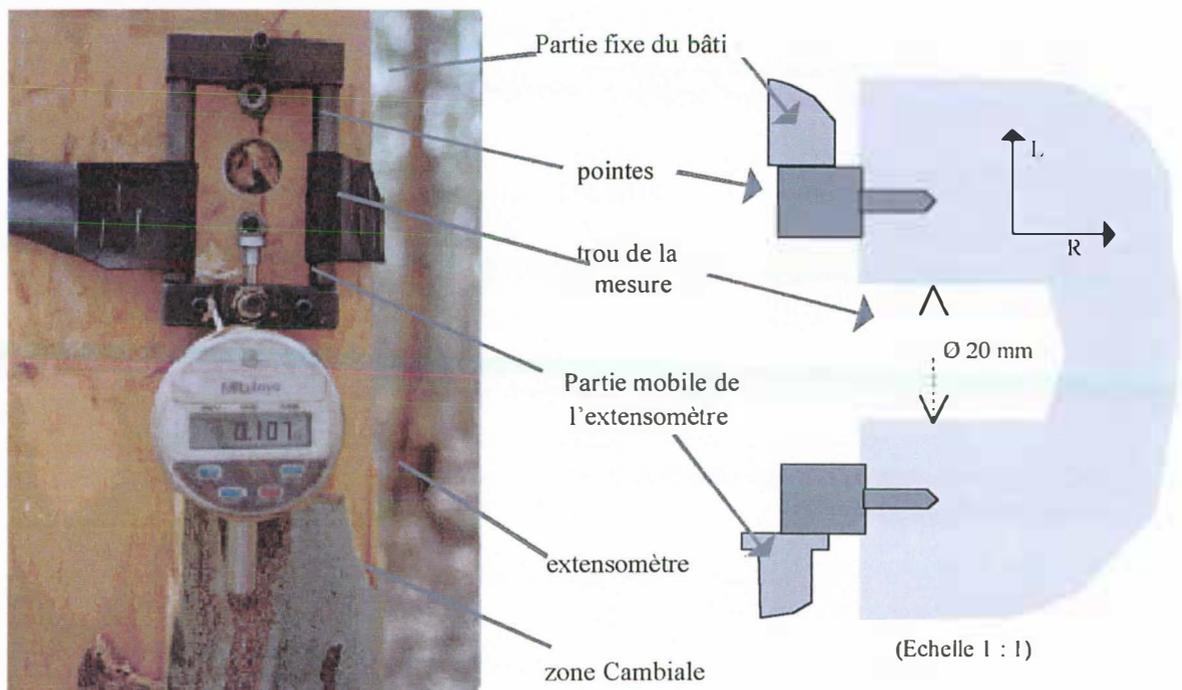


Figure 5 : Photo et description schématique de la mesure des déformations résiduelles longitudinales de maturation par la méthode du trou unique développée au CIRAD-Forêt, (d'après SASSUS 1998).

Avant perçage, les deux pointes sont distantes de $D=45 \text{ mm}$, le trou percé à égale distance des deux pointes a un diamètre de 20 mm . Les deux pointes sont alignées suivant la direction des fibres, car nous nous intéressons aux déformations dans la direction longitudinale. Un gabarit permet de positionner les pointes et de centrer le perçage. Le déplacement relatif δ est donné par un comparateur à lecture digitale avec une résolution de l'ordre du micron (marque MITUTOYO ; type Digimatic IDC ; référence 543-170B ; précision $3 \mu\text{m}$; capacité 12 mm) ; la mesure est enregistrée dès que le comparateur indique une valeur stable alors que le forage se poursuit. La stabilisation a lieu pour une profondeur de trou variant entre 10 mm et 20 mm . Le déplacement intègre la tension à la surface du bois enlevé et les caractéristiques du bois restant sur pied (SASSUS 1998). Toutefois ce déplacement obtenu en μm ne correspond pas directement à une déformation. Il est nécessaire, pour le relier à une déformation résiduelle exprimée en μdef (soit 10^{-6}), de le multiplier par un facteur ψ dépendant principalement du

diamètre du trou, de la distance entre les deux pointes et des rapports d'anisotropie élastique dans le plan tangentiel TL (E_T/E_L , G_{TL}/E_L et $1/\nu_{TL}$).

En négligeant la contribution de la contrainte tangentielle devant la contrainte longitudinale, on peut estimer la déformation résiduelle longitudinale ε_L^m par : $\varepsilon_L^m = -\Psi_{Th} \delta$ (ARCHER 1986 ; BAILLERES et al. 1994).

Dans le cas des *Eucalyptus*, on estime ce facteur à 12 (BAILLERES 1994). Mais pour simplifier nous désignerons par la suite par *DRLM*, la mesure brute.

2.1.3. Observation et mesures des fentes en bout de billon

Environ une semaine puis deux mois après abattage et à proximité de la couronne de mesures des *DRLM*, un relevé systématique des longueurs des fentes a été effectué sur les deux bouts des billons de base. Ce relevé a été réalisé, sur les 200 arbres de l'échantillonnage congolais de manière à noter la position des directions des fentes par rapport à celles des mesures de *DRLM*.

Les tableaux ci-dessous présentent les résultats des mesures de longueurs de fentes transverses et fentes débouchantes obtenues sur les fins bouts des 7 arbres choisis :

N° d'arbr e	Fente transverse – Fin bout																
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
37							66										55
91				90					75								53
136							30						30				
189					40				40								53
192				42			58					45					
193	70						62			65				78			
223			59									55					

Tableau 3 : Longueurs radiales (mm) de fentes transverses mesurées sur les faciès des fins bouts des billons de base après un mois d'abattage. 1, 2, ... 8 correspondent aux positions des mesures des *DRLM*

N° d'arbr e	Fente latérale (débouchante) – Fin bout															
	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5
37																
91				120						140						
136																
189																
192																
193	115						85			140				78		
223																

Tableau 4 : Longueurs latérales (mm) des fentes débouchantes mesurées du côté des fins bouts des billons de base après un mois d'abattage. Les positions 1, 2, ...8 correspondent aux positions des mesures des DRLM

2.1.4. Mesure de l'énergie de rupture ($G_{F,i}$) sur des éprouvettes à l'état vert

On a vu au chapitre 1 que les observations montrent que les fentes se développent principalement dans le plan LR . Ceci s'explique par le fait que la composante tangentielle du champ de précontraintes est particulièrement élevée près du cœur. Une propagation de fissure en mode I, à priori est valable. On rappelle qu'un tel mode de propagation de fissure se caractérise par un déplacement des deux lèvres de la fissure, l'une par rapport à l'autre, perpendiculairement au plan de la fissure, contrairement au mode II et III où les déplacements s'effectuent dans le plan de propagation de fissure (propagation en cisaillement) (Figure 6)

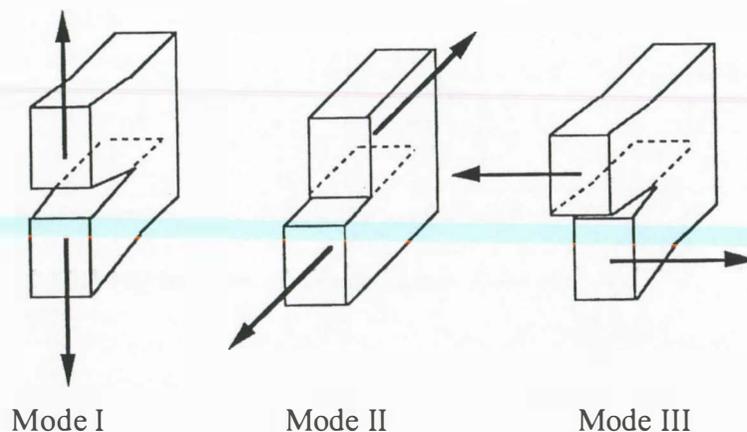


Figure 6 : Différents modes de fissuration : MODE I-II-III

2.1.4.1. Essai de fissilité

L'essai de fissilité ou de ténacité, a été réalisé sur la base de la méthode décrite par GUSTAFSSON et LARSEN (1990, cité dans BAILLERES 1994). Il s'agit d'une flexion trois points, réalisée sur une éprouvette pré-entaillée dont les dimensions sont proportionnelles à celles préconisées par les même auteurs. Elle a été réalisée à partir de trois éléments maintenus à l'état vert (Figure 7).

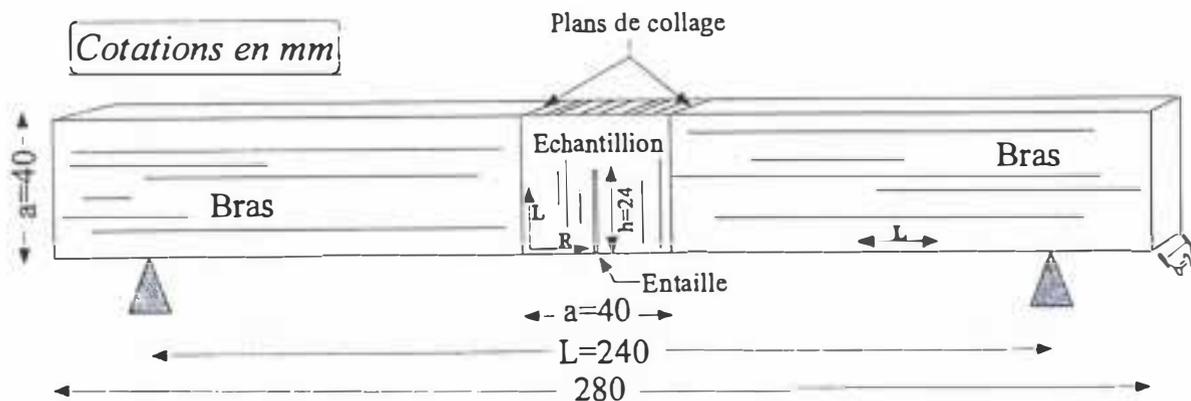


Figure 7 : Eprouvette de l'essai de fissilité

2.1.4.2. Echantillonnage

L'élément central est prélevé systématiquement de part et d'autre du diamètre selon une évolution diamétrale à quelques centimètres de la couronne des mesures des *DRLM* (zone (C) de la Figure 3.2). Il a pour dimension $R = 24 \text{ mm}$, $T = 40 \text{ mm}$ et $L = 40 \text{ mm}$. Il comporte une entaille, réalisée par une petite scie circulaire, de 24 mm de profondeur en *TL* selon la notation adoptée en mécanique de la rupture (le 1^{er} indice indique la direction orthogonale au plan de la fissure et le 2^{ème} la direction de propagation de la fissure).

Les deux éléments latéraux appelés "bras", de dimension $R = 24 \text{ mm}$, $T = 40 \text{ mm}$ et $L = 120 \text{ mm}$, sont aussi à l'état vert. Ils donnent à l'éprouvette une dimension suffisante pour réaliser un essai de flexion trois points. Et ils servent de support pour tenir l'élément central des deux côtés à l'aide d'une colle adaptée aux bois verts. Ils sont prélevés dans la même planche que l'élément central (zone (D) de la Figure 2). Toutefois on peut aussi utiliser des bras provenant d'autres essences, à condition que leur module d'élasticité longitudinal et leur dureté soient suffisamment grands pour éviter de perturber l'essai en flexion et en poinçonnement sur les appuis.

Pour réaliser une bonne adhésion des deux bras avec l'échantillon (élément central), un adhésif spécial est utilisé. La difficulté réside essentiellement dans le fait qu'il faut coller rapidement, à température ambiante, deux surfaces saturées en eau dont l'une est fortement poreuse, nous parlons ici des faces des bras qui sont dans le plan *TR*. Dans ce cas le meilleur adhésif testé est une colle isocyanate (Réf. *Sumitak 242A* de la société *Daiichi Kougyou Seiyaku*) de type MDI (*Diphényl Méthane-4, 4 Diisocyanate*) fournie gracieusement du Japon par le professeur KAWAI du Wood Research Institute. Catalysée par l'eau, elle est suffisamment visqueuse pour ne pas disparaître dans les pores du bois lors de l'application.

Elle a aussi l'avantage de ne pas durcir trop vite ; le montage reste repositionnable durant les 20 premières minutes.

On appellera par la suite l'ensemble des deux bras collés à l'élément central "éprouvette de fissilité".

2.1.4.3. Description du dispositif

Le dispositif de flexion se compose de deux points d'appui distants de 24 cm. L'un est une bille en acier de 25 mm de diamètre et l'autre est un rouleau en dural de 15 mm de diamètre. Ce système permet de corriger les éventuels défauts de parallélisme entre les bras et l'éprouvette (Figure 8). Une fois que l'éprouvette est bien placée sur le support, la force est appliquée au centre de l'éprouvette par l'intermédiaire d'une bille de 12 mm de diamètre, liée à une cellule de force de capacité 1 KN. Le chargement se fait à vitesse de déplacement constante de 0,1 mm/s. L'essai dure environ 3min +/- 30s et se termine quand la rupture est complète. Le déplacement est mesuré par les capteurs LVDT tous les 2/10ème de seconde.

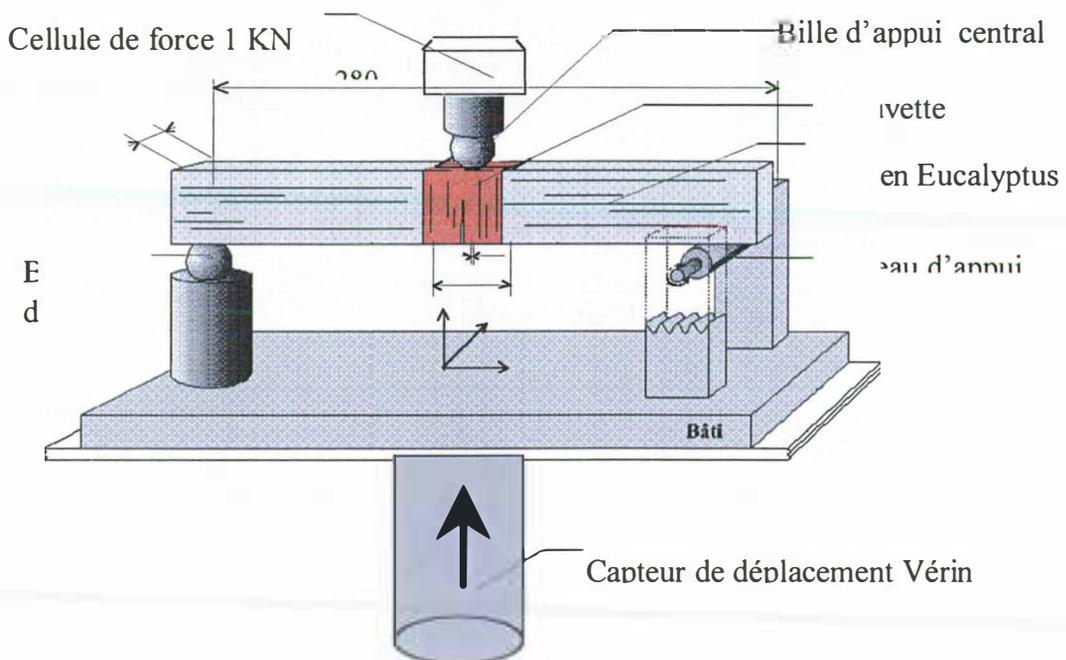


Figure 8 : Dispositif de l'essai de fissilité

On obtient ainsi un fichier d'acquisition (force F – déplacement δ). Le critère classique de description de l'essai retenu par GUSTAFSSON et LARSEN (1990) est l'énergie de rupture $G_{F,1}$. Cette énergie correspond à la somme du travail réalisé par l'appui central et par le poids propre de l'éprouvette rapporté à l'aire de la surface rompue.

$$G_{F,1} = \frac{1}{S} \left[Mg\delta_0 + \int_0^{\delta_0} F \cdot d\delta \right]$$

où :

δ_0 : Déplacement réalisé du début du chargement jusqu'à rupture complète en m.

S : Surface rompue du ligament en m^2 .

Mg : Poids de l'éprouvette en N.

F : Force enregistrée durant l'essai, en N.

La surface de la courbe force-déplacement est obtenue par une intégration discrète selon la méthode de Simpson en approchant, sur chaque intervalle, la courbe par un arc de parabole.

La figure ci-dessous montre deux exemples de courbes force-déplacement : l'un pour une forte valeur d'énergie de rupture, l'autre pour une faible valeur. On remarque que la courbe de rupture en mode I peut être divisée en deux parties, l'une avant la rupture et l'autre après. Dans la première partie élastique, la courbe est croissante et quasi-linéaire. Dans la seconde, la courbe décroît de façon hyperbolique jusqu'à la rupture complète de l'éprouvette (Figure 9).

Les autres critères que nous avons retenu pour décrire cet essai sont la pente élastique apparente, le déplacement et la force ou la contrainte apparente à la rupture.

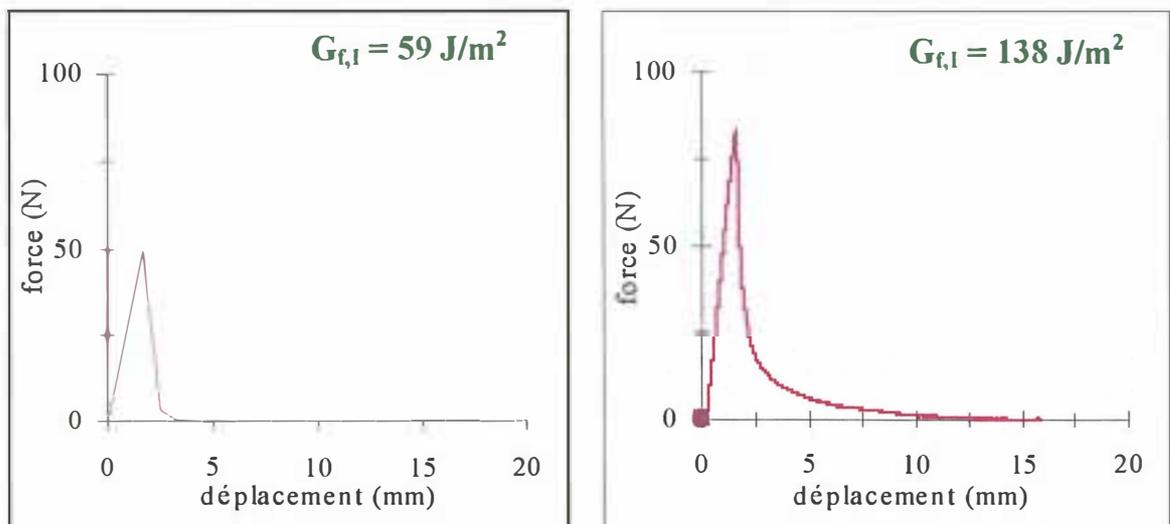


Figure 9 : courbes force/déplacement d'un essai de fissilité, cas extrêmes

Rappelons que $G_{F,I}$ est une énergie surfacique, pour la déterminer nous devons donc connaître la surface de fissure ouverte.

En dehors de certaines anomalies telles que les nœuds, la présence du contre-fil peut induire des surfaces de rupture ondulées. En effet, particulièrement pour des éprouvettes à proximité de la périphérie où le fil du bois est le plus perturbé, il a été observé (lors des essais de fissilité) des surfaces de ruptures très ondulées (BAILLERES 1994). Dans ce cas, l'hypothèse que la fissure se propage en mode I n'est plus valable.

Au premier abord, la quasi-totalité des éprouvettes ont des surfaces de rupture assez régulières. Cependant quelques-unes avaient des surfaces de rupture plus ou moins ondulées. Pour estimer la surface réelle de rupture, il a fallu définir un protocole de mesure particulier utilisant un logiciel d'acquisition et de traitement d'images. La méthode consiste à placer l'éprouvette ouverte sous une loupe (acquisition d'une courbe). Après avoir dévoilé les contours de l'éprouvette, on estime la surface de fissure ouverte par une simple intégration de

surface. Les détails de cette méthode sont développés dans un rapport de stage dans le cadre d'une formation de l'IUT de Montpellier (PARADIS, 1999).

Les mesures sur quelques éprouvettes présentant des surfaces de ruptures les plus ondulées, ont révélé une différence inférieure à 20%, avec le cas où on assimile la surface rompue comme étant un rectangle droit. Ainsi nous supposons la surface rompue comme étant une surface plane, régulière et assimilé à un rectangle.

2.1.5. Mesure des constantes élastiques

2.1.5.1. Echantillonnage

Les essais de compression ont été réalisés sur des éprouvettes parallélépipédiques, de dimension $R = 20 \text{ mm}$, $T = 20 \text{ mm}$ et $L = 30 \text{ mm}$, débitées dans les directions de l'orthotropie du bois.

Rappelons qu'au départ nous disposons d'un plateau (voir Figure 2). Dans un premier temps un prélèvement de barreaux est effectué des deux côtés du plateau, de dimension $R = 36 \text{ mm}$, $T = 36 \text{ mm}$ et $L = 220 \text{ mm}$. Ceci est poursuivi systématiquement de part et d'autre du plateau (de la périphérie jusqu'au cœur) (Figure 10).

De ces barreaux on prélève l'ensemble des éprouvettes destinées aux essais de compression statique en vue de déterminer les constantes élastiques exprimées dans le repère d'orthotropie.

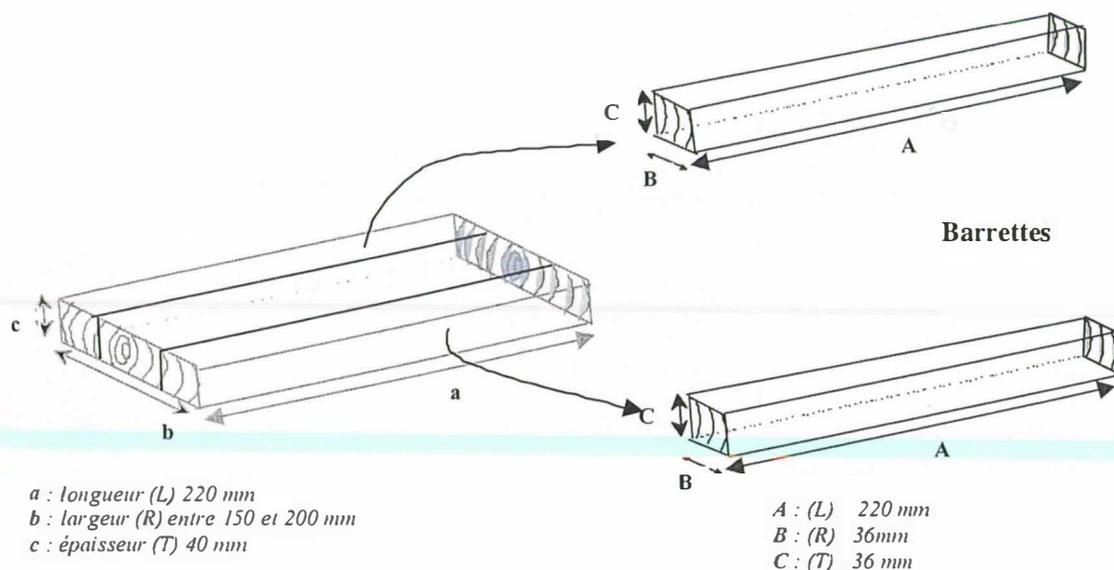


Figure 10 : Débit des barreaux desquels les éprouvettes de compression statique sont extraites

Chaque barreau est découpé ensuite en 6 éprouvettes selon le plan décrit par la Figure 11. On distingue deux types d'éprouvettes :

- éprouvette taillée, en hauteur, selon une direction de symétrie matérielle : R , T , L (type I).
- éprouvette taillée, en hauteur, selon une bissectrice : TL , RL , RT (type II).

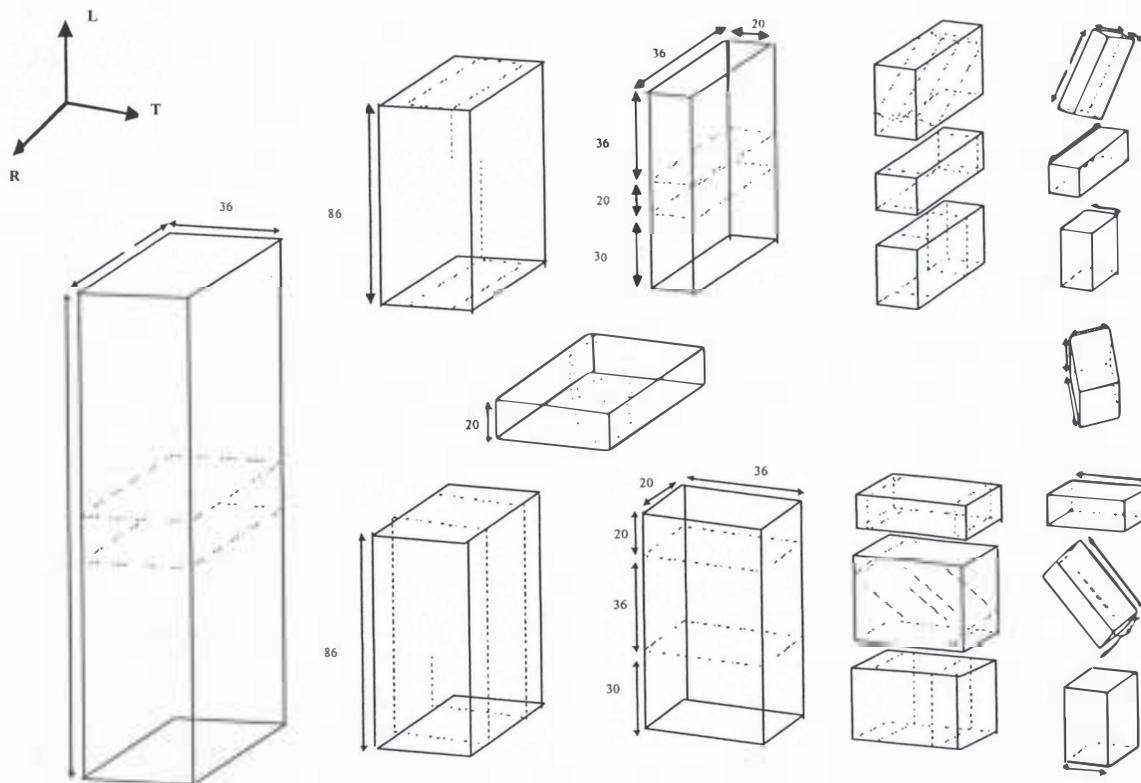


Figure 11 : Prélèvement des éprouvettes de compression statique. Dimension en mm

L'ensemble des 6 éprouvettes prélevées d'un même barreau est appelé par la suite, une "série". Les tableaux ci-dessous présentent les différentes séries prélevées de l'échantillonnage congolais et marocain.

<i>N° d'arbre</i>	<i>91</i>		<i>223</i>		<i>37</i>		<i>192</i>		<i>189</i>		<i>136</i>	
<i>N° de série</i>	<i>A</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>
<i>Coté DRLM</i>	<i>1</i>	<i>5</i>	<i>1</i>	<i>5</i>	<i>1</i>	<i>5</i>	<i>1</i>	<i>5</i>	<i>1</i>	<i>5</i>	<i>1</i>	<i>5</i>
<i>Distance à la moelle</i>	51	63	60	55	64	52	66	85	71	61	78	62
<i>Nombre d'éprouvettes</i>	5	6	6	6	6	6	6	6	6	5	6	6

Tableau 5 : Echantillonnage des éprouvettes de compression statique

Ce mode de débit présente l'intérêt de produire des éprouvettes dont les parties centrales sont alignées dans le sens du fil.

Toutes les découpes sont faites à la menuiserie du CIRAD-FORET. Ce travail est délicat dans la mesure où le parallélisme des faces est un paramètre très important pour le bon déroulement d'un essai de compression statique. Pour cette tâche nous avons monté un dispositif. Ce dispositif est constitué d'un bâti que l'on fixe sur une scie circulaire à l'aide de boulons adaptés. Il est équipé de deux montages qui permettent de guider les débits. Cette manière de faire assure un bon parallélisme de l'échantillon. La Figure 12 illustre le principe

du dispositif à travers l'exemple de la découpe d'une éprouvette de type II taillée selon la bissectrice du plan (RT).

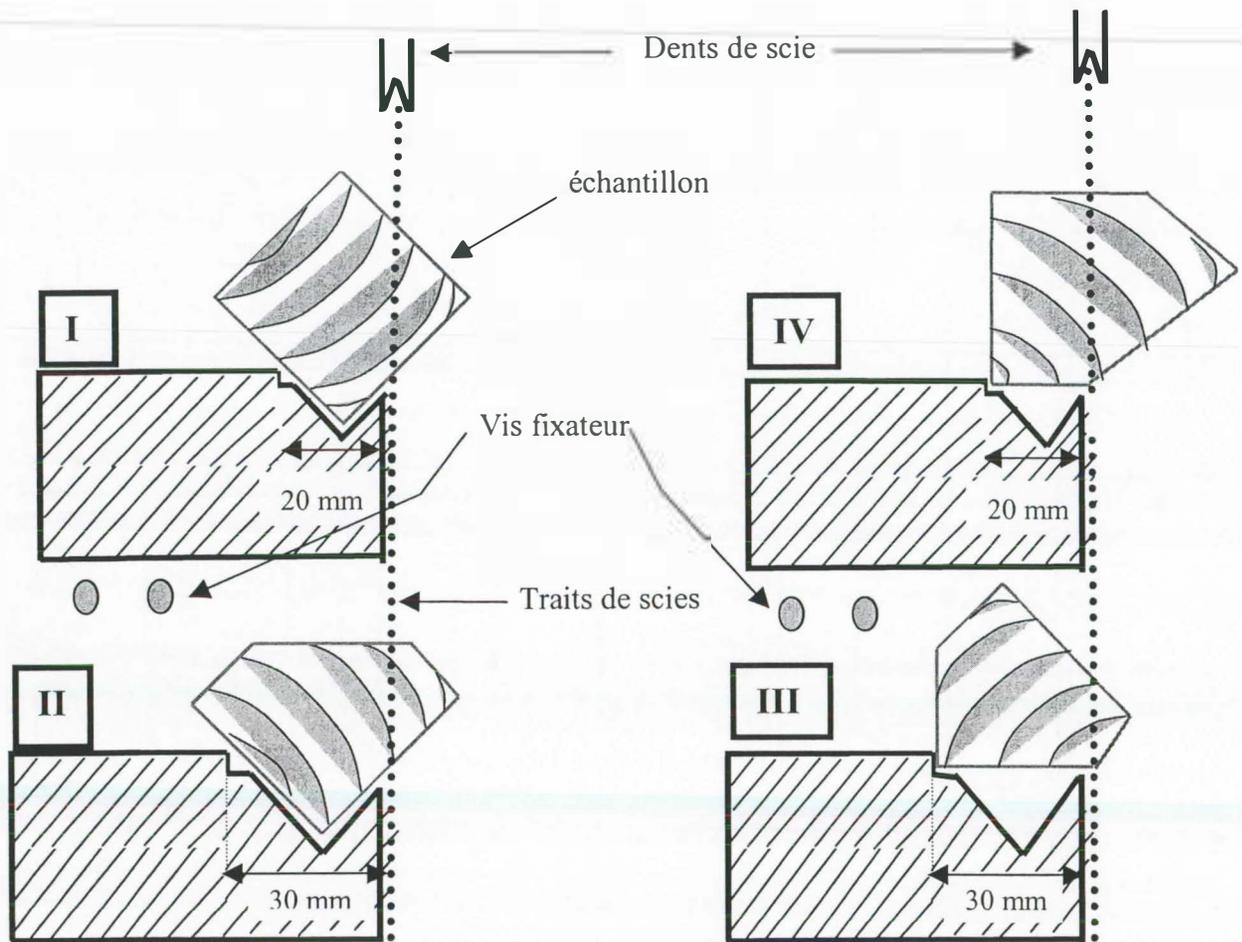


Figure 12 : Schéma descriptif des différentes étapes de la découpe d'une éprouvette de compression taillée selon la bissectrice au plan RT

Les constantes élastiques sont déterminées sur bois vert, à partir d'essais de compression quasi-statique : en imposant un état de contrainte uniaxial uniforme et en mesurant les déformations axiales dans la partie centrale de l'éprouvette, on évalue les complaisances élastiques exprimées dans le référentiel lié à l'éprouvette. On applique des efforts de compression jusqu'à 7 KN pour les éprouvettes L et $0,8\text{ KN}$ pour les autres. Trois montées en compression permettent d'obtenir les courbes (force-déplacement). Ce sont approximativement des droites dont les pentes correspondent aux rigidités (E_R, E_T, E_L) dans le cas d'une éprouvette de type I et aux rigidités apparentes (E_{RT}, E_{TL}, E_{RL}) dans le cas des éprouvettes de type II.

La figure 13 montre deux exemples de courbes (force-déplacement) dans le cas des éprouvettes R (type I) et RL (type II).

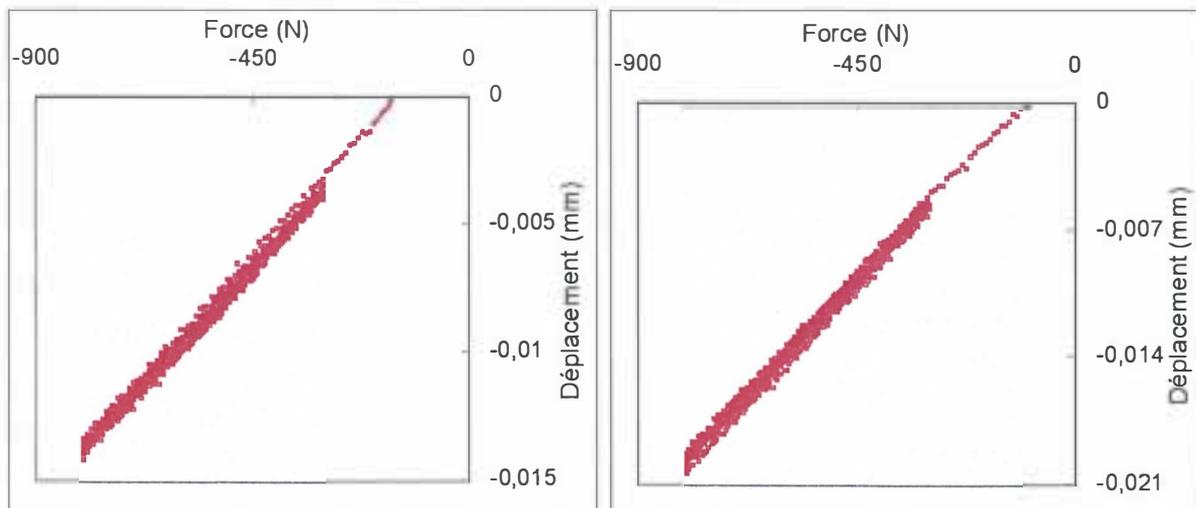


Figure 13 : Exemple de courbes force/déplacement d'un essai de compression quasi-statique : cas d'éprouvette de type I et II (le graphe de droite correspond à l'éprouvette (RL) de l'arbre 223 et celui de gauche à l'éprouvette (R) du même arbre

Remarque

Ces mesures restent insuffisantes pour déterminer la totalité des constantes élastiques, car nous n'avons pas pu mesurer les déformations transverses (montage des extensomètres non adapté à ces mesures).

2.1.5.2. Description de la machine d'essai

Tous les essais mécaniques ont été effectués au CIRAD-FORET, dans le laboratoire de technologie des bois, sur une presse hydraulique pilotée par des servo-valves, de marque MTS. Cette presse est équipée d'un module d'asservissement de force, de déplacement ou de déformation, de deux cellules de force d'une capacité de 1 KN et de 100 KN utilisées sur leur plus petite gamme de résolution, pour plus de précision.

La machine est commandée par l'intermédiaire d'un ordinateur, le logiciel utilisé est Test Star II. Il permet de programmer le pilotage selon les types d'essais (Figure 14).

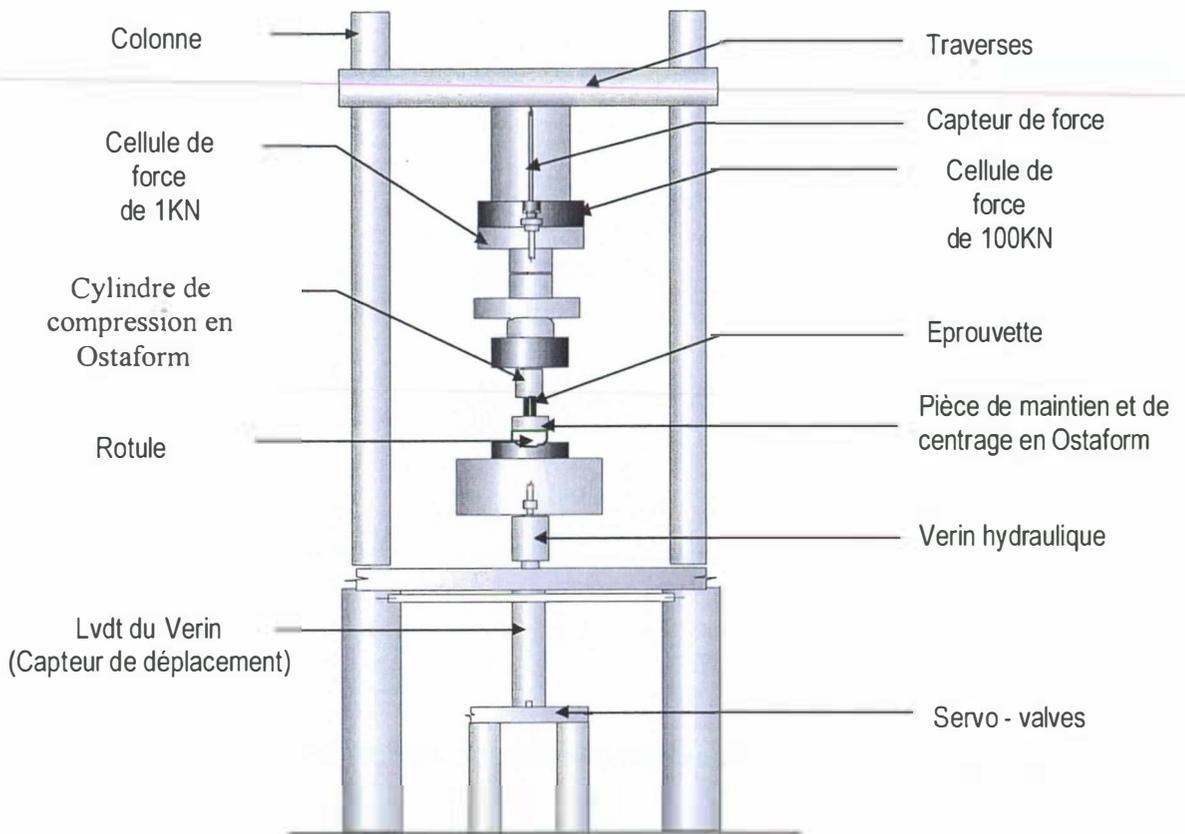


Figure 14 : Schéma du dispositif de compression

La mesure de la réponse mécanique se fait directement sur l'échantillon grâce à deux extensomètres de haute précision (*Model 632. 31F-2A Axial extensometer MTS*), utilisables dans une large gamme de déplacements. En effet ils peuvent mesurer jusqu'à 4mm en allongement et jusqu'à -2 mm en retrait, les tables fournies par le constructeur donnent une erreur de l'ordre de $0,2\mu\text{m}$ pour un déplacement mesuré inférieur à $350\mu\text{m}$; soit une erreur de 0,5%. Ils sont équipés d'un kit de couteaux et d'attaches qui permet l'adaptation de leur configuration selon la forme de l'éprouvette. Le contact capteurs-éprouvette se fait par l'intermédiaire d'un système de couteaux à trois points écartés de 10 mm . L'attache de ces extensomètres sur l'éprouvette peut se faire grâce à des bras articulés, plaqués par des élastiques ou des ressorts. L'utilisation de deux capteurs permet de mesurer simultanément les déplacements sur deux faces opposées (pour une éprouvette cubique ou parallélépipédique). Ainsi on peut avoir une idée sur l'homogénéité de l'effort appliqué et sur un éventuel défaut de mise en place des capteurs ou de parallélisme des faces de l'éprouvette.

La mise en place des capteurs est une étape difficile et déterminante. La figure 15 montre le schéma de l'assemblage : les extensomètres sont positionnés sur les faces concernées. Pour faciliter la mise en place, on trace sur l'éprouvette des repères de positionnement. Cependant on ne peut être sûr que les deux capteurs soient positionnés de la même façon. Ceci est l'une des raisons pour laquelle l'écart mesuré entre les deux extensomètres peut atteindre parfois $15\mu\text{m}$. Cet écart peut être aussi dû à une flexion des éprouvettes ou à un problème de planéité des surfaces comprimées (l'usinage du bois s'est fait à une précision de un dixième de millimètre). Dans la mesure où l'on reste dans le domaine du comportement linéaire, on considère que la moyenne des deux mesures donne une valeur moyenne de la déformation.

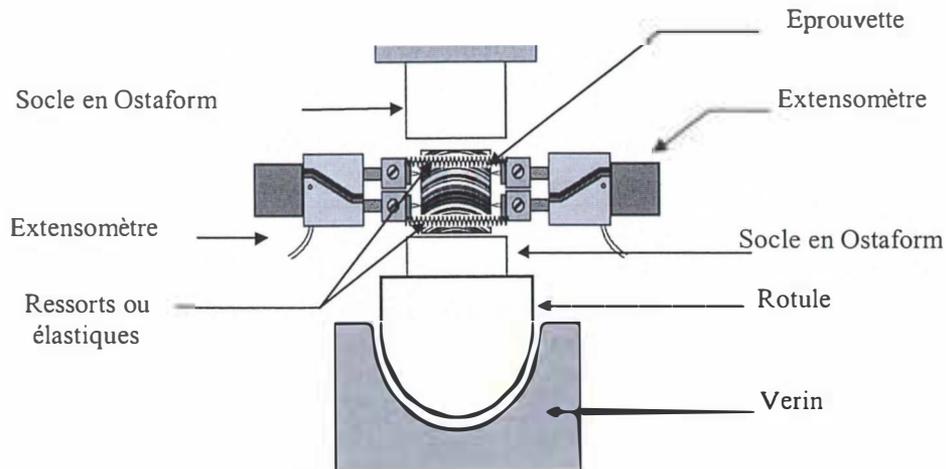


Figure 15 : Schéma du montage des extensomètres

2.1.6. Module d'élasticité longitudinal et densité

2.1.6.1. Echantillonnage

Les éprouvettes ont une dimension de $R = 20 \text{ mm}$, $T = 20 \text{ mm}$ et $L = 360 \text{ mm}$. Elles sont prélevées de part et d'autre du plateau débité de la planche mère (zone (E) de la Figure 2). Cette manière de faire privilégie la périphérie par rapport à la moelle. En effet il y a un risque que le reste du plateau (après avoir débité les éprouvettes proches de la moelle) ne puisse suffire pour prélever une éprouvette. Ceci est un inconvénient dans la mesure où l'on perd de l'information près de la moelle (Figure 16).

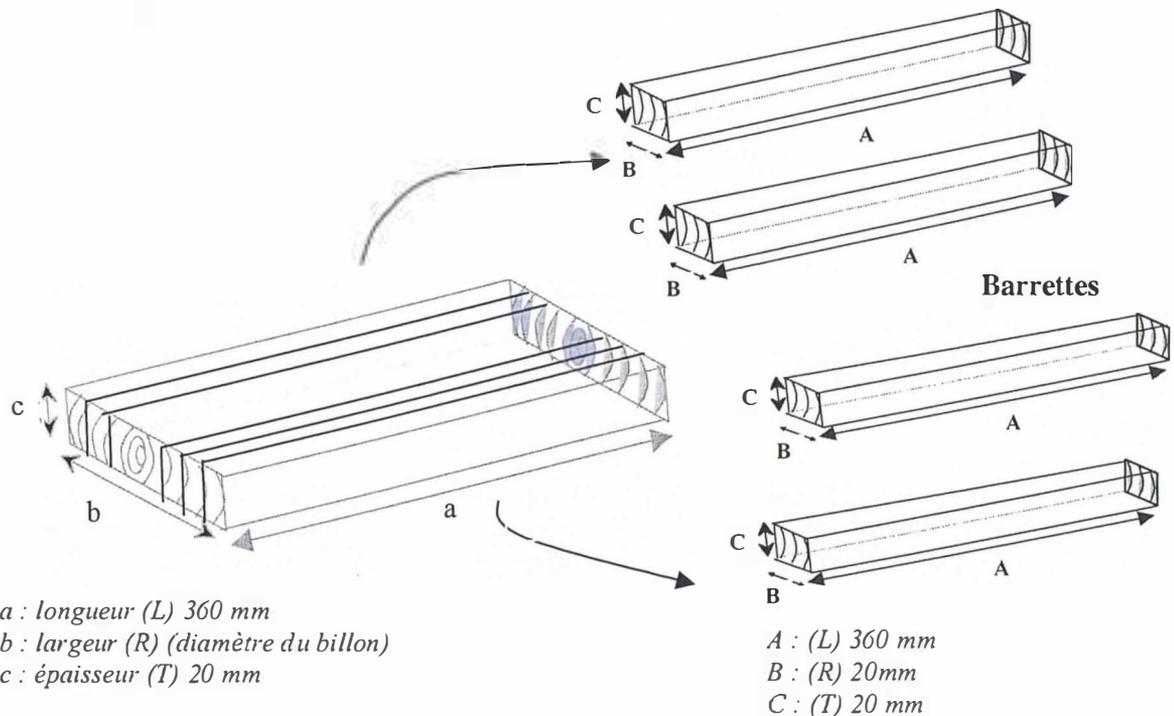


Figure 16 : Plan de prélèvement des éprouvettes pour les essais acoustiques "BING"

2.1.6.2. Méthode de détermination du module d'élasticité longitudinal

Nous avons mesuré cette propriété selon la méthode conçue par BORDONNE (1989), sur un nouveau dispositif disponible au CIRAD-Forêt appelé "BING" (*Beam Identification by Non destructive Grading*). La méthode de mesure est fondée sur l'analyse des vibrations naturelles d'une poutre en flexion. Un choc est donné à l'une des extrémités de l'éprouvette, posée sur deux bracelets élastiques de faible rigidité, de façon à solliciter simultanément tous les modes propres de vibrations de la poutre flottante. La réponse est enregistrée à l'autre extrémité de l'éprouvette au moyen d'un microphone disposé perpendiculairement à l'axe de la poutre. Le signal est traité par une procédure FFT (*Fast Fourier Transform*). Les dimensions et la masse de l'éprouvette doivent être données au préalable. Un ajustement sur les premiers modes (au moins 2 et au plus 5), basé sur la théorie de TIMOSHENKO sur les poutres flottantes (qui inclut les cisaillements et l'inertie de rotation), permet alors d'estimer le module spécifique (rapport du module d'élasticité sur la masse volumique) puis le module d'élasticité de l'éprouvette selon son axe (Figure 17).

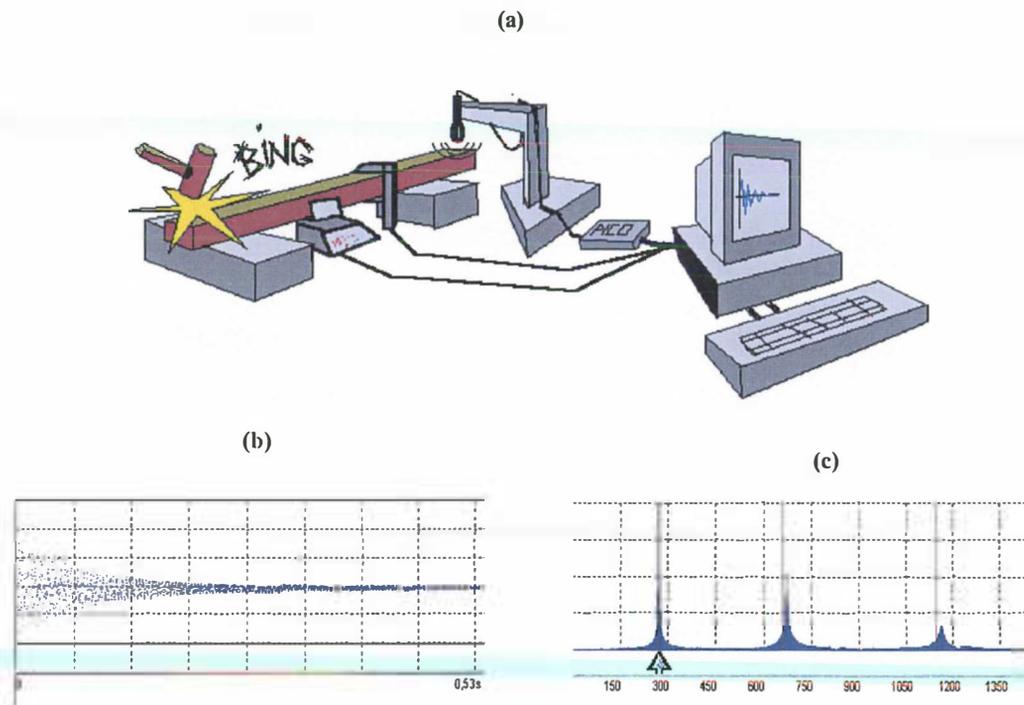


Figure 17 : (a) : Percussion de la pièce en appui sur des supports en mousse (vibrations libres). (b) : Acquisition et numérisation du signal. (c) : Traitement des données par le logiciel BING et Analyse spectrale (sélection des modes de vibration).

L'exploitation est contrôlée par l'opérateur qui sélectionne sur le spectre fréquentiel du signal transformé les fréquences propres à prendre en compte : nombre et rang. Cette technique présente l'avantage de permettre la détection des éprouvettes défectueuses dues à la présence de singularités qui ne sont pas toujours immédiatement observables ; fil localement très perturbé, nœuds, fentes, anomalies, ... etc. En effet la présence de double pics sur le spectre du signal est souvent révélatrice de tels défauts. Il y a toujours lieu de vérifier que le module

apparent décroît lorsque la fréquence, c'est à dire le rang de l'harmonique, augmente. Le cas échéant, il faut reprendre l'essai ou éliminer l'éprouvette. Les avantages de la méthode sont évidents en ce qui concerne la vitesse d'exécution et l'absence de traumatisme infligé à l'éprouvette.

La méthode décrite ci-dessus est une méthode d'essai dynamique. Les principaux avantages qu'elle présente sont les suivants:

- ◆ Les éprouvettes testées ne subissent aucun endommagement ; elles peuvent être réutilisées ultérieurement pour la mesure d'autres caractéristiques ce qui permet d'éliminer les biais dus à la variabilité inter-éprouvettes lors d'études de corrélations entre propriétés.
- ◆ Les mesures sont faciles à mettre en œuvre et très rapides d'exécution.
- ◆ Les éprouvettes présentant des défauts internes sont facilement repérables : leur spectre de fréquence de résonance présente des anomalies flagrantes (double pic de fréquences, absence de pic bien marqué ou non cohérence entre les modes de vibrations).

2.1.7. Infradensité

2.1.7.1. Echantillonnage

Les éprouvettes sur lesquelles nous avons fait les mesures d'infradensité sont de petits blocs de $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 1\text{ cm}$, prélevées diamétralement des bouts des barrettes destinées aux mesures des modules d'élasticité longitudinaux.

Cette manière de faire permet une étude de corrélations entre l'infradensité (ou la densité) et les modules d'élasticité

2.1.7.2. Méthode de mesure

Nous avons déterminé le volume à l'état vert V_s par la méthode dite de "double pesée", utilisant le principe de la poussée d'Archimède : on pèse les échantillons humides dans l'air puis dans l'eau, on obtient le volume par la formule suivante :

$$V_s = \frac{m_e - m_a}{e}$$

où m_e et m_a désignent respectivement la masse de l'échantillon dans l'eau et l'air, et e est la masse volumique de l'eau.

Les échantillons sont ensuite séchés en étuve à $103^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ pendant environ 24 heures, puis pesés à l'aide d'une balance au 1/1000 gramme jusqu'à l'obtention d'une masse constante qui est la masse anhydre M_0 . L'infradensité ID est calculée par le rapport :

$$ID = \frac{M_0}{V_s}$$

2.2. Résultats sur les caractéristiques rhéologiques

2.2.1. Déformations résiduelles longitudinales de maturation

La *DRLM*, mesurée à la périphérie de l'arbre, caractérise l'état mécanique du bois formé dans les toutes dernières années. Le nombre de cernes impliqués varie considérablement selon la vitesse de croissance de l'arbre. A titre d'exemple, il peut être, chez le hêtre, de 2 à 20 cernes pour un trou de profondeur moyenne 20 mm.

Le tableau 6 présente, pour les sept arbres choisis, les 8 valeurs de *DRLM* mesurées, les valeurs moyennes, maximum et minimum de même que le contraste max-min.

N° d'arbre	DRLM (μm)								Moy	Max	Min	Max - Min
	1	2	3	4	5	6	7	8				
37	58	73	67	74	65	57	59	77	66	77	57	20
91	61	48	69	68	59	55	62	47	59	69	47	22
136	97	55	142	84	271	/	22	75	149	271	22	249
189	61	58	165	109	59	73	57	53	79	165	53	112
192	85	49	59	68	48	53	46	58	58	85	46	39
193	42	64	88	168	165	56	72	74	91	168	42	126
223	62	80	107	/	195	95	67	69	96	195	62	133

Tableau.6 : Résultats des mesures des *DRLM* pour les sept arbres du Congo

La figure 18 donne une représentation angulaire des profils des *DRLM* mesurées sur les sept arbres choisis au Congo ainsi que la moyenne sur 166 arbres du Congo sur lesquels 8 valeurs de *DRLM* ont pu être mesurées. Cette représentation consiste à centrer le profil sur la plus forte valeur des *DRLM*. En général on constate une dissymétrie angulaire qui peut être plus ou moins marquée. Dans certains cas, on observe des profils plats, c'est le cas des arbres 192, 193 et 136 (graphe de droite). La plus forte *DRLM* (pic des *DRLM*) est enregistrée par l'arbre n° 223.

Les pics sont parfois très aigus ou double (arbre n° 223). Ils sont parfois mal estimés, c'est le cas de l'arbre n° 91 qui présente deux fortes valeurs de *DRLM* voisines, ceci s'explique par le fait que les positions des mesures ont été légèrement déphasées par rapport au pic réel ; autrement dit, le pic se trouvait probablement entre les deux positions de mesures considérées.

Peu contrasté, le profil moyen des *DRLM* sur 166 arbres du Congo est quasi symétrique. La *DRLM* maximum moyenne est de l'ordre de 150 μm , encadrée par des valeurs assez fortes presque partout de l'ordre de 80 μm . Précisons au passage que seuls les arbres ayant 8 mesures ont été pris en compte dans cette analyse (les arbres 223 et 37 sont exclus de cette étape de l'analyse, car ils leur manquait un point de mesure).

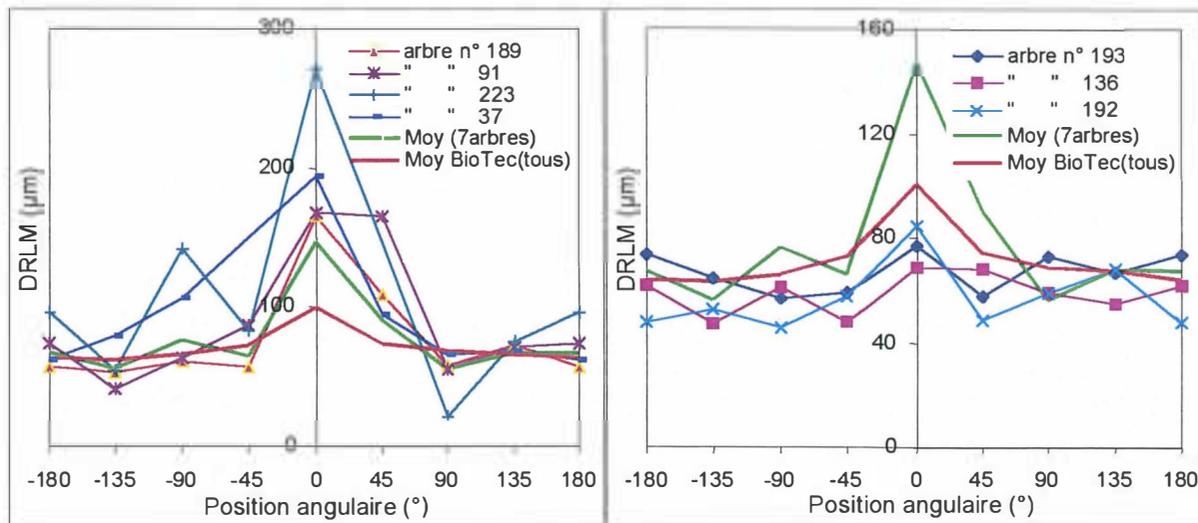


Figure 18 : Profils de DRLM centrés sur la valeur maximale (pour chaque arbre et la moyenne sur les sept arbres)

La figure 19 représente quatre classes de profils moyens distingués par la DRLM maximum moyenne. De profil moyen quasi symétrique et peu contrasté, la classe majoritaire représente un peu moins de 47% de l'ensemble des arbres du Congo. Cette classe contient les arbres dont la DRLM maximum est comprise entre $76\mu\text{m}$ et $100\mu\text{m}$.

L'ensemble des arbres dont la DRLM maximum est supérieure à $126\mu\text{m}$ constitue un peu moins de 11%. Leur profil moyen présente un pic bien marqué (les DRLM extrémales sont $80\mu\text{m}$, et $160\mu\text{m}$). En faible proportion, moins de 9%, la classe des arbres dont la DRLM maximum est inférieure à $76\mu\text{m}$, se caractérise par un profil moyen plus au moins plat de pic faible et très peu marqué.

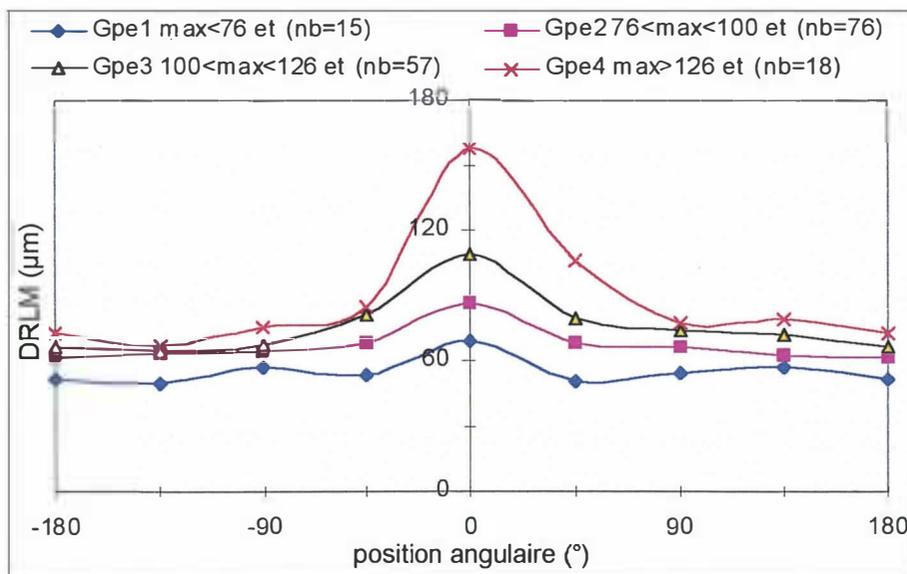


Figure 19 : Groupes de profils moyens classés par rapport à la DRLM maximum

2.2.2. Modules d'élasticité longitudinal et de cisaillement - densité

2.2.2.1. Module d'élasticité longitudinal

Les éprouvettes ou barrettes ($R=20 \times T=20 \times L=360 \text{ mm}^3$) sont au nombre de 43. Elles proviennent des sept arbres choisis de l'échantillonnage congolais. Elles ont été prélevées sur des plateaux diamétraux à proximité de la couronne de mesure des *DRLM* afin d'avoir une mesure bien localisée qui correspond à la zone où les contraintes sont relâchées.

Le module d'élasticité longitudinal dynamique sur bois vert E_{Lv} est mesuré deux fois sur l'ensemble des barrettes, par deux modes de sollicitations ; en sollicitant, sur le banc d'essai acoustique, une première percussion selon la direction R et une seconde selon la direction T. On note respectivement $E_{Lv}(RL)$ et $E_{Lv}(TL)$ les deux modules qui en résultent. Cette manière de faire nous permet d'une part d'avoir les coefficients de cisaillement, G_{TLv} et G_{RLv} , dans les plans RT et RL, d'autre part de nous assurer de la fiabilité de la mesure, par comparaison des deux modules.

Les éprouvettes sont ensuite stabilisées, en chambre climatisée, à l'humidité standard 12%. Ainsi par le même type d'essai (banc d'essai acoustique) on obtient le module d'élasticité longitudinal dynamique sur bois "sec" E_{Ls} . Le tableau 20 donne le nombre de barrettes prélevées par billon ainsi que les diamètres moyens de chaque billon (moyenne du fin bout et du grand bout).

N°	Nb	D_{Moy}	E_{Lv} (Gpa)		E_{Ls} (Gpa)		G_{TLv} (Gpa)		G_{RLv} (Gpa)		G_{TLs} (Gpa)	
			Moy	ecart	Moy	ecart	Moy	ecart	Moy	ecart	Moy	ecart
37	6	34	11.1	2.8	12.3	2.9	0.55	0.1	0.74	0.33	0.62	0.16
91	6	35	10.9	2.2	12.5	2.1	0.74	0.21	1.79	0.36	0.82	0.30
136	6	30	12.6	2.7	14.6	2.6	0.66	0.02	0.84	0.19	0.73	0.06
189	7	37	13.1	3.1	15.1	2.6	0.64	0.11	0.91	0.19	0.73	0.09
192	5	41	10.9	1.3	11.2	1.3	0.66	0.21	0.71	0.15	0.56	0.15
193	7	29	14.2	3.0	15.2	2.8	0.78	0.07	1.1	0.31	1.38	0.62
223	6	31	12.7	2.1	14.6	2.1	0.63	0.07	0.99	0.17	0.73	0.11

Tableau 20 : détail de l'échantillonnage sur les sept arbres du Congo choisis. N° : numéro de l'arbre ;

Nb : nombre d'éprouvettes ; D_{Moy} : diamètre moyen (cm) ; E_{Lv} et E_{Ls} : modules d'élasticité longitudinaux du bois vert et sec ; G_{RLv} et G_{TLv} : modules de cisaillement dans les plans (TL) et (RL) à l'état vert ; G_{TLs} : module de cisaillement dans le plan (TL) à l'état sec. Moyenne (Moy) et écart-type (Ecart)

2.2.2.2. Comparaison des modules $E_{Lv}(TL)$ et $E_{Lv}(RL)$

Comme le montre la figure 20, compte tenu de la corrélation très élevée ($R = 0,994$) entre les deux mesures du module d'élasticité longitudinal dynamique, $E_{Lv}(TL)$ et $E_{Lv}(RL)$, et de la valeur du coefficient de la droite de régression ($0,988$) très proche de 1, on peut considérer que les deux modules sont équivalents. Ainsi, que ce soit une sollicitation vibratoire avec percussion selon la direction R ou T, la mesure est identique.

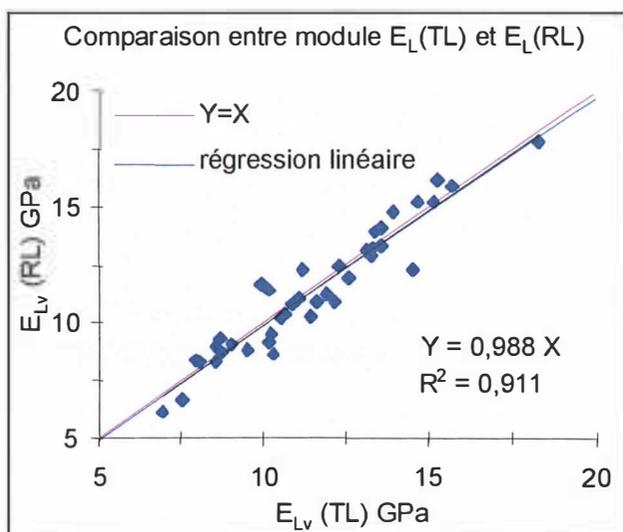


Figure 20 : Relation entre mesures de E_L obtenues par deux modes de sollicitations, sur banc d'essai vibratoire

2.2.2.3. Comparaison entre le module d'élasticité longitudinal déterminé sur bois sec et sur bois vert

Les résultats des mesures sur 43 barrettes montrent une excellente corrélation ($R = 0,97$) entre les deux modules d'élasticité longitudinaux mesurés sur bois vert et sur bois sec. On note aussi, conformément à la littérature, que le module E_{Ls} est systématiquement supérieur à E_{Lv} (figure 21). Lors d'une étude précédente GERARD (1994) a obtenu, sur 238 barrettes d'Eucalyptus de même dimension, une corrélation très significative entre les deux modules ; $E_{Lv} = 0,84 E_{Ls}$ (avec coefficient de corrélation $R = 0,94$). Le même auteur a montré que la liaison entre les deux propriétés ne dépend pas de E_L . Par suite, l'étude des variations radiales de E_L peut donc s'effectuer de façon indifférenciée sur E_{Lv} ou E_{Ls} .

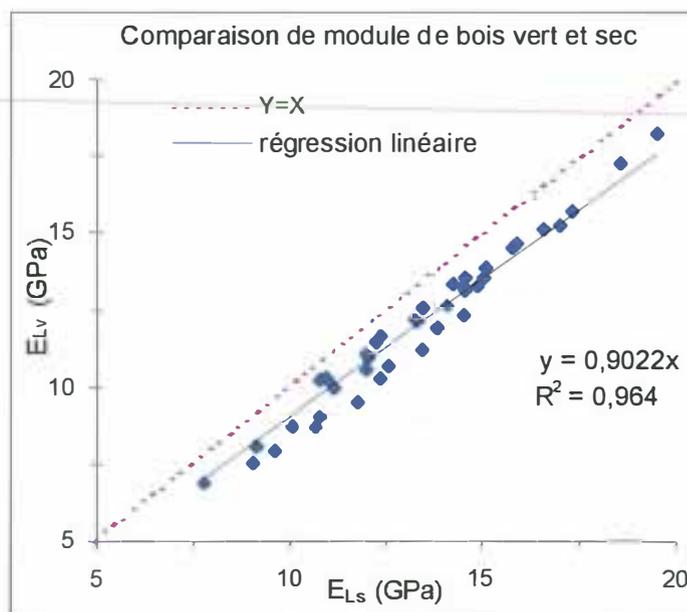


Figure 21 : Relation entre modules d'élasticité longitudinal mesuré sur bois vert et sec

2.2.2.4. Variation radiale du module d'élasticité longitudinal sur bois vert et bois sec

L'évolution radiale du module d'élasticité longitudinal a été étudiée aussi bien sur du bois vert que sur du bois sec.

La figure 22 présente l'ensemble des mesures de module E_{Lv} et E_{Ls} (sur les 43 éprouvettes citées ci dessus) en fonction de la distance à la moelle. Cette représentation distingue les mesures réalisées sur des éprouvettes prélevées sur deux rayons diamétralement opposés. On observe une augmentation, avec le rayon, de E_{Lv} et E_{Ls} pratiquement chez tous les individus, à l'exception de l'arbre 192 (le moins tendu) où une légère décroissance ou stabilisation périphérique est visible.

L'augmentation du module d'élasticité longitudinal sur du bois vert en fonction de la distance à la moelle a été mise en évidence chez plusieurs espèces d'Eucalyptus, notamment *E. Camaldulensis* (CHUDNOFF 1961), *E. Grandis* (FERREIRA 1972, HANS et al. 1972, BRASIL et al. 1979, MALAN 1989), *E. Robusta* (SKOLMEN 1972) et *E. Regnans* (FREDRICK et al. 1982) (références citées par BAILLERES 1994)

Cependant certains auteurs notent une décroissance locale périphérique de E_L qui affecte plus souvent les arbres les plus âgés : GERARD (1994) note que chez certaines espèces d'*Eucalyptus* plus âgés, l'écart entre la valeur maximum et la valeur périphérique au voisinage du cambium peut dépasser 20%. BAILLERES (1994) montre que des défauts de fil (contre fil marqué ou fil ondulé) peuvent être à l'origine de la diminution périphérique du module E_{Lv} (le bois n'étant plus sollicité dans la direction des fibres).

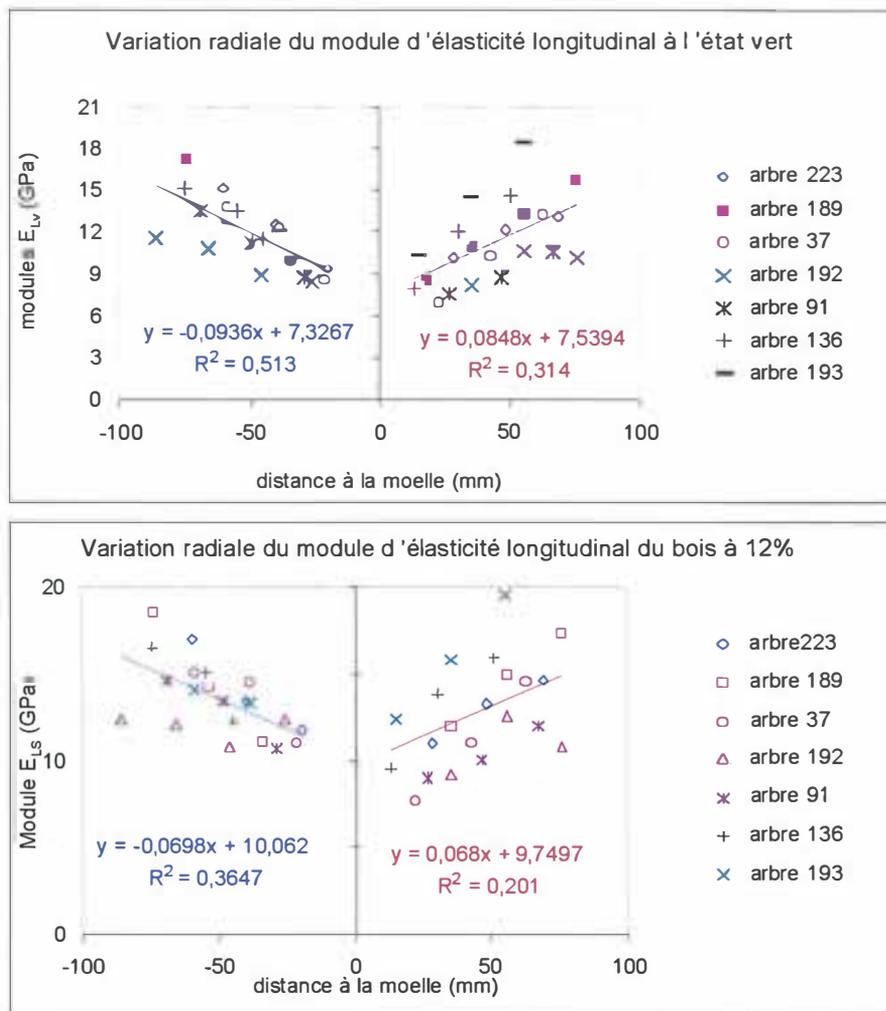


Figure 22 : Variation radiale du module d'élasticité longitudinal sur bois saturé et bois sec (en abscisse la distance au cœur des éprouvettes)

La modélisation de la variation radiale du module d'élasticité longitudinal a fait l'objet de plusieurs études antérieures. Cette évolution a été plus souvent ajustée par des fonctions puissances caractérisant une croissance assez rapide auprès du cœur et une stabilisation, voir même une légère décroissance, vers la périphérie. Cependant les mesures représentées sur la figure 22, suggèrent un modèle linéaire puisque l'on ne note aucune stabilisation. Ceci s'explique par le fait que les arbres sur lesquels ont été prélevées les éprouvettes sont encore dans leurs phase de jeunesse (âges ne dépassant pas 7 ans).

La figure 23 illustre la même représentation de la variation radiale des modules E_{Lv} et E_{Ls} en fonction de la distance à la moelle, mais sans distinguer les éprouvettes diamétralement opposées. On s'aperçoit que la corrélation entre le module d'élasticité longitudinal et le rayon est plus significative pour le bois vert (au seuil de 1%) que pour le bois sec.

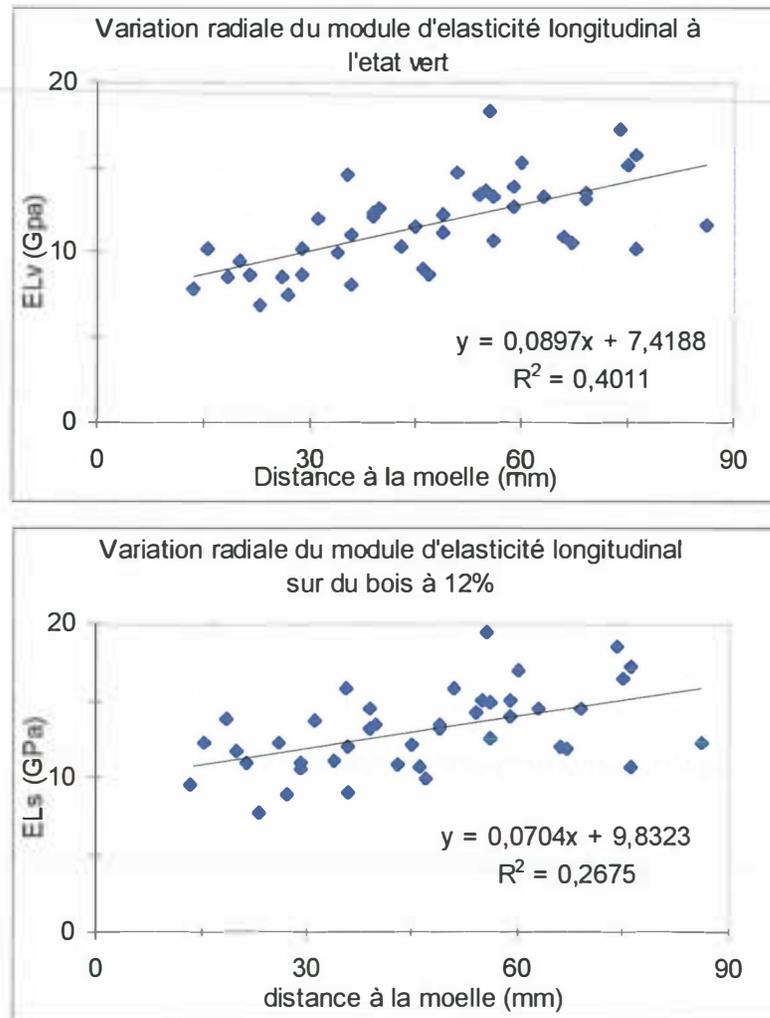


Figure 23 : Variation radiale du module d'élasticité longitudinal sur bois saturé et bois sec

2.2.3. Densité et Infradensité

Pour l'échantillonnage congolais, la densité a été mesurée conjointement, avec le module E_{Ls} , sur les mêmes éprouvettes testées sur le banc d'essai acoustique. Quant à l'infradensité, elle a été mesurée sur des éprouvettes ($20 \times 20 \times 10 \text{ mm}^3$) prélevées des bouts des mêmes barrettes (qui ont servi pour la mesure de E_{Lv}).

2.2.3.1. Variation de la densité et l'infradensité en fonction de la distance à la moelle

Comme le montre la figure 24, on observe une corrélation peu significative entre la densité et la distance à la moelle. La même constatation est observée pour l'infradensité. On note malgré tout une nette tendance à l'augmentation de la densité et de l'infradensité du cœur à la périphérie.

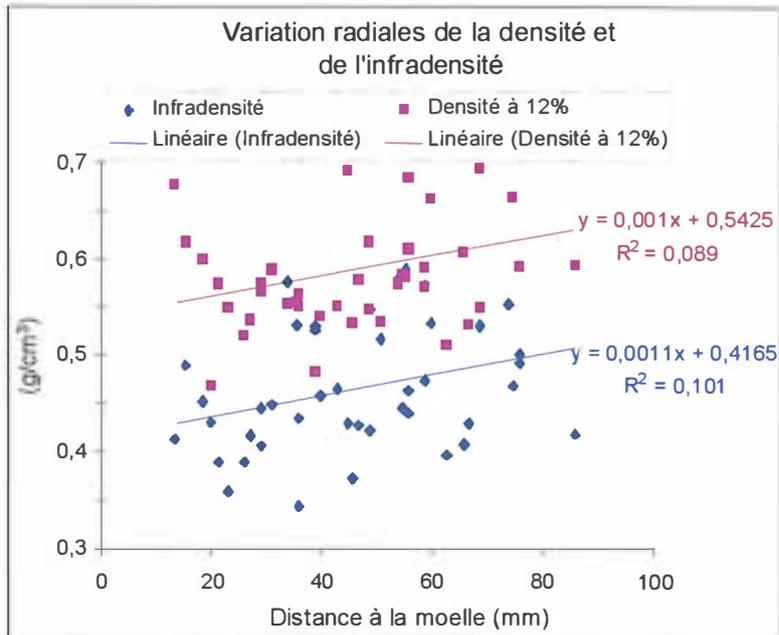


Figure 24 : Evolution radiale de la densité du bois sec et de l'infradensité en fonction de la distance à la moelle

2.2.3.2. Relation entre l'infradensité et la densité

La figure 25, montre une mauvaise relation entre la densité à 12% et l'infradensité. La corrélation est faible contrairement à ce que l'on aurait prédit. Le séchage induit des effets adverses comme le collapse (effondrement cellulaire dû au départ d'eau libre) qui affecte le volume de l'éprouvette et donc biaise les mesure de densité. Pour respecter la cohérence dans l'analyse avec des données, nous avons retenu la mesure de la densité verte ou de l'infradensité pour l'analyse des caractéristiques d'évolution qui seront utilisées au cours de l'analyse des cartes génétiques. Ces mesures utilisent le volume vert de l'échantillon et donc ne sont pas biaisées.

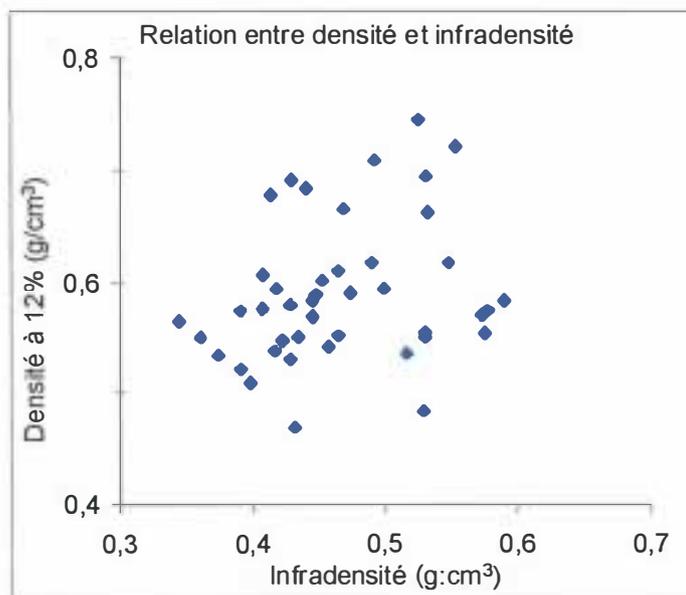


Figure 25 : Relation entre la densité et l'infradensité

2.2.4. Relation entre le module d'élasticité longitudinal et l'infradensité ou la densité

En pratique la densité est souvent la caractéristique la plus facile et la plus rapide à obtenir, éventuellement par voie non destructive. Il est donc nécessaire de pouvoir déterminer des lois de passage entre le module d'élasticité E_L et la densité D ou l'infradensité ID .

Le choix de l'étude de E_{Lv} ou E_{Ls} dépend de l'usage qu'on veut faire : E_{Lv} est utilisée en général dans les problèmes de mécanique de l'arbre sur pied et dans les problèmes liés à la libération des contraintes de croissance. Cependant E_{Ls} est considéré comme une caractéristique technologique de base utilisée pour les calculs de structure.

2.2.4.1. Relation entre le module d'élasticité longitudinal déterminé sur bois vert et l'infradensité

La figure 26 montre une relation statistiquement très significative entre infradensité et le module d'élasticité longitudinal à l'état vert, mais les variations d'infradensité n'expliquent que 43% des variations du module. D'autres paramètres comme l'angle des microfibrilles ou la composition chimique, eux aussi liés à l'âge depuis la moelle peuvent expliquer les variations constatées.

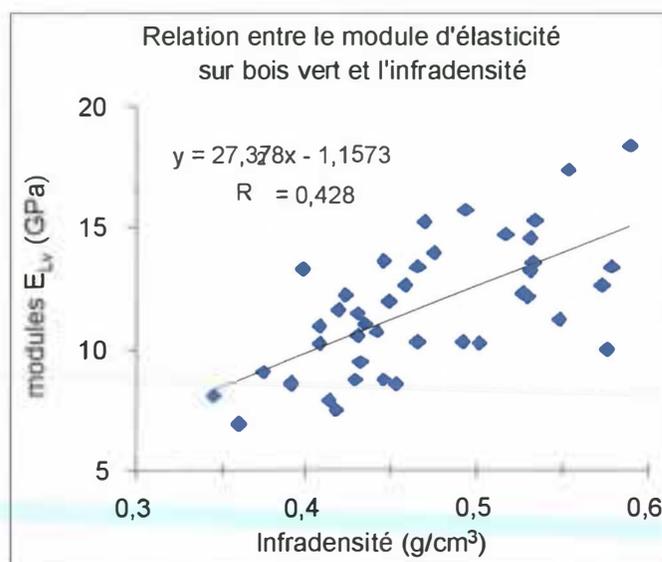


Figure 26 : Relation entre module E_{Lv} et infradensité ID

2.2.4.2. Relation entre le module spécifique du bois sec et la densité

Les variations élevées du module spécifique (rapport entre E_{Ls} et D) (figure 27) confirment l'influence d'autres paramètres que la densité du bois. Il n'y a pas de relation significative entre ce module spécifique et la densité du bois.

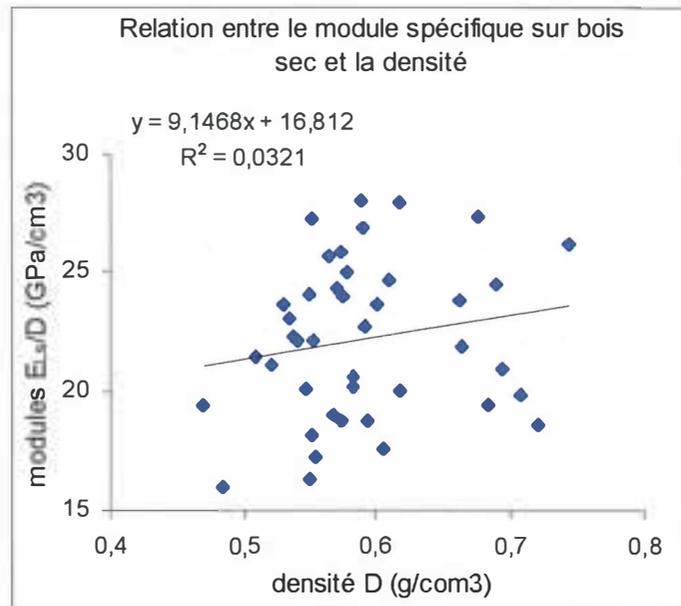


Figure 27 : Relation entre module spécifique et densité sur du bois sec

2.2.5. Relation entre le module d'élasticité longitudinal et les DRLM

A partir de l'équation de la régression linéaire décrivant les mesures de E_{Lv} en fonction de la distance à moelle, nous avons calculé par extrapolation le module d'élasticité longitudinal périphérique. Ceci permet une comparaison raisonnable entre les mesures des DRLM et le module longitudinal périphérique. La figure 28 montre qu'il n'y a pas de relation significative entre les mesures des DRLM et le module E_{Lv} ; pour les DRLM faibles, correspondant au bois normal, on trouve toute la plage de variation possible de E_{Lv} , tandis que les bois tendus ont des modules E_{Lv} moyens (15 → 20 GPa). Cependant, sur 59 couples de mesures, BAILLERES (1994) trouve une relation significative au seuil de 1%. Le même auteur montre que ce résultat a rapport avec une forte variation de E_L avec l'âge, alors que ce dernier n'a que peu d'effet sur les DRLM.

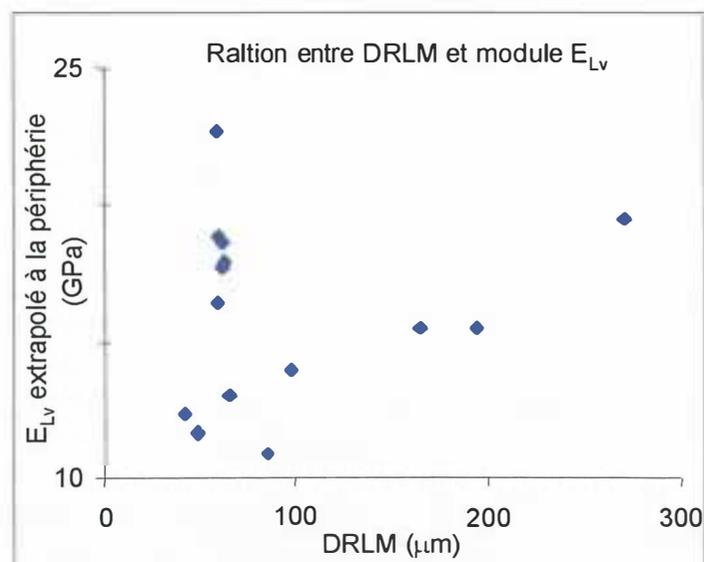


Figure 28 : relation entre DRLM et module d'élasticité longitudinal périphérique

2.2.6. Variation radiale des modules de cisaillement G_{TL} et G_{RL} obtenus sur du bois vert

Les modules de cisaillement G_{TL} et G_{RL} ont été déterminés sur les mêmes éprouvettes qui ont servi pour la mesure de E_{Lv} . Comme en témoigne la figure 29, la relation entre les modules de cisaillement mesurés sur du bois vert et la distance à la moelle est très peu significative, quand on considère l'ensemble des résultats, bien que les résultats par secteur laissent apparaître parfois des relations positives. Signalons au passage que la méthode de mesure utilisée est plus adaptée à la détermination des modules d'élasticité axiale. Ainsi un défaut dans l'éprouvette (tel que nœuds, fentes internes ...etc.) peut provoquer une erreur considérable quand il s'agit de mesurer les modules de cisaillement.

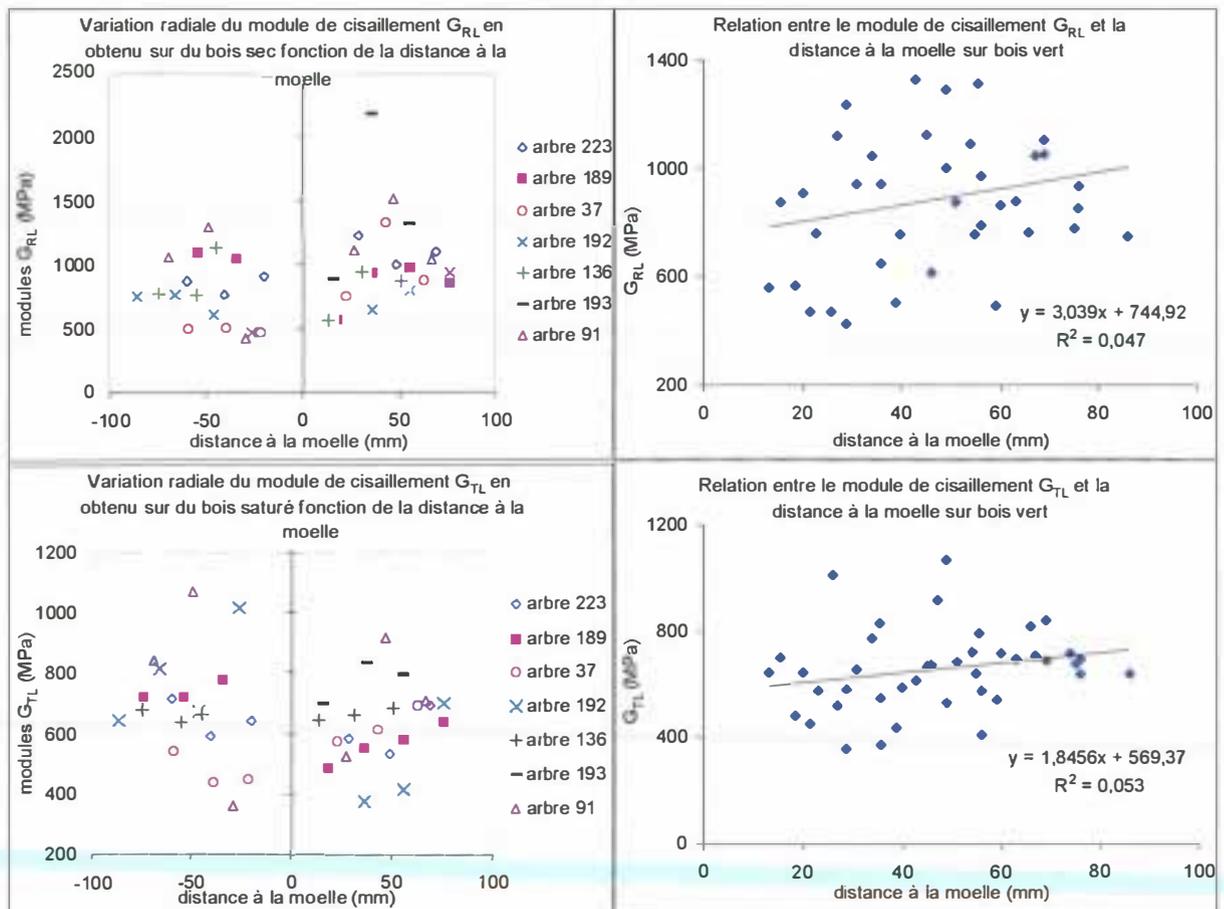


Figure 29 : Variation radiale des modules de cisaillement G_{TL} et G_{RL} obtenus sur bois vert (en abscisse la distance au cœur des éprouvettes)

2.2.7. Conclusion

Le module d'élasticité longitudinal E_{Lv} augmente généralement du cœur à la périphérie. L'étude de sa variation radiale peut se faire de plusieurs manières. Nous avons vu dans ce chapitre, qu'il est possible de le relier à la distance à la moelle (r), à l'infradensité (ID) ou également à la densité (D) à 12%. Les corrélations étudiées de E_{Lv} avec r et ID ont abouti à des résultats statistiquement significatifs. Les mesures systématiques pour la recherche des QTL seront réalisées sur la densité et le module d'élasticité sur bois vert car ces deux

caractéristiques sont corrélées à la plupart des constantes élastiques et présentent une forte variabilité intra et inter arbre.

2.3. Autres constantes élastiques

Le but de ce paragraphe est d'identifier les corrélations entre les différentes constantes élastiques : nous allons d'une part rappeler le principe de la méthode utilisée et présenter les résultats des essais de compression. D'autre part nous étudierons la variation des constantes élastiques en fonction de l'infradensité. Afin de renforcer l'analyse un lot d'échantillons provenant d'eucalyptus plantés au Maroc est introduit dans l'analyse. Il est constitué de 16 *Eucalyptus* de 3 espèces différentes ; 7 *E. Grandis*, autant d'*E. Camaldulensis* et 2 *E. Gomphocephala*.

2.3.1. Résultats

Les éprouvettes d'une série sont classées en deux types :

Type I : éprouvette dont la direction de sollicitation correspond à l'une des directions de symétrie matérielle (R, T, L). L'essai correspondant permet de déterminer respectivement les rigidités E_R , E_T et E_L , (ou complaisances S_{RR} , S_{TT} et S_{LL}) :

$$S_{11} = \frac{1}{E_R} \quad S_{22} = \frac{1}{E_T} \quad S_{33} = \frac{1}{E_L}$$

Type II : ce sont des éprouvettes découpées, en hauteur, selon les bissectrices TL, RL, et RT. Les mesures retenues des essais correspondants s'identifient à des rigidités apparentes, que l'on notera respectivement E_{TL} , E_{RL} et E_{RT} . Ces mesures s'expriment en terme des complaisances de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \frac{1}{E_{TL}} &= \frac{1}{4} (S_{22} + S_{33} + S_{23} + S_{32} + S_{44}) \\ \frac{1}{E_{RL}} &= \frac{1}{4} (S_{11} + S_{33} + S_{13} + S_{31} + S_{55}) \\ \frac{1}{E_{RT}} &= \frac{1}{4} (S_{11} + S_{22} + S_{12} + S_{21} + S_{66}) \end{aligned}$$

Les résultats des mesures sont portés dans les tableaux ci-dessous :

N° arbre	91		223		37		192		189		136	
N° série	A	C	D	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Coté DRLM	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	5
r (mm)	51	63	60	55	64	52	66	85	71	61	78	62
E_R (MPa)	846	878	1039	897	742	839	818	1198	1032	984	870	774
E_T (MPa)	574	576	722	618	522	558	469	487	606	653	563	555
E_L (MPa)	10000	13550	13130	11470	11480	12040	10400	9780	12270	/	11410	12860
E_{TL} (MPa)	/	1153	1281	1100	1179	1157	1227	1144	1196	1441	1286	1282
E_{RL} (MPa)	1910	1943	2148	1685	1395	1536	1588	1981	1836	1738	1636	1502
E_{RT} (MPa)	697	518	695	661	432	482	484	444	566	548	492	459

Tableau 21 : Rigidités des différentes éprouvettes de l'échantillonnage congolais obtenues par essais de compression quasi-statique

2.3.2. Comparaison entre modules d'élasticité longitudinaux obtenus par compression statique et par méthode acoustique

la figure 30 présente, en fonction de la distance à la moelle (r), les mesures du module d'élasticité longitudinal obtenues par méthode acoustique (E_{Ld}) et par compression statique (E_{Lc}). On remarque que les deux mesures sont effectuées à des positions radiales (r) différentes.

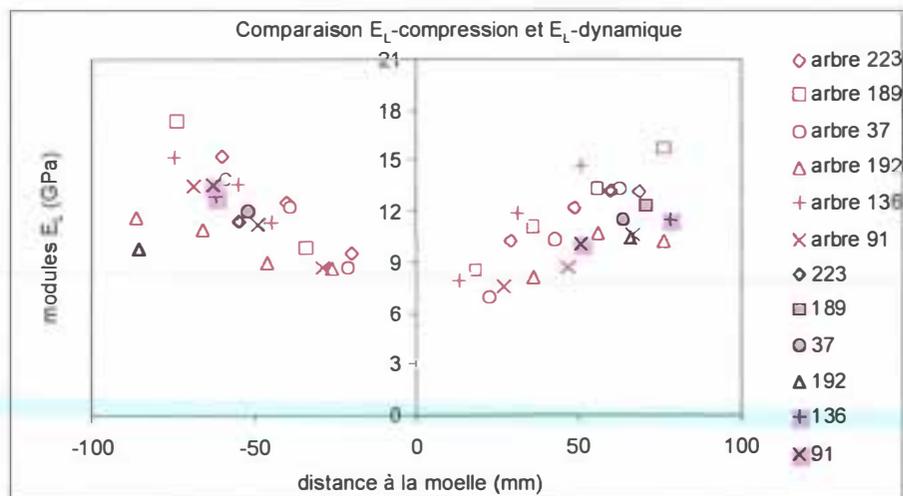


Figure 30 : Modules d'élasticité longitudinaux obtenus par méthode acoustique et compression statique (les points pleins correspondent aux modules obtenus par compression statique et les points vides correspondent à ceux obtenus par méthode acoustique)

Afin de pouvoir comparer les deux mesures E_{Lc} et E_{Ld} nous avons calculé, à partir de la droite de régression linéaire de la relation ($r - E_{Ld}$) pour chaque arbre, le module dynamique interpolé à la même position que la mesure E_{Lc} , que l'on note E_{Ld-cal} . Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 31 : on constate que la méthode de compression quasi-statique surestime le module d'élasticité longitudinal, pratiquement dans tous les cas, relativement à la méthode acoustique. La corrélation entre les deux modules est significative à un seuil de 1%.

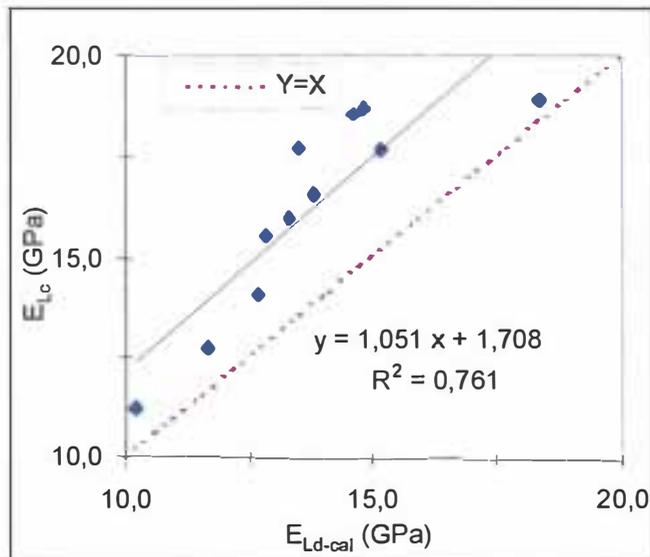


Figure 31 : Comparaison entre le module longitudinal obtenu par compression (E_{Lc}) et celui déterminé, à la même position radiale que E_{Lc} , par interpolation de la droite de regression linéaire de la relation ($E_{Ld} - r$)

2.3.3. Variation des constantes élastiques en fonction de l'infradensité

Les propriétés élastiques du bois vert sont sensibles aux variations de l'état physique du matériau considéré (GUITARD 1987). Parmi les paramètres physiques dont l'influence est certaine nous avons retenu l'infradensité, étant donnée sa plage de variation importante (d'environ $0,4$ à $0,68 \text{ g/cm}^3$). La figure 32 présente la variation des différentes rigidités mesurées sur l'échantillonnage congolais et marocain, par essai de compression, en fonction de l'infradensité.

On note généralement une augmentation plus au moins importante des rigidités avec l'infradensité. Les deux espèces étudiées se distinguent tant par l'infradensité que par les rigidités : Les *Eucalyptus* du Maroc sont plus rigides et plus denses que ceux du Congo. Les ajustements linéaires entre l'infradensité et les différentes rigidités montrent que le module E_T est le mieux corrélé à l'infradensité ; le coefficient de détermination est significatif au seuil de 5%. Par ailleurs les autres modules présentent des corrélations peu significatives.

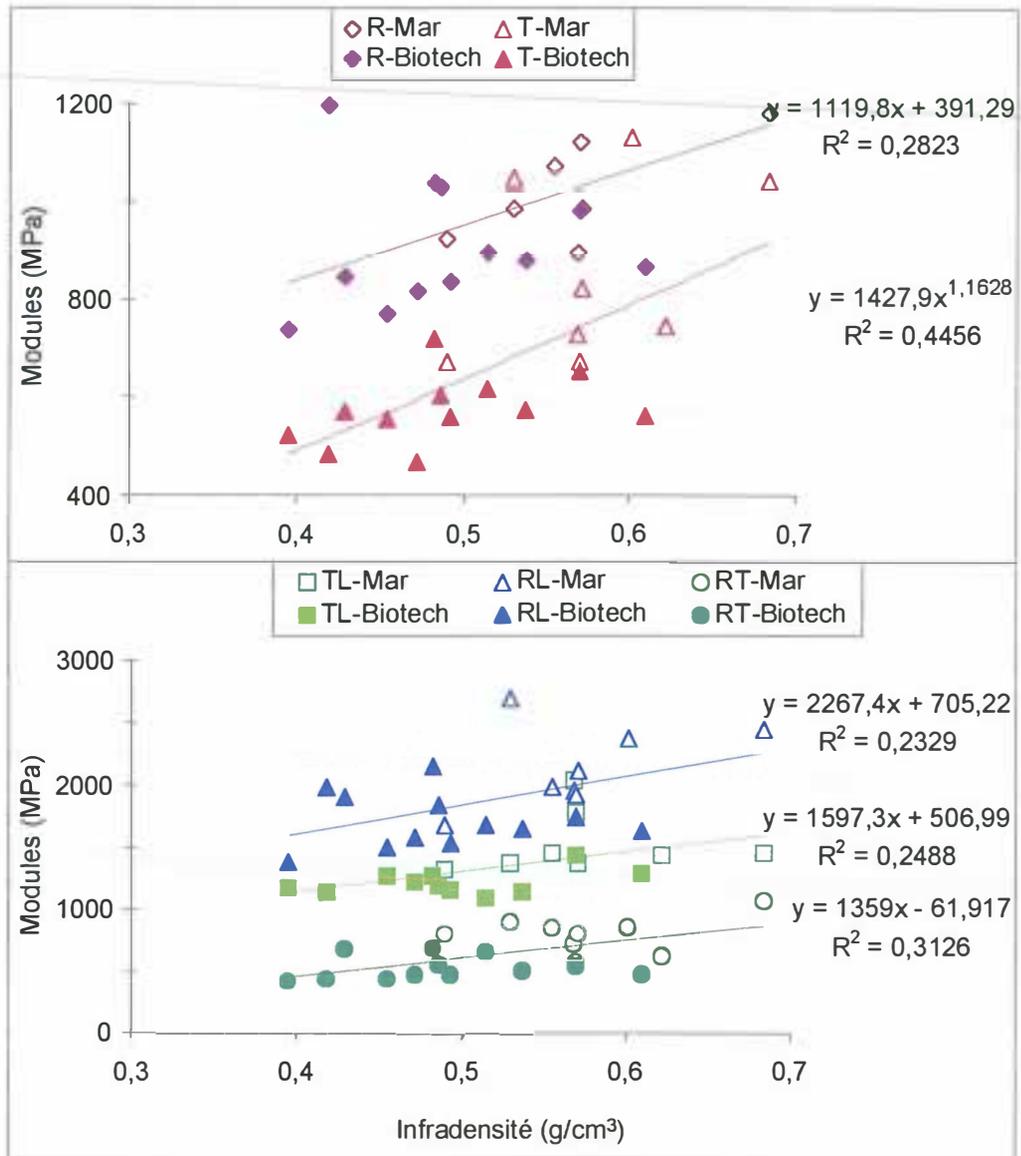


Figure 31 : Relation entre infradensité et modules d'élasticités obtenus par essais de compression statique

2.3.4. Relations entre modules

La recherche des éventuelles relations qui peuvent lier les constantes élastiques mesurées entre elles, s'est révélée intéressante. Les résultats obtenus sont représentés dans la figure 33. Les différentes corrélations entre le module E_T et les autres constantes élastiques sont représentés dans la figure du haut. Par des simples ajustements linéaires, les relations $(E_{RL}-E_T)$ et $(E_{RT}-E_T)$ présentent d'excellentes corrélations significatives au seuil de 1‰. Par ailleurs les autres relations, $(E_{TL}-E_T)$ et (E_R-E_T) sont peu significatives. De la même manière, nous avons cherché à corrélérer le module E_R aux autres constantes élastiques. Les résultats correspondants montrent d'un coté une corrélation $(E_{RL}-E_R)$ significative au seuil de 1‰. D'un autre coté, on constate encore une fois une mauvaise corrélation de E_{TL} à E_R .

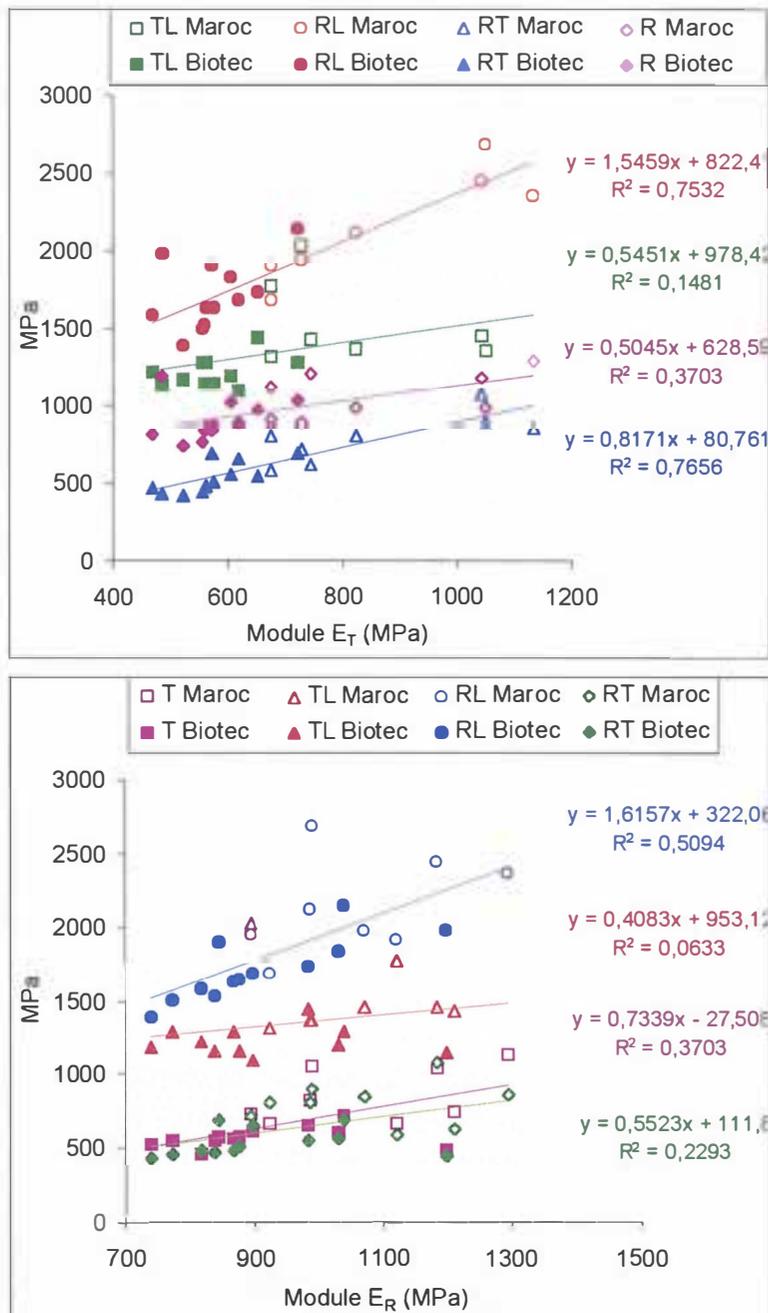


Figure 33 : Relations entre module de rigidité tangential et module radial avec les autres constantes élastiques

On s'aperçoit finalement que l'étude des éventuelles relations entre les constantes élastiques présente un intérêt important dans la mesure où elle peut apporter des informations supplémentaires pour la recherche d'une loi de comportement élastique adaptée aux espèces étudiées. En effet les différentes corrélations étudiées ont donné des résultats plus au moins significatifs statistiquement, en particulier le module d'élasticité tangential E_T est le mieux corrélé aux autres constantes élastiques. D'autres part ce même module s'est révélé encore une fois en bonne corrélation avec l'infradensité. En conclusions la connaissance de la densité et du module d'élasticité longitudinal permet de prédire correctement l'ensemble des constantes élastiques pour un échantillon donné.

2.4. Énergie de rupture

Rappelons que les essais de fissilité ont été réalisés sur des éprouvettes prélevées des arbres (37, 91, 136, 189, 192, 193, et 223) du Congo, de part et d'autre du diamètre coïncidant avec les positions 1 et 5 des mesures de *DRLM*. Les mesures retenues lors de ces essais sont l'énergie surfacique de rupture $G_{F,I}$, la contrainte maximale F_{max} et la rigidité apparente $P_{F,I}$ caractérisée par la pente de la partie linéaire de la courbe (force – déplacement) (Voir figure 34).

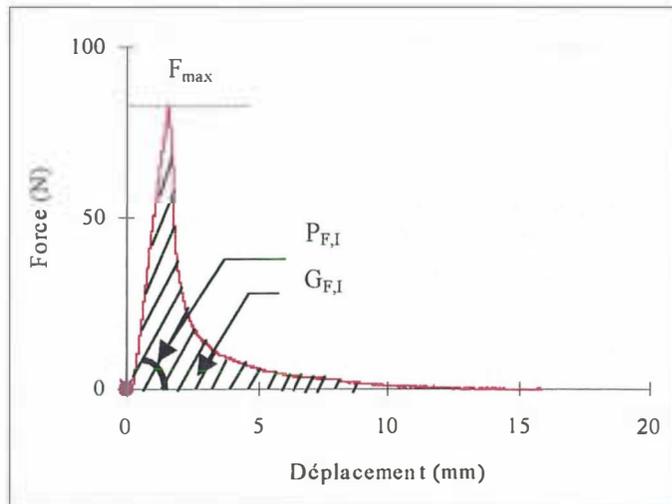


Figure 34 : Différentes grandeurs retenues lors d'un essai de fissilité : $G_{F,I}$ - énergie surfacique de rupture $P_{F,I}$ - module apparent caractérisé par la pente de la partie élastique et F_{max} - force maximale

Le Tableau 22 présente le nombre d'éprouvettes, la valeur moyenne et l'écart-type par arbre, de l'énergie de rupture $G_{F,I}$, de la pente $P_{F,I}$ et de la force maximale F_{max} . On note une énergie de rupture $G_{F,I}$ qui varie pratiquement du simple au double avec une moyenne de 291 ± 69 (J/m^2).

N°	Nb	$G_{F,I}$ (J/m^2)		$P_{F,I}$ (N/mm)		F_{max} (N)	
		Moy	ecart	Moy	ecart	Moy	ecart
37	5	299	57	57	6	85	12
91	5	276	70	57	6	81	8
136	5	313	70	76	20	98	27
189	6	292	43	75	16	83	16
192	6	308	55	46	17	79	21
193	3	316	160	71	12	71	15
223	6	244	61	56	12	74	13
Tot	36	291	69	60	15	84	17

Tableau 22 : Moyenne (Moy) et écart-type (Ecart) par arbre de l'énergie de rupture $G_{F,I}$, de la force maximale F_{max} et de la rigidité apparente $P_{F,I}$

Le graphe de la figure 35 présente les résultats des mesures de $G_{F,I}$ obtenus sur 36 échantillons. Toutefois nous avons rejeté les mesures visiblement aberrantes, liées aux défauts de l'éprouvette. Par une analyse de variance nous avons constaté qu'il n'y a pas d'effet arbre. Par ailleurs on note une forte valeur de $G_{F,I}$ de l'éprouvette prélevée près de la périphérie de l'arbre 193, qui peut être expliquée par la présence d'un fil perturbé. En effet BAILLERES (1994) a observé, sur 88 échantillons d'Eucalyptus congolais (clone 1-45), une valeur de l'énergie de rupture $G_{F,I}$ qui peut varier du simple au triple dans des zones de bois de même nature (du point de vue *DRLM*) avec et sans contre fil.

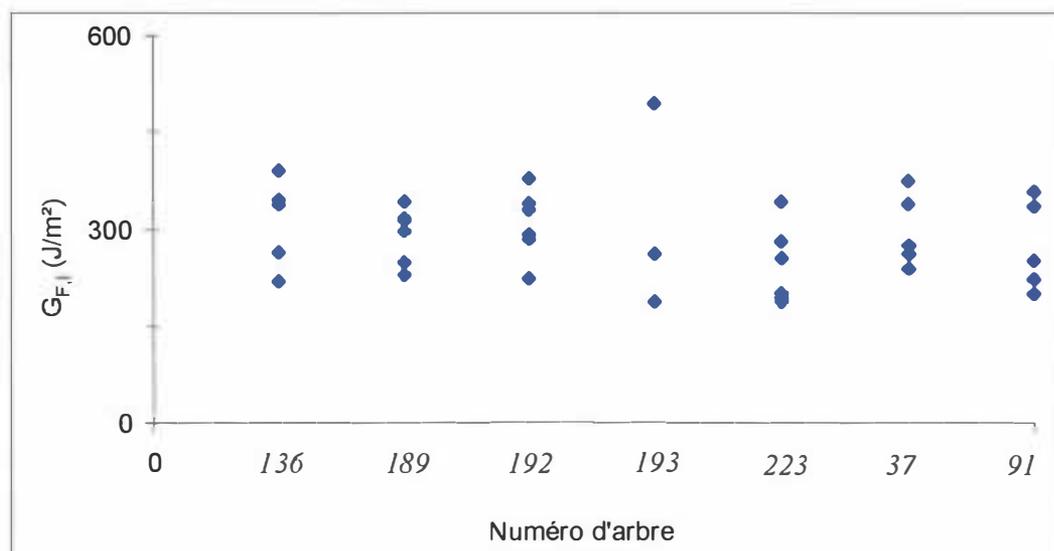


Figure 35 : Distribution de l'énergie de rupture $G_{F,I}$ sur les 7 arbres du Congo étudiés

2.4.1. Variation radiale de l'énergie de rupture

La figure 36a montre la variation radiale de l'énergie de rupture $G_{F,I}$ en fonction de la distance à la moelle. Les valeurs les plus fortes de $G_{F,I}$ sont attribuées généralement aux éprouvettes prélevées proche de la périphérie. Ceci peut être expliqué par une éventuelle présence du contre-fil. En effet, il a été observé chez les Eucalyptus, que plus on s'éloigne de la moelle moins le fil du bois est rectiligne (BAILLERES 1994).

Les résultats des mesures sur 36 échantillons, montrent une corrélation peu significative entre $G_{F,I}$ et la distance à la moelle. Cette corrélation semble plausible lorsqu'on moyenne, pour chaque position radiale, toutes les mesures de $G_{F,I}$ réalisées sur cette position (Figure 4.35b).

Cependant en examinant individuellement les arbres ; la corrélation entre $G_{F,I}$ et la distance à la moelle reste très peu significative, à l'exception de l'arbre 91 sur lequel on observe une évolution radiale manifestée par une forte augmentation de $G_{F,I}$ du cœur à la périphérie (Figure 4.35c).

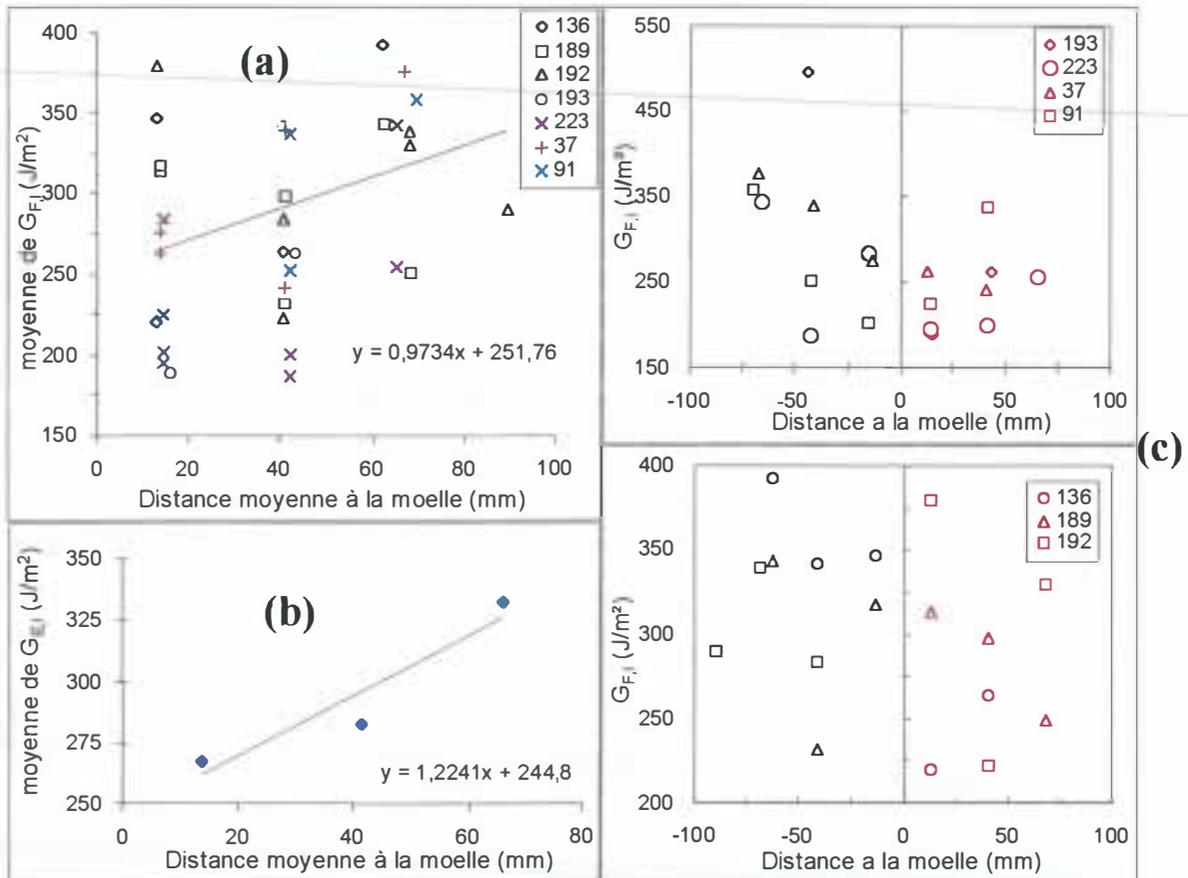


Figure 36 : Variation de l'énergie surfacique de rupture $G_{F,I}$ en fonction de la distance à la moelle pour les 7 arbres du Congo étudiés

2.4.2. Relation entre le niveau des DRLM et l'énergie de rupture

La figure 37 représente la moyenne des $G_{F,I}$ mesurées du cœur à la périphérie, en fonction de la DRLM enregistrée de part et d'autre du diamètre duquel ont été prélevées les éprouvettes (il s'agit des positions 1 et 5). On n'observe aucune relation significative entre le niveau des DRLM et l'énergie de rupture $G_{F,I}$. Par ailleurs on note une valeur de $G_{F,I}$ quasiment constante sur une large plage de DRLM, variant d'environ de $50\mu\text{m}$ à $250\mu\text{m}$.

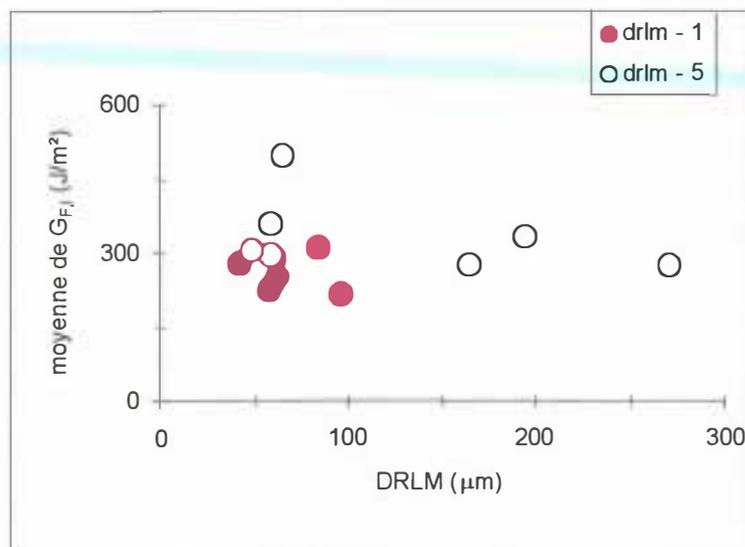


Figure 37 : Energie de rupture en fonction de la DRLM

On s'aperçoit finalement que la variation radiale de $G_{F,I}$ n'est pas clairement mise en évidence. Il est donc plausible de prendre comme critère de fissilité une valeur constante de $G_{F,I}$ correspondant à une valeur moyenne de 300 J/m^2 .

2.4.3. Variation radiale de la force maximale et de la rigidité apparente

La figure 38 présente la variation de la force maximale F_{max} en fonction de la distance à la moelle. Un simple ajustement linéaire, sur toutes les mesures, donne un coefficient de détermination significatif au seuil de 1%. Signalons au passage le cas de l'arbre 91 dans lequel la valeur de F_{max} est pratiquement constante, d'environ 75 N , du cœur à la périphérie. La figure 4.34 (gauche) ne met pas clairement en évidence une éventuelle variation radiale de la rigidité apparente : sur 36 mesures la corrélation linéaire entre $P_{F,I}$ et la distance à la moelle donne un coefficient de détermination ($R = 0,37$) significatif seulement au seuil de 5%.

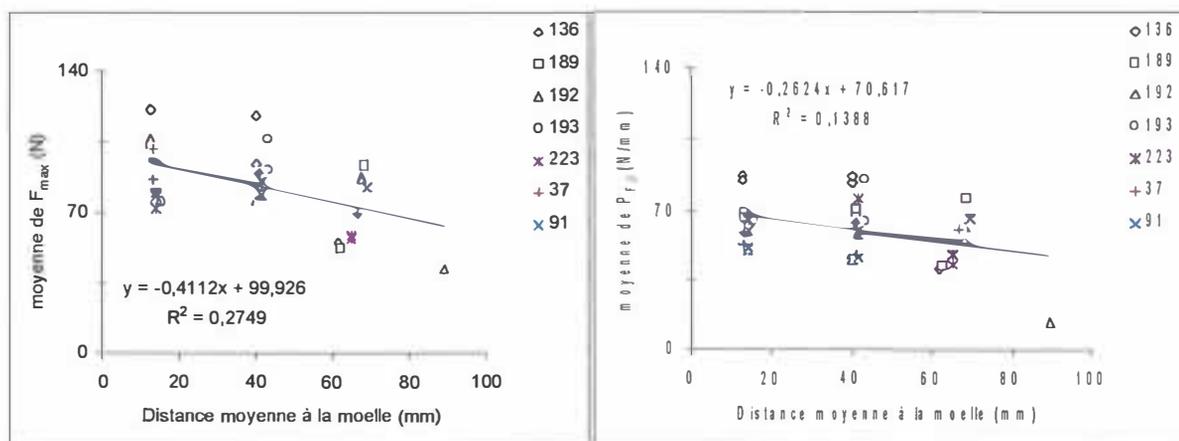


Figure 38 : Variation de la force maximale F_{max} et de la rigidité apparente $P_{F,I}$ en fonction de distance à la moelle

L'étude de la variation des grandeurs $P_{F,I}$ et F_{max} peut présenter un intérêt dans la mesure où elle donne plus d'informations sur le mode de rupture du matériau. Toutefois nous n'en ferons pas usage ici.

2.5. Conclusions

L'étude de la variation radiale du module d'élasticité longitudinal a fourni des informations intéressantes à l'usage des modèles reliant ce dernier à d'autres propriétés physiques telles que l'infradensité ou la distance à la moelle. Généralement on observe une augmentation du module longitudinal du cœur à la périphérie qui peut être traduit par un passage progressif du bois d'une phase juvénile à une phase adulte. Par ailleurs sur le matériel végétal étudié, aucune relation n'a été mise en évidence entre le niveau des déformations résiduelles longitudinales de maturation et le module d'élasticité longitudinal.

L'étude des constantes élastiques du tenseur des complaisances a permis de constater que la densité et le module d'élasticité longitudinal sont de bons estimateurs de l'ensemble des

constantes élastiques. Les analyses ont montré aussi des corrélations plus au moins fortes entre le module tangentiel et certaines constantes élastiques.

On sait que l'ouverture des fentes à cœur est causée par une sur-tension tangentielle occasionnée par une découpe transverse. La fissilité matérielle dans le plan de faiblesse naturel RL, estimée par la mesure de la ténacité $G_{F,I}$, est un paramètre clef pour l'analyse des fentes radiales. Une variation radiale de $G_{F,I}$ n'a pas été mise en évidence, bien que certains individus présentent des variations marquées. De même, aucune relation significative n'a été observée entre le niveau des déformations résiduelles de maturation et la fissilité $G_{F,I}$. Enfin il ne semble pas y avoir d'effet arbre marqué malgré le choix d'un échantillon dont la proportion de fentes en bout est contrastée.

Nous retiendrons donc de cette analyse préliminaire que les caractéristiques qui présentent un intérêt pour la sélection génétique au sein de la famille étudiée sont la DRLM, la densité et le module d'élasticité longitudinal.

3. Caractéristiques physico-chimiques : utilisation de la spectrophotométrie proche infrarouge

SAR4.7 : caractérisation rhéologique de fibres d'eucalyptus : phase exploratoire (P2)

3.1. Principe de la mesure

Dans les industries agro-alimentaires, une grande partie du contrôle de la qualité des matières premières, des denrées en cours de transformation et des produits finis repose sur leur analyse biochimique. Les différents stades d'élaboration des produits doivent répondre des spécifications qui portent en particulier sur leur composition (teneur en eau, en protéines, en matières grasses...)

Les méthodes d'analyses chimiques présentent deux inconvénients :

- ✓ les temps d'analyse et les prix de revient sont élevés,
- ✓ les méthodes sont destructives.

La spectrométrie de réflexion dans le proche infrarouge (SPIR) (en anglais : Near Infrared Spectroscopy ; NIRS) est une méthode d'analyse rapide et non destructive.

C'est une méthode d'analyse quantitative et qualitative :

- ✓ quantitative quand elle permet de prédire la teneur en constituants chimiques,
- ✓ qualitative quand elle permet d'identifier un produit suivant son empreinte spectrale.

La SPIR englobe les aspects spectraux eux-mêmes, mais également les techniques qui lui sont associées, telles que la préparation des échantillons, les analyses de références, et le traitement des données.

Cette méthode d'analyse repose sur l'absorption sélective de la lumière par les composés chimiques. Quand un produit reçoit un rayon lumineux, une partie de ce rayon est absorbée (absorption) et une autre est réfléchi (réflexion). L'échantillon soumis à ces rayonnements absorbe donc une partie de l'énergie générée par ceux-ci. La partie réfléchi est mesurée par un spectromètre

Les liaisons chimiques se comportent comme des oscillateurs qui vibrent en permanence : les atomes se rapprochent et s'éloignent à une fréquence dépendant de leurs masses respectives. Les angles formés par les liaisons adjacentes se modifient.

Une liaison chimique passe d'un état de base à un état excité lorsqu'elle absorbe l'énergie de la radiation proche infrarouge dont la fréquence est égale à sa fréquence de vibration.

La SPIR s'intéresse aux molécules organiques, constituées d'atomes de Carbone, d'Oxygène, d'Hydrogène, d'Azote, ..., reliés entre eux par des liaisons chimiques covalentes. Elle ne dose pas directement un constituant (eau, protéines, matières grasses, glucides, fibres...), mais le nombre de liaisons chimiques spécifiques du constituant (O-H pour l'eau, N-H pour les protéines, C-H pour les matières grasses, ...)

Dans la pratique, ces constituants se retrouvent ensembles et le spectre d'un échantillon est la somme de toutes les absorptions élémentaires. Étant donné d'une part, un certain chevauchement des bandes spectrales des différents constituants et d'autre part, des facteurs inhérents à l'échantillon lui-même (granulométrie, température, ...), de nombreuses interférences

apparaissent et perturbent la proportionnalité entre énergie absorbée et concentration. C'est pourquoi, la spectrométrie dans le proche infrarouge est une méthode indirecte. Préalablement à toute analyse l'instrument doit être étalonné.

Le développement des applications analytiques de la spectroscopie infrarouge nécessite un ensemble de connaissances pluridisciplinaires. L'analyste doit être apte à extraire et interpréter l'information présente dans les spectres et maîtriser les problèmes liés à l'analyse chimique. Il s'agit de rechercher la technique d'échantillonnage, de préparation et de mesure spectrale la plus adaptée au produit étudié afin de mettre en œuvre des traitements statistiques sur les bases spectrales de manière à extraire l'information la plus pertinente.

3.2. Principe de l'étalonnage

La SPIR repose sur un jeu d'échantillons bien défini pour une calibration, et sur un modèle mathématique optimal du point de vue de la précision de la calibration. Le jeu d'échantillons doit être représentatif de la variabilité de la population à prédire. Des limites et des indices de similarité entre les spectres, doivent être fixés pour ce jeu d'échantillons.

En vérité le modèle est valide s'il respecte 2 conditions :

- ✓ validité externe (~ représentativité). Le modèle a été construit à partir d'une variété suffisante d'échantillons pour que tous les cas possibles soient prévus.
- ✓ Validité interne. Les données sur lesquelles le modèle est bâti doivent être fiables et sûres.

La démarche suivie pour établir une calibration se décompose en quatre étapes.

- ✓ Etape 1 : Acquisition des spectres. Mesure de la répétabilité. Construction de fichiers de spectres (données d'absorbance pour les longueurs d'onde mesurées). Correction optique de la dispersion de la lumière. Cette étape est entreprise dès la réception des échantillons et les premiers résultats doivent rapidement servir de guide pour la suite des acquisitions (en particulier l'estimation de la répétabilité d'un sous échantillonnage).
- ✓ Etape 2 : Construction de la population de spectres. Calcul des distances entre échantillons et définition de limites pour la population. Sélection d'échantillons représentatifs de la population sur la base des distances calculées. La construction d'une population bien définie, au sein de laquelle les échantillons sont clairement identifiés, est capitale pour obtenir une bonne compréhension de la variabilité spectrale.
- ✓ Etape 3 : Constitution de fichiers, contenant les valeurs de références (analyses effectuées en laboratoire) et les données spectrales, pour les échantillons sélectionnés. Calcul des régressions, sur la base de longueurs d'onde sélectionnées ou du spectre complet, entre les valeur de références et les données spectrales. Développement d'équations de calibration. Le critère principal de recherche des longueurs d'onde à introduire dans le modèle est de minimiser les écarts entre valeurs de référence et valeurs prédites par le modèle.
- ✓ Etape 4 : Validation du modèle en prédisant des échantillons indépendant. Maintenance de la base de données en ajoutant des échantillons apportant des variations spectrales non prises en compte. Mise à jour des équations de calibration. Cette étape permet d'affiner la précision et la robustesse des calibrations.

L'estimation du temps de travail pour mener à bien les différentes phases du développement d'équations est difficile, toutefois si le temps d'analyse SPIR est court (3 minutes), les

traitements mis en œuvre pour construire la population et établir les régressions sont relativement longs et incompressibles (ces durées sont en partie fonction de la puissance des ordinateurs qui effectuent les calculs).

Pour mémoire, le temps nécessaire à une interprétation correcte des résultats, pour une base de 100 échantillons et un critère à calibrer, est de l'ordre de 4 jours. A ce temps de travail il convient d'ajouter le temps nécessaire à la mise en forme des résultats, l'archivage des données (indexations et sauvegardes), à la maintenance technique de l'appareil, et la mise à jour des bases de données.

3.3. Développement des calibrations pour les caractéristiques physico-chimiques sur échantillons broyés

Ce para graphe fait l'objet d'un article soumis à « Annals of Forest Science », il est intégralement reproduit à l'annexe 2 :

Henri Bailleres, Fabrice Davrieux, Frédérique Ham-Pichavant Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus breeding program. Annals of Forest Science, Editorial Secretary, Centre de Nancy, INRA, F-54280 Champenoux, France.

Pour la clarté du rapport nous donnons ici un résumé de son contenu :

L'évaluation des propriétés du bois à des fins de sélection est généralement entravée par la durée et le coût des essais technologiques. Une des méthodes probablement la plus adaptable aux mesures rapides sur le bois est la spectrométrie en réflexion diffuse dans le proche infrarouge (SPIR). Au Congo, une sélection des meilleurs génotypes pour la plantation clonale est réalisée au sein d'une famille d'eucalyptus de plein frère issue d'une hybridation. Sur cette base génétique étroite, à partir d'échantillons de bois broyé, avant ou après extraction, des relations quantitatives entre les bandes spectrales issues de la SPIR et le taux d'extraits, la quantité et la composition de la lignine, la déformation longitudinale de croissance et les retraits sont analysés en terme de précision de la prédiction. Les résultats obtenus montrent que la SPIR peut être utilisées efficacement pour prédire les caractéristiques qui dépendent étroitement de la constitution chimique du bois. Dans le cas contraire ou bien lorsque la mesure de référence est imprécise ou peu variable, la prédiction n'est pas exploitable. Cependant des améliorations méthodologiques et métrologiques sont envisageables.

3.4. Développement des calibrations pour les caractéristiques physico-mécaniques sur échantillons massifs

Dans ce paragraphe nous nous proposons d'étudier une méthode d'évaluation des caractéristiques physiques et mécaniques du bois, basée sur une mesure de spectres proche infrarouge directement acquis sur des échantillons massifs. Par rapport au paragraphe précédent l'exploitation de cette méthode permet d'éviter la phase de broyage qui est souvent longue et fastidieuse.

3.4.1. Matériel utilisé :NIRSystems 5000 (Foss/Perstorp)

Cet appareil est généralement utilisé dans l'industrie agro-alimentaire ou pétrochimique.

Il se caractérise par :

- Lampe à filament de tungstène
- monochromateur à réseau holographique
- Gamme de longueurs d'onde 1100-2500 nm
- Mode de mesure : réflexion diffuse

De plus l'appareil utilisé est équipé d'une fibre optique (figures 39 et 40). Ce dispositif permet une prise de spectres très rapide en de multiples points surfaciques au gré de l'opérateur. il permet également de s'affranchir de la fastidieuse opération de broyage.

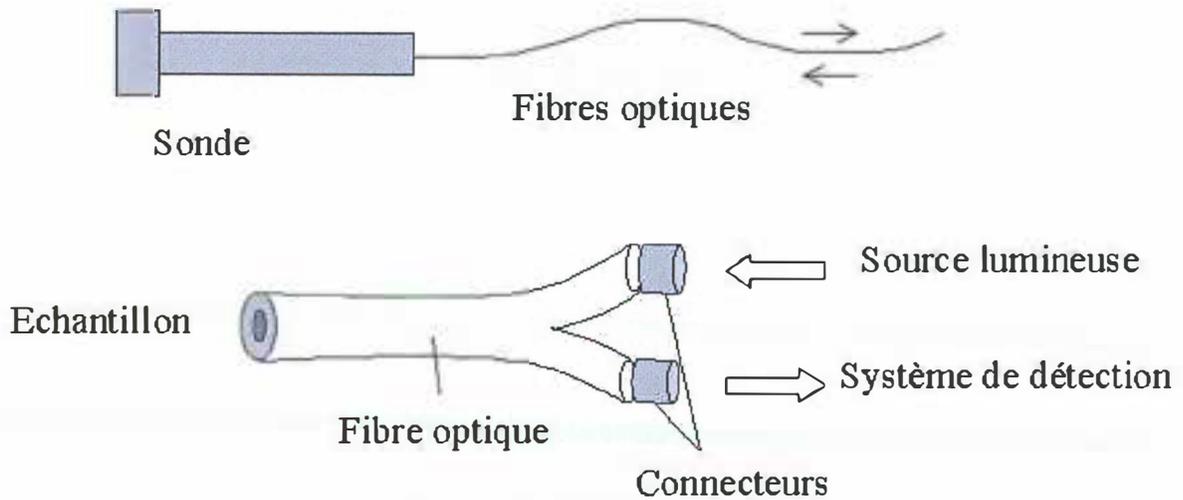


Figure 39 : principe du passage de la radiation par la fibre optique.



Figure 40 : Appareil NIRSystems 5000 (Foss/Perstorp).

Le traitement des données spectrales ne peut pas se faire directement. Nous avons donc recours à des traitements statistiques qui permettent de mettre en corrélation les valeurs d'absorption à différentes longueurs d'onde avec les valeurs obtenues par la référence de

laboratoire. Cette procédure est par la suite validée sur des échantillons indépendants. Les différents traitements doivent permettre d'obtenir une équation de calibration dont le domaine de validité est connu.

3.4.2. Technique de développement d'une calibration

Toutes les caractéristiques mesurées par les méthodes classiques de laboratoire font l'objet d'une recherche d'une équation de calibration par l'analyse des spectres proches infrarouges sur les mêmes échantillons.

Cette procédure de calibration est réalisée à l'aide du logiciel propriétaire : WINISI II de la société FOSS.

3.4.2.1. Construction de la population : analyse en composantes principales (ACP).

La SPIR repose sur l'analyse d'une population d'échantillons bien définie. La population doit être représentative de la variabilité totale de la caractéristique à déterminer. Elle définit le domaine de validité qui se caractérise par des limites et des indices de similarité entre les spectres. En général, on dispose d'un très grand nombre de spectres contenant de très nombreuses variables corrélées entre elles. Il faut donc extraire l'information de cette matrice spectrale (n échantillons, p longueurs d'onde) et définir une distance par rapport au spectre moyen.

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique essentiellement descriptive dont l'objectif est de présenter, sous forme graphique, le maximum de l'information contenue dans un tableau de données. Elle permet d'évaluer la dispersion d'une population ou de comparer plusieurs populations entre-elles.

Si une population fait l'objet d'une calibration en vue d'une prédiction, l'ACP est indispensable pour déterminer si de nouveaux échantillons à prédire font partie de la population utilisée pour la calibration.

Ce tableau (matrice) est constitué, en ligne, par les individus (ici les échantillons d'Eucalyptus) et en colonnes par les longueurs d'onde du spectre acquis (Figure 41)

A l'intersection d'une ligne et d'une colonne, correspond une valeur de l'absorbance du spectre pour un échantillon donné.

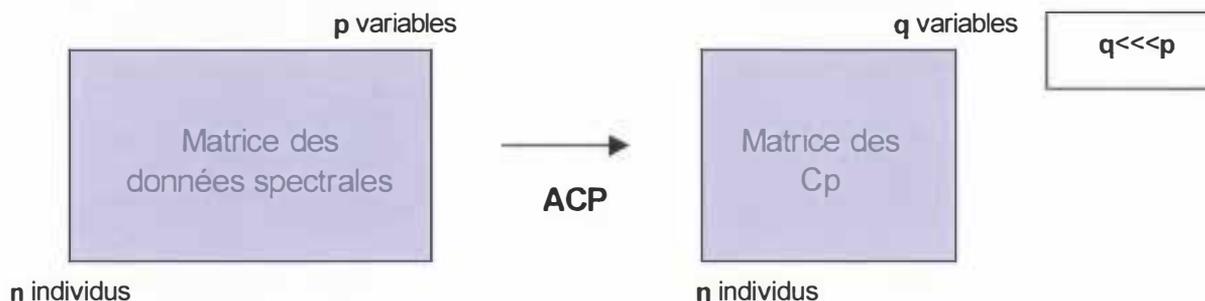


Figure 41 : schéma de construction d'une analyse en composantes principales.

Les nouvelles variables q (composantes principales Cp_1, Cp_2, \dots, Cp_n) sont des combinaisons linéaires des premières p .

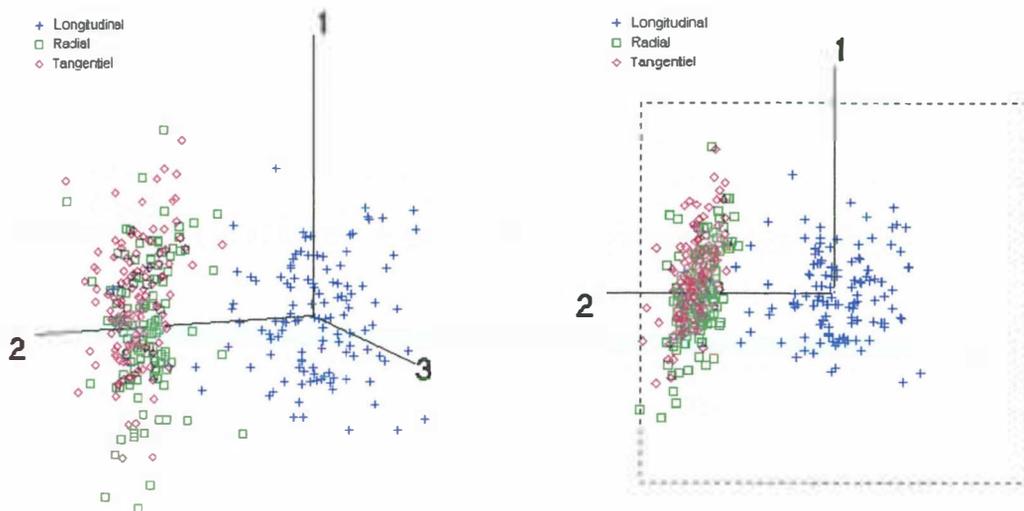
Les composantes principales, qui contiennent la quasi-totalité de l'information, ont l'avantage d'être non corrélées, ou orthogonales, entre elles. Elles condensent l'information d'un facteur 10 à 100.

Chaque composante principale explique alors une partie de la population des données spectrales.

La première Cp_1 est celle qui explique le mieux la totalité de la variation des données spectrales, la seconde explique au mieux la totalité des données restantes, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'un nombre X de Cp explique 100% de la population.

Les trois premières Cp expliquant le mieux la population, il est alors possible de représenter la population spectrale en deux ou trois dimensions.

Exemple :



Représentation de trois populations spectrales (2D et 3D)

L'ACP permet de calculer un terme appelé « distance de Mahalanobis » qui est utilisé pour évaluer l'appartenance d'échantillons à une population.

En pratique, un échantillon qui présente un H supérieur ou égal à 3, a une probabilité inférieure ou égale à 0.01 d'appartenir au groupe. Inversement, des échantillons ayant des $H < 3$ seront classés comme appartenant au groupe :

$$H = X (X' X)^{-1} X' : \text{Matrice des distances } H$$

$$(X' X)^{-1} : \text{matrice inverse des variances covariances}$$

$$X : \text{Matrice des données (spectrales) centrées}$$

Les distances H sont calculées à partir de la matrice des composantes principales suivant les formules :

Distance moyenne=

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_i$$

Distance standardisée =
$$\tilde{H}_i = \frac{H_i}{\overline{H}}$$

Le calcul de ces distances standardisées, donne pour chaque échantillon, la distance à un spectre moyen. Elle permet d'établir un environnement global sur la base du H et de définir des échantillons éloignés (spectralement différents). Ainsi nous pouvons identifier des échantillons hors normes (outliers), sur la base du spectre en estimant leur valeur de H ($H > 3$).

3.4.2.2. La calibration à proprement dit

La calibration est un ensemble d'outils statistiques qui permet d'étalonner un spectromètre proche infrarouge avec des caractéristiques connues de plusieurs échantillons d'une même famille. Par la suite, uniquement en établissant le spectre d'un échantillon appartenant à cette famille, on pourra alors prédire ses caractéristiques avec une erreur qui dépendra de la qualité de l'équation de calibration sur la population de référence.

Suivant la loi de Beer-Lambert, l'absorption d'un composé est proportionnelle à sa concentration. Si la valeur du retrait au séchage est proportionnelle à la quantité (concentration) de certains groupements chimiques dans une même catégorie de bois, alors l'absorption dans les bandes concernées sera proportionnelle au retrait.

En conséquence il est possible d'établir un modèle prédictif multilinéaire reliant les valeurs d'absorption (données spectrales) et les valeurs de référence du retrait au séchage.

Le modèle classiquement employé est une « régression linéaire multiple », qui s'écrit :

$$\hat{y} = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_i X_i + b_p X_p$$

\hat{Y} = valeur prédite du retrait

b_i = coefficients de régression

X_i = mesure de l'absorbance à la longueur d'onde λ_i

p = nombre de terme

b_0 = terme constant

3.4.2.2.1. Méthode de régression : comment déterminer les coefficients « b ».

Le principe de calcul est fondé sur le « critère des moindres carrés », C'est-à-dire que l'on cherche les valeurs des coefficients du modèle qui minimisent la somme des carrés des écarts entre la donnée observée de l'échantillon et la valeur prédite par le modèle.

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

y_i = valeur du retrait mesurée

\hat{y}_i = valeur du retrait prédite

Cette statistique est l'estimation de l'écart type de l'erreur aléatoire entre les valeurs de référence et les valeurs prédites.

Ecart type de prédiction SEP

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N}}$$

C'est l'écart type des résidus dus aux différences entre les valeurs de références et les valeurs prédites.

Il est calculé sur un jeu de N échantillons indépendants.

Ecart type de validation croisée SECV

$$SECV = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-1}}$$

Ce critère permet de fixer le seuil de redondance. Il sert à déterminer le nombre moyen de termes "idéal" à prendre en compte.

Le calcul est fait de façon itérative. Le jeu d'échantillons est divisé en n groupes. Le modèle est développé à partir des (n-1) groupes, le groupe restant sert à valider le modèle. L'opération est reproduite n fois. En pratique nous utilisons 4 cross validations, soit 4 sous-groupes, chaque sous-groupe étant prédit par les trois autres.

Cette technique permet de définir ce qui est dû au signal et ce qui provient du bruit, elle permet donc d'éviter le sur-ajustement. Ce terme est une approximation de SEP.

3.4.2.2.4. Validation d'un modèle

Les critères définis précédemment sont applicables dans les régressions utilisées en SPIR, toutefois certains critères sont mieux adaptés que d'autres selon l'utilisation future du modèle (description, prédiction, estimation, interprétation ou contrôle). En particulier l'interprétation d'un coefficient de corrélation multiple (R) ou de son carré, le coefficient de détermination (R²), n'est conseillé que si le modèle a été construit dans un but descriptif.

En SPIR les équations de calibration sont essentiellement développées pour prédire un constituant, il est alors plus intéressant dans ce cas de contrôler les estimations de la SEP et de la SEC.

L'estimation de la SEP est un bon critère pour juger de la validité d'un modèle. Il est généralement admis que cet écart-type ne doit pas être supérieur à 1.3 fois l'écart-type de calibration (SEC).

La comparaison de ce critère (SEP) et de l'écart type (SD) de la distribution du paramètre étudié, permet de calculer le RPD (Ratio of Performance to Deviation). Le calcul de ce critère permet de définir les performances d'une calibration suivant la valeur du RPD obtenue. Ainsi une calibration est intéressante quand la valeur de RPD est supérieure à 3.

RPD = SD/SEP	Qualité	Application
<1.0	Très pauvre	non recommandée
1.0-2.4	Pauvre	non recommandée
2.5-2.9	Juste	tests bruts
3.0-3.9	Raisonnable	tests
4.0-5.9	Bonne	contrôle qualité
6.0-7.9	Très bonne	assurance qualité
8.0-10.00	Excellent	toutes applications
>10.0	Supérieure	aussi bien que référence

Préconisé par : P.Williams, Canadian Grain Commission (NIR news Vol. 4 No. 6 1993).

3.4.3. Échantillonnage

3.4.3.1. Découpe des échantillons de bois.

Pour chaque arbre, des billons de 40 cm ont été prélevés à une hauteur de 1.30 m. Les éprouvettes sont découpées radialement le long de l'axe passant par la moelle. Des barreaux pour la mesure de la rigidité sont découpés longitudinalement 0.4 m (face longitudinale) x 0.040 m (face tangentielle) x 0.020 (face radiale).

Du fait de la variation importante des propriétés du bois sur le diamètre à l'intérieur de chaque arbre, 3 à 8 barreaux sont prélevés sur chaque rayon (fig.1 page suivante).

Enfin, sur chaque barreau est prélevé une éprouvette 0.04 m (L) x 0.040 m (T) x 0.020 (R) pour la mesure de la densité des retraits et des gonflements.

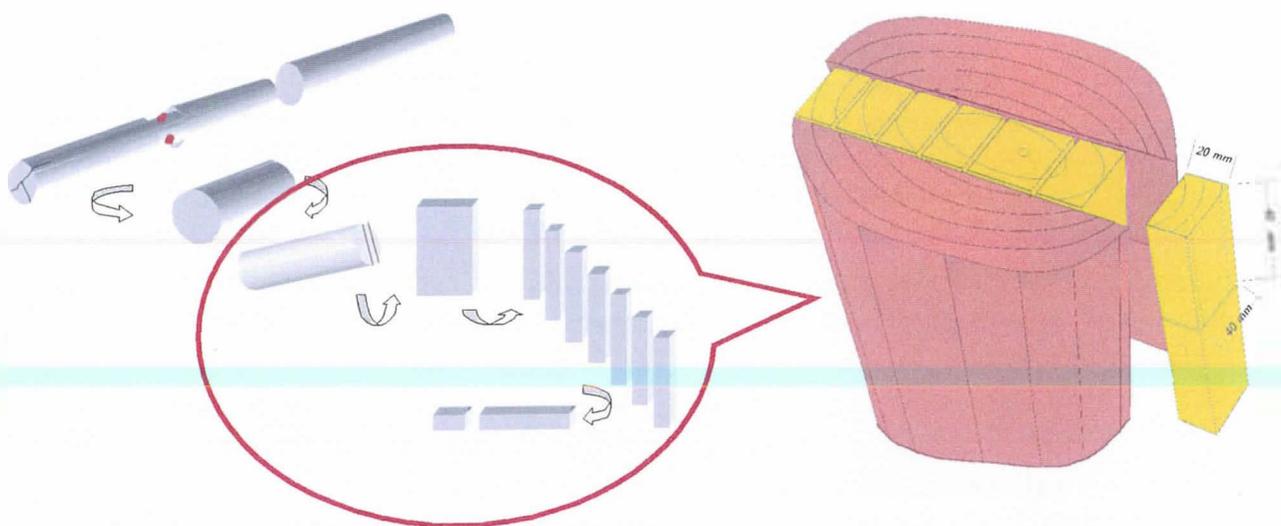


Figure 41 : principe d'échantillonnage par arbre

3.4.3.2. Marquage des échantillons

Chaque éprouvette est marquée pour que l'on puisse connaître sa position par rapport à la direction Nord-Sud. Les échantillons prélevés vers le Nord par rapport à la moelle portent le chiffre 1, ceux prélevés côté Sud portent le chiffre 5. Les échantillons prélevés près de l'écorce sont numérotés 1 et ainsi de suite jusqu'à la moelle notée M.

N° arbre – N° de direction – N° éprouvette

Exemple : 179.1.1

3.4.3.3. Conservation des échantillons.

Les échantillons sont conservés dans l'eau à l'écart de la lumière. Leur saturation en eau est assurée par une immersion prolongée de plusieurs mois.

3.4.3.4. Sélection des échantillons pour la calibration.

Mesurer plusieurs propriétés physiques par des méthodes classiques sur les 1000 échantillons de l'étude serait coûteux en temps et en argent. La calibration de caractéristiques sur environ 10% de la population permettrait de prédire rapidement celles des arbres restants.

Il est donc nécessaire de sélectionner judicieusement une vingtaine d'arbres afin d'étudier environ 120 échantillons.

L'objectif principal est de calibrer le retrait au séchage, le module d'élasticité et la densité. Afin que la calibration puisse correctement être réalisée, la vingtaine d'arbres sélectionnés doit avoir la plus grande variabilité au regard des propriétés étudiées. C'est-à-dire que le lot d'échantillons sélectionné doit représenter le plus fidèlement possible la variation de la population étudiée.

Ne connaissant, ni ne pouvant estimer le retrait des échantillons, il est nécessaire de réaliser la sélection en se basant sur d'autres critères choisis à priori.

Les seules mesures ayant été effectuées sur la totalité de la population étant « le module d'élasticité » et la « DRLM » (déformation résiduelle longitudinale de maturation); la sélection est donc réalisée sur les valeurs de ces caractéristiques en considérant qu'il existe une corrélation entre ces propriétés et les propriétés à calibrer.

11 arbres représentant au mieux la variabilité de la DRLM sont choisis.

12 arbres représentant au mieux la variabilité du module d'élasticité le sont également.

Au total, un lot de 23 arbres (123 échantillons) sont donc sélectionnés.

3.4.4. Méthodes de mesure

3.4.4.1. Le retrait

3.4.4.1.1. *introduction*

Lorsque le taux d'humidité d'un bois augmente, ce dernier gonfle. Lorsqu'il diminue, il se rétracte. Cette variation dimensionnelle n'est observée qu'entre l'état anhydre (Humidité = 0%) et le point de saturation des fibres PSF (Humidité \approx 30%) en dessous duquel l'eau n'est plus liée à la paroi cellulaire. Le retrait est le phénomène qui se produit lors du séchage du bois en dessous du point de saturation des fibres lorsque l'eau adsorbée par les parois des cellules est évacuée. Ces propriétés sont anisotropes. En effet, le retrait tangentiel est supérieur au retrait radial (rapport d'environ 2), lui même très supérieur au retrait longitudinal (de l'ordre de 50). Le retrait au séchage est une caractéristique physique du bois très importante dès lors que l'on s'intéresse au conditionnement des produits.

3.4.4.1.2. *Définition*

Pour calculer le retrait, une mesure de l'éprouvette est réalisée à l'état saturé puis dans un état proche de l'état anhydre.

Le retrait se déduit des deux mesures effectuées entre l'état saturé en eau et un état où l'humidité est réduite.

Retrait linéaire en % :

$$R = \frac{(D_s - D_h)}{D_s} * 100$$

D_s : dimension de l'échantillon à l'état saturé.

D_h : dimension de l'échantillon à l'humidité h .

3.4.4.1.3. Matériel utilisé

La mesure du retrait est effectuée avec un capteur Laser MICRO-EPSILON relié à un ordinateur grâce à une carte d'acquisition. Un logiciel de traitement des données a été spécialement créé par un informaticien du CIRAD.

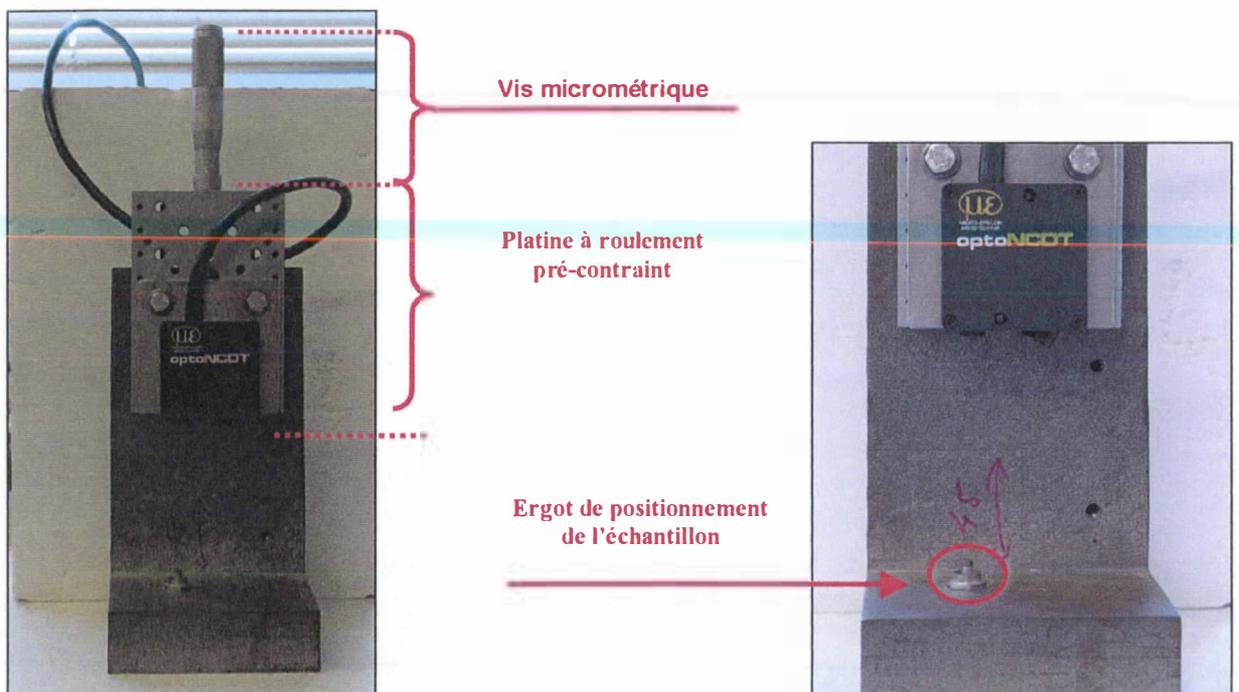
Capteur de déplacement utilisé pour la mesure sans contact : Capteur MicroEpsilon OD1605.10).

La source de lumière est une diode LED invisible (diode électro luminescente, longueur d'onde 900 nm IR).

Le capteur émet un faisceau pulsé et focalisé (diamètre 2 mm) sur la surface de référence, la lumière rétrodiffusée par la pièce est captée à l'aide d'une lentille spéciale sur un récepteur de position se trouvant dans le capteur PSD (position sensitive device).

Ce récepteur délivre un signal proportionnel à la position du faisceau reçu, donc à la distance de l'objet du capteur.

Le capteur est fixé sur un support mobile dont le déplacement est contrôlé et mesuré à l'aide d'une vise micrométrique fixée sur une platine à roulement pré-contraint (précision 10 micron).(Figure 42).



3.4.4.1.4. Figure 42 : dispositif de mesure du retrait

3.4.4.1.5. Principe de la mesure avec un capteur Laser

La mesure de la distance entre le capteur et l'échantillon est basée sur le principe de la triangulation. (Figure 43)

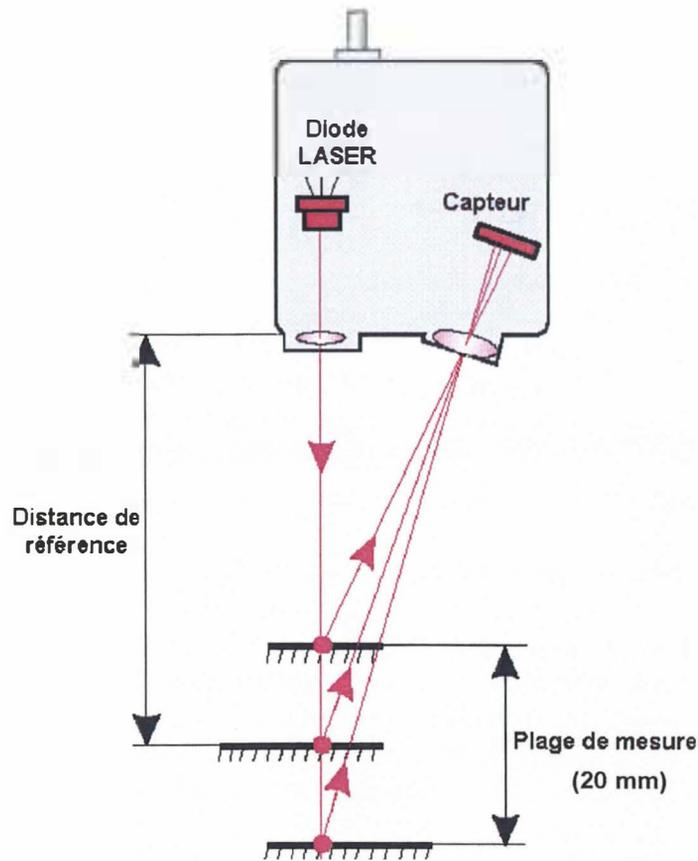


Figure 43 : principe de mesure du capteur LASER.

En fonction de la distance entre la lentille et l'éprouvette, le capteur fournit une tension électrique de plus ou moins 10 Volts. Une calibration (indépendante de celle fournie par le constructeur) de la mesure est donc nécessaire pour transformer cette valeur de tension en millimètres. Cette calibration est effectuée en déplaçant le capteur avec la vis micrométrique tout en relevant les tensions fournies sur une série de position couvrant la plage de mesure du capteur. Nous avons fait varier la vis micrométrique de 0 à 20 mm au pas de 100 microns et noter la tension correspondante.

Il y a eu 6 séries de mesures :

- pour le *bois humide* sur chaque axe (longitudinal, radial et tangentiel).
- idem pour le *bois sec*.

Ces 6 mesures permettent de générer 6 calibrations en fonction de l'état de surface de l'échantillon (3 faces X 2 humidités) qui risque de modifier la réponse du capteur.

Grâce à ces mesures, nous avons pu ajuster pour chaque face une équation de la forme :

$$y=a+bx+cx^2+dx^3+ex^4+fx^5+gx^6+hx^7+ix^8+ex^9$$

Elle est choisie pour générer une erreur de l'ordre du micron (à comparer au 30 microns d'erreur linéaire de l'équation fournie par le constructeur). Les coefficients de l'équation de la

courbe « Déplacement en fonction de la tension » sont ensuite déterminés à l'aide du logiciel TABLE CURVE 2D.

La calibration est exécutée sur un échantillon pris au hasard, à l'état saturé et à l'état anhydre ainsi que sur chacune des trois faces (longitudinale, radiale et tangentielle).

Toutes ces calibrations sont effectuées afin de s'affranchir des éventuelles erreurs de mesures dues à des différences d'états de surfaces qui peuvent modifier la rétro diffusion du faisceau IR.

3.4.4.1.6. Manipulation

Avant toutes mesures, il est nécessaire pour calculer les dimensions des échantillons, d'établir une référence au niveau du socle où l'éprouvette repose.

Détermination de la référence.

Le capteur possède une plage de mesure restreinte de 10 mm. Les dimensions de l'échantillon étant supérieures à cet intervalle, il est nécessaire d'établir une référence au niveau du socle, puis de remonter le capteur à l'aide de la vis micrométrique. Une mesure au sommet de l'éprouvette est alors effectuée. La dimension de l'éprouvette se déduit du déplacement de la vis entre la référence et la mesure sur l'échantillon.

Protocole illustré page suivante (Figure 45) :

- (1) L'ergot permettant de repositionner précisément les échantillons est abaissé, une petite plaquette de bois est placée sur l'ergot de façon à ce qu'elle soit au même niveau que le socle (Figure 44).
(La plaquette de bois permet de s'affranchir d'une éventuelle erreur de mesure due à la différence de surface entre le bois et le métal du socle).

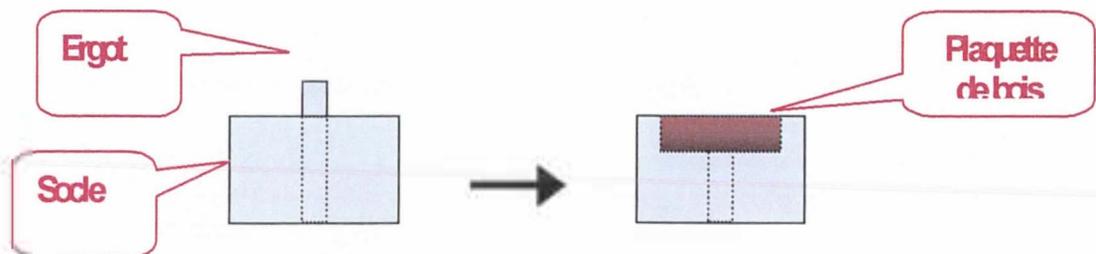


Figure 44 : positionnement de la plaquette de bois pour la référence.

- (2) Le capteur est déplacé à l'aide de la vis micrométrique afin que la plaquette de bois soit au milieu de la plage de mesure (tension de sortie ≈ 0 V).
- (3) Les valeurs de la tension de sortie (V_{ref}) et de la position de la vis (VIS_{ref}) sont précisément relevées.
- (4) La plaquette de bois est retirée et l'ergot est relevé.
- (5) La tête du capteur est remontée à l'aide de la vis micrométrique jusqu'à une position qui correspond à la dimension nominale des éprouvettes dans la direction de mesure. Lorsque l'échantillon est en position de mesure, sa dimension avant séchage est dans la partie supérieure de la plage de mesure afin de s'assurer de rester dans cette plage après séchage.

(6) La dimension de l'éprouvette est alors :

$$D = (VIS_{\text{échantillon}} - VIS_{\text{ref}}) \pm (V_{\text{échantillon calibré}} - V_{\text{ref calibré}})$$

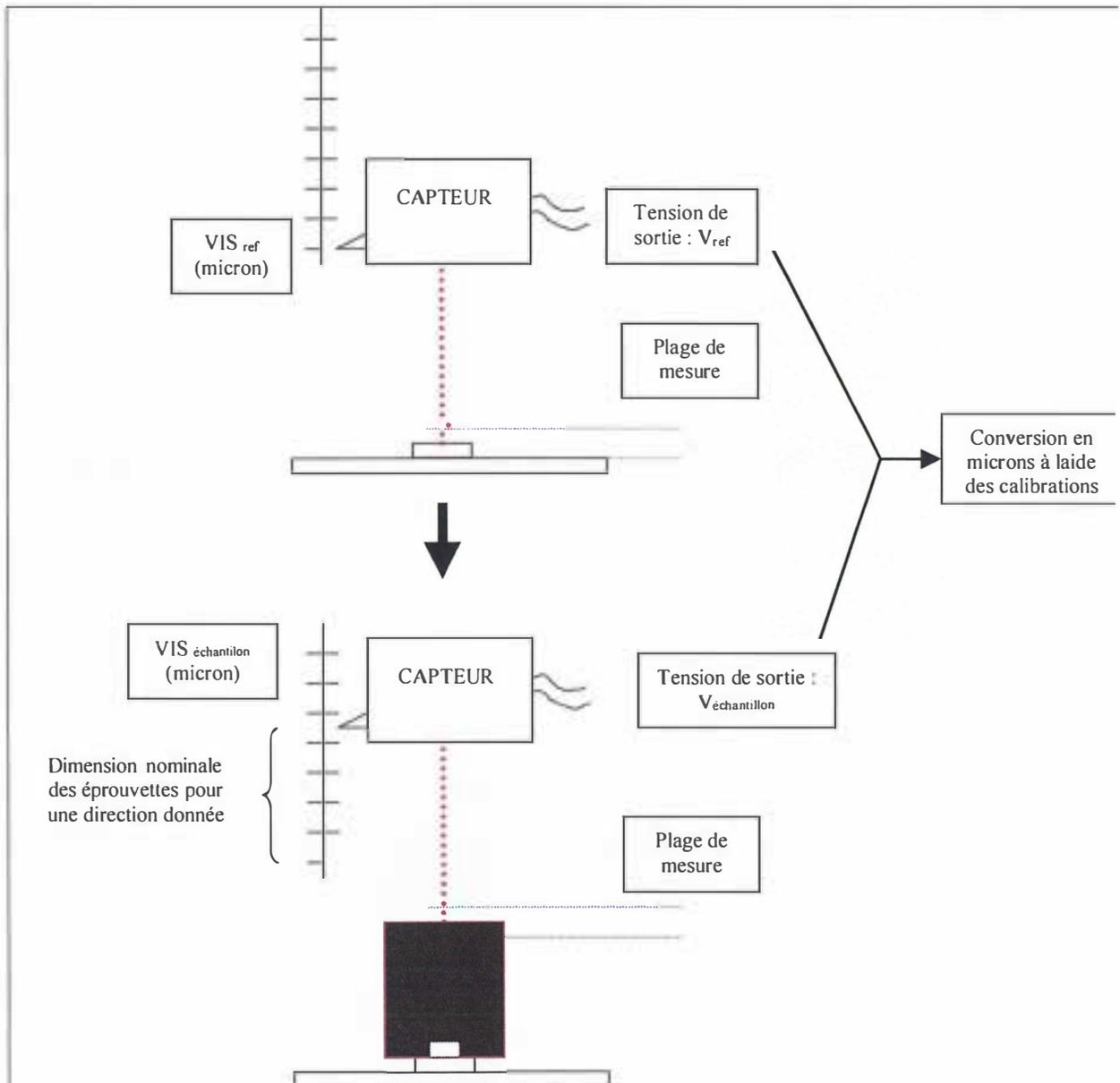


Figure 45 : protocole de mesure de la référence (capteur MICRO-EPSILON)

Placement et mesure de la dimension d'une éprouvette.

Afin de minimiser l'erreur sur le calcul du retrait, la mesure sur l'éprouvette saturée se fait au même point que la mesure sur l'éprouvette sèche. A cet effet, durant l'échantillonnage, les éprouvettes ont été percées suivant les trois axes (longitudinal, radial et tangentiel).

Les échantillons sont alors « emboîtés » sur l'ergot du socle. L'éprouvette est placée sur le socle en respectant rigoureusement la même orientation entre l'état saturé et l'état sec à 5%.

Estimation de l'erreur sur la détermination du retrait : SEL.

Le retrait se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$R = \frac{(D_s - D_h)}{D_s} * 100$$

L'erreur est alors :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta(L - L_o)}{(L - L_o)} + \frac{\Delta L_o}{L_o}$$

$\Delta(L - L_o)$: erreur de mesure (calculée à partir d'un essai de répétabilité et de la précision du capteur).

ΔL_o : erreur de repositionnement et de précision de la vis micrométrique (≈ 20 microns).

L_o : moyenne des dimensions de l'échantillon saturé mesurées sur un axe.

L : moyenne des dimensions de l'échantillon sec mesurées sur un axe.

$(L - L_o)$: moyenne des retraits mesurés sur un axe.

Ainsi, l'erreur commise sur la détermination du retrait pour chaque axe est :

$$\text{Axe Radial : } \frac{\Delta R}{R} = 2.2\%$$

$$\text{Axe Tangentiel : } \frac{\Delta R}{R} = 0.6\%$$

$$\text{Axe Longitudinal : } \frac{\Delta R}{R} = 35\%$$

3.4.4.1.7. Séchage des échantillons

Les éprouvettes saturées en eau doivent être séchées à une humidité inférieure à 30% (PSF). Elles sont séchées jusqu'à une humidité de 5%.

Le séchage s'effectue dans une étuve réglée en température et en hygrométrie. La table d'équilibre hygroscopique du bois permet de déduire l'humidité du bois lorsque la température de l'étuve et l'humidité relative de l'air sont connues.

Le séchage ne doit pas être trop rapide autour du PSF sous peine de provoquer un phénomène appelé « COLLAPSE ». Lorsque l'eau dans les cellules s'évacue trop vite, il se crée une dépression à l'intérieur de ces dernières. Il en résulte alors un écrasement des cellules.

A la fin du programme, quelques échantillons sont pesés deux fois sur une balance de précision à 6 heures d'intervalle afin de vérifier si le séchage est achevé. Ainsi s'ils n'ont pas perdu d'eau (perte de masse inférieure à 0.1%), ils sont considérés comme ayant atteint l'hygrométrie désirée de 5%.

Après le séchage, l'observation des éprouvettes révèle que certaines sont légèrement déformées (gondolées ou écrasées). Les échantillons les plus déformés sont ceux situés à proximité de la moelle ou contenant la moelle. Du plus certain des ces échantillons sont fissurés. Cela est certainement dû au phénomène de « collapse » expliqué précédemment.

Une nouvelle incertitude non quantifiable sur la mesure du retrait semble alors être introduite. Le « collapse » est un phénomène inhérent au séchage lié à la qualité du bois. Nous décidons donc de l'inclure dans l'étude même si cela peut amener une erreur dans la calibration. En effet nous avons décidé de nous placer dans des conditions réelles d'exploitation de la future méthode.

3.4.4.1.8. Analyse des valeurs obtenues

Afin d'estimer la répartition des valeurs, les principales données statistiques sont calculées. Il est nécessaire d'évaluer la dispersion d'une population pour réaliser correctement la calibration.

Analyse des populations

Retrait Radial (en %) et en (mm) :

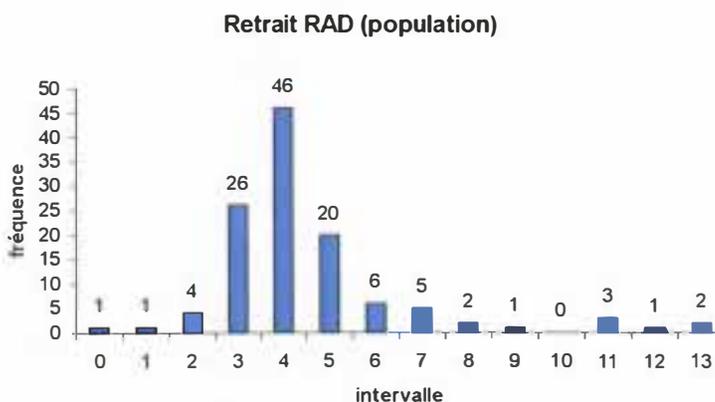
Valeur minimale : 0.36% / 0.08mm

Valeur maximale : 12.29% / 4.09mm

Moyenne : 4.02% / 0.97mm

Ecart type : 2.12 / 0.63mm

Répartition sur l'intervalle (histogramme) :



Retrait Tangentiel (en %) et en (mm) :

Valeur minimale : 2.76% / 0.84mm

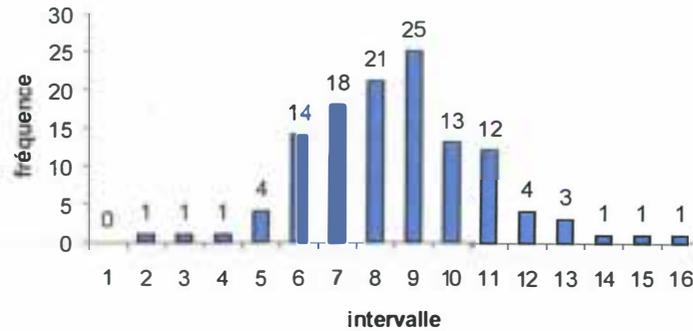
Valeur maximale : 16.26% / 6.11mm

Moyenne : 9.04% / 3.41mm

Ecart type : 2.24 / 0.84mm

Répartition sur l'intervalle (histogramme) :

Retrait TAN (population)



Retrait Longitudinal (en %) et en (mm) :

Valeur minimale : -0.86% / -0.36mm

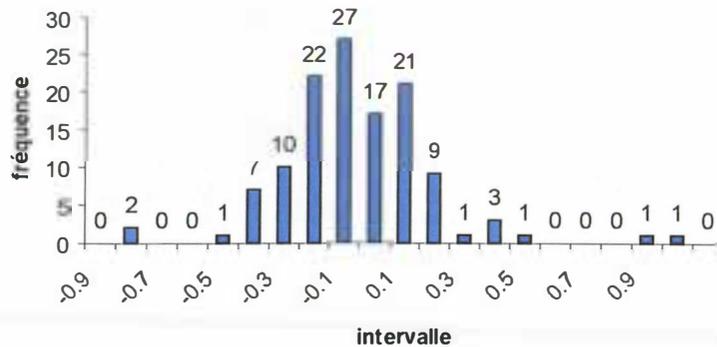
Valeur maximale : 0.94% / 0.35mm

Moyenne : -0.10% / -0.06mm

Ecart type : 0.24 / 0.09mm

Répartition sur l'intervalle (histogramme) :

Retrait LON (population)



Remarque :

Le retrait longitudinal est en moyenne négatif (le bois gonfle). Cette observation peut être expliquée de façon suivante.

- le retrait longitudinal est le plus faible (-0.06mm en moyenne), l'erreur théorique commise est grande (35%).
- l'agencement des fibres de bois parfois croisées provoque, lors du retrait des tensions qui déplacent les « fibres du centre » vers le haut et le bas : d'où le gonflement observé : effet « tenaille »

Observations :

Les histogrammes révèlent que les trois populations sont « mono modales ». En effet on ne peut distinguer qu'une seule population par retrait. Cette répartition est indispensable pour correctement effectuer une calibration. Si les populations avaient été scindées en X parties, X calibrations auraient été nécessaires.

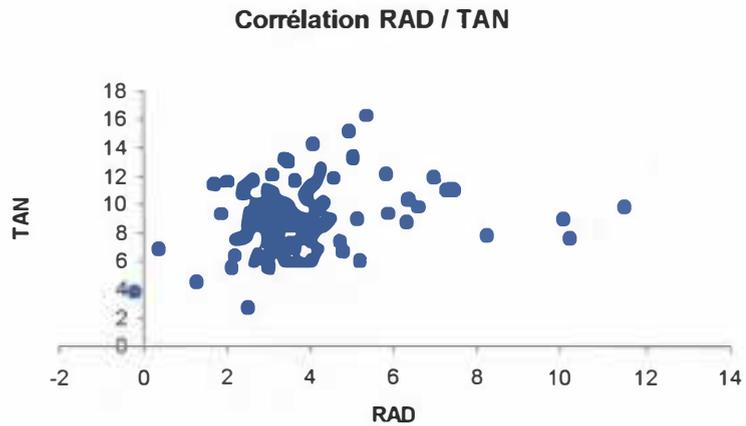
3.4.4.1.9. *Corrélations entre les trois retraits.*

Il est intéressant de savoir s'il existe une corrélation entre les retraits.

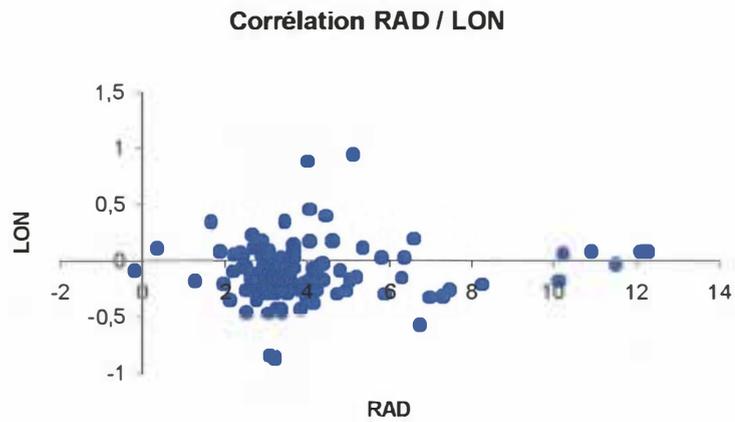
Exemple : un fort retrait Tangentiel correspond-t-il à un fort retrait Radial et inversement ?

En analysant les graphiques ci-dessous, il est clairement apparent qu'il n'existe aucune corrélation entre les différentes valeurs de retrait.

Corrélation retrait radial et retrait tangentiel :

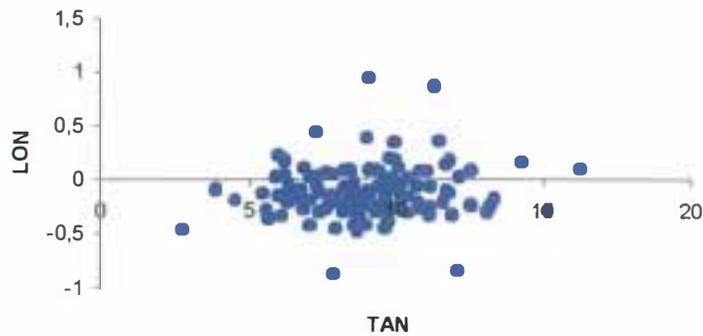


Corrélation retrait tangentiel et retrait longitudinal :



Corrélation retrait tangentiel et retrait longitudinal :

Corrélation TAN / LON



3.4.4.2. Le gonflement

3.4.4.2.1. Introduction

Le gonflement est défini comme l'opposé du retrait. Il est mesuré de la même façon mais la manipulation est effectuée en sens inverse. Les échantillons secs sont tout d'abord mesurés. Ils sont ensuite saturés d'eau à l'aide d'une cuve sous pression (Autoclave). Enfin, ils sont de nouveau mesurés. Pour un même échantillon, le gonflement est plus faible que le retrait mesuré précédemment. L'éprouvette ne retrouvera pas son état initial avant séchage. Il existe un effet d'hystérésis.

3.4.4.2.2. Définition et matériel utilisé

La mesure du gonflement est effectuée avec le même appareillage que pour la mesure du retrait. La formule de calcul est identique.

3.4.4.2.3. Estimation de l'erreur de mesure.

La mesure du gonflement étant effectuée de la même façon que celle du retrait, le calcul de l'erreur (SEP) est semblable.

$$\text{Axe Radial : } \frac{\Delta R}{R} = 3\%$$

$$\text{Axe Tangentiel : } \frac{\Delta R}{R} = 0.7\%$$

$$\text{Axe Longitudinal : } \frac{\Delta R}{R} = .210\% \text{ (erreur supérieure à la moyenne des valeurs mesurées).}$$

3.4.4.2.4. Analyse des valeurs obtenues

Gonflement Radial en (%) et en (mm) :

Valeur minimale : 1.38% / 0.26mm

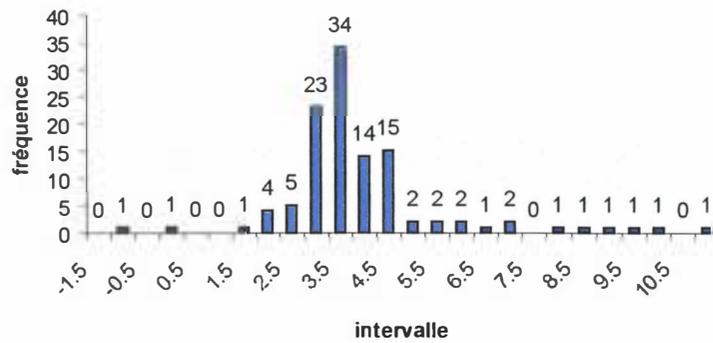
Valeur maximale : 10.60% / 3.35mm

Moyenne : 3.65% / 0.7mm

Ecart type : 1.68 / 0.44mm

Répartition sur l'intervalle (histogramme) :

Population Gonflement RAD



Gonflement Tangentiel en (%) et en (mm) :

Valeur minimale : 0.24% / 0.09mm

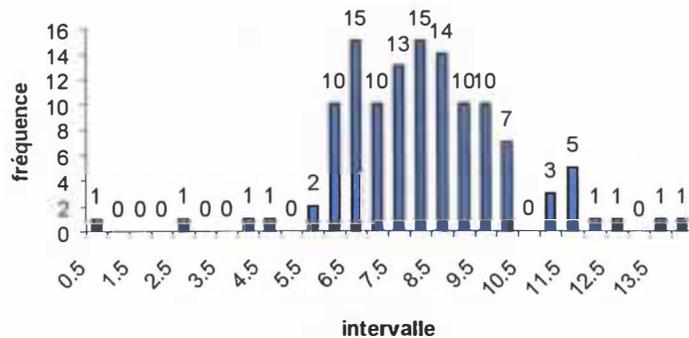
Valeur maximale : 13.81% / 4.35mm

Moyenne : 7.81% / 2.66mm

Ecart type : 1.96 / 0.60mm

Répartition sur l'intervalle (histogramme) :

Population Gonflement TAN



Gonflement Longitudinal en (%) et en (mm) :

Valeur minimale : -0.53% / -0.21mm

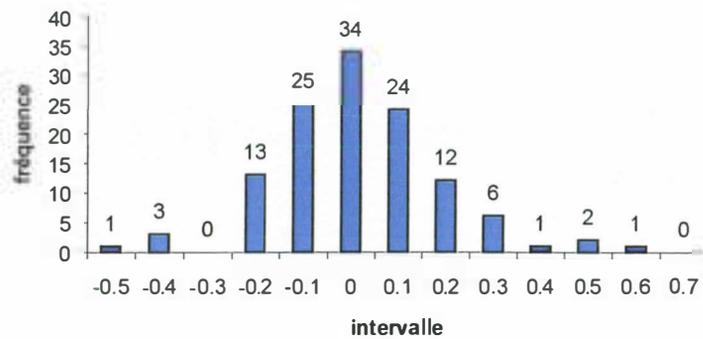
Valeur maximale : 0.57% / 0.23mm

Moyenne : -0.03% / -0.01mm

Ecart type : 0.16 / 0.06mm

Répartition sur l'intervalle (histogramme) :

Population Gonflement LON



Remarque :

L'erreur sur la mesure du gonflement longitudinal est plus élevée que le gonflement lui-même. Ces données ne sont donc pas considérées comme valables.

Observations :

L'histogramme révèle que les populations sont « mono modales ». Comme pour le retrait, cette répartition est indispensable pour effectuer correctement la calibration.

3.4.4.3. Le module d'élasticité

La méthode de mesure du module d'élasticité est décrite au paragraphe « Phase exploratoire : analyse des corrélations et recherche des caractéristiques pertinentes pour la sélection génétique » paragraphe « Module d'élasticité longitudinal et densité ».

Module d'élasticité Timoshenko (Mpa) :

Valeur minimale : 3565

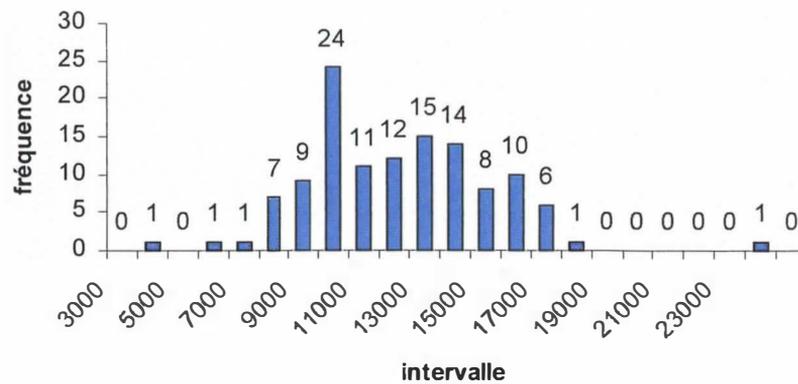
Valeur maximale : 23516

Moyenne : 11690

Ecart type : 2944

Répartition sur l'intervalle (histogramme) :

Module E (population)



Observations :

L'histogramme révèle que la population est « mono modale ».

3.4.4.4. La densité

La densité des échantillons est calculée pour les deux états : saturé et sec.

- Les échantillons sont pesés avec une balance de précision.
- Les trois dimensions (longitudinale, radiale et tangentielle) sont obtenues au cours de la mesure de la mesure du retrait.

3.4.4.4.1. Estimation de l'incertitude commise sur la détermination de la densité. (SEL)

Si $d = \frac{m}{V}$ alors l'erreur est :

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta T}{T}$$

$$\frac{\Delta d}{d} = 0.0058 \quad \text{soit } 0.6\%$$

3.4.4.4.2. Etude des valeurs obtenues.

Densité saturée (Kg/M³)

Valeur minimale : 1033

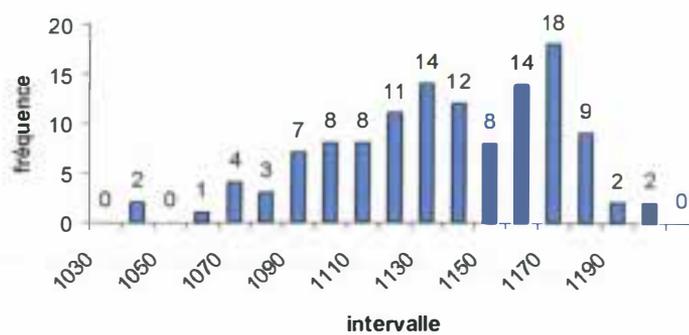
Valeur maximale : 1199

Moyenne : 1130

Ecart type : 34

Répartition sur l'intervalle (histogramme) :

Densité saturée (population)



Densité 5% (Kg/M³)

Valeur minimale : 239

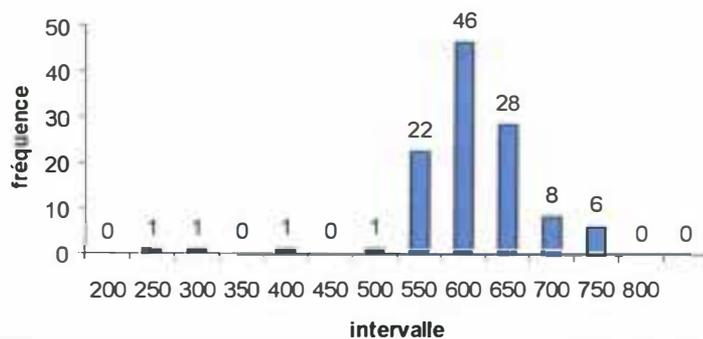
Valeur maximale : 749

Moyenne : 584

Ecart type : 70

Répartition sur l'intervalle (histogramme) :

Densité 5% (population)



Observations :

L'histogramme révèle que les deux populations sont « mono modales ».

3.4.5. Méthode d'acquisition des spectres proches infrarouges

3.4.5.1. Introduction

L'objectif de ce projet est la prédiction de grandeurs physico-chimiques d'éprouvettes d'Eucalyptus par la mesure d'un spectre proche infrarouge à l'aide d'un appareil équipé d'une fibre optique.

Le bois est un matériau fortement anisotrope. Suivant l'axe de mesure (longitudinal, radial ou tangentiel) la structure de la matière est différente. Il est donc nécessaire de rechercher la meilleure zone d'acquisition du spectre au regard de la propriété à estimer. Ainsi, plusieurs mesures de spectres sont réalisées par éprouvettes. Elles permettront d'évaluer la meilleure configuration de mesure.

3.4.5.2. Mesure

Afin d'obtenir un maximum d'informations sur la matière, un total de 9 acquisitions de spectres est effectué par échantillon : 3 spectres par axe (Figure 46).

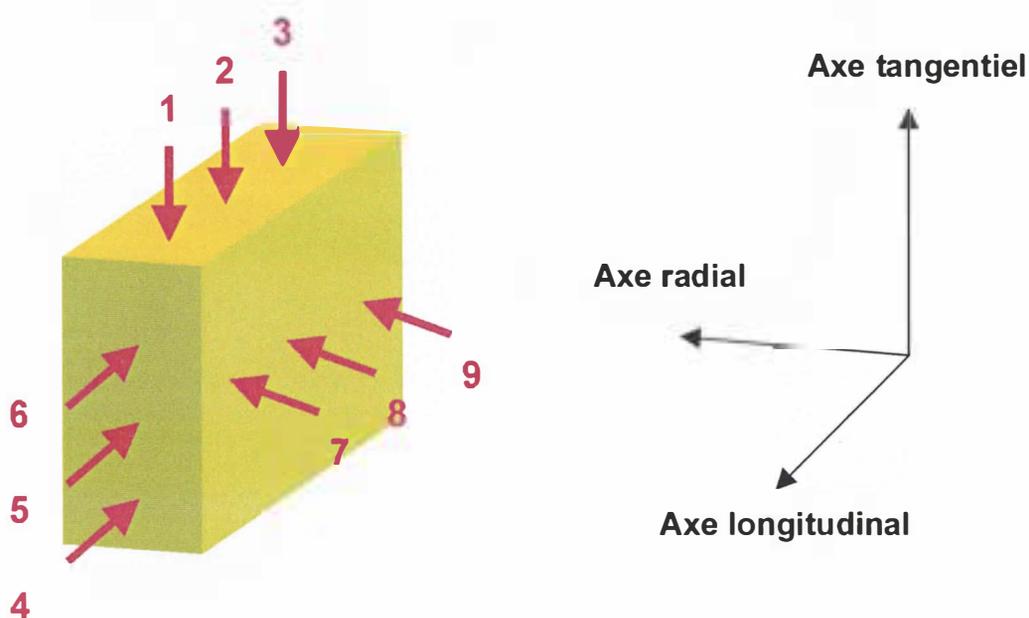


Figure 46 : positionnements successifs de la fibre optique.

3.4.5.2.1. réglage du spectromètre.

Le spectromètre est piloté par ordinateur à l'aide du logiciel VISION. Ce dernier permet la programmation de méthodes de mesures en permettant de régler différents facteurs.

Intervalle de longueurs d'onde :

Par défaut : 1100 – 2500 nm

Avec un pas de 2 nm (une mesure d'absorbance tous les 2 nm)

Nombre de spectres par mesure.

Par défaut : 32 spectres sur l'échantillon et 32 spectres sur la référence.

Le spectromètre est également programmé pour effectuer une mesure sur la référence interne à chaque prise de spectre.

3.4.5.2.2. manipulation.

Le spectromètre est mis sous tension au minimum 30 minutes avant toutes mesures afin de permettre à la lampe et aux circuits électroniques de se stabiliser.

L'acquisition de spectre est effectuée par simple contact de la fibre optique sur la surface de l'échantillon (Figure 47).

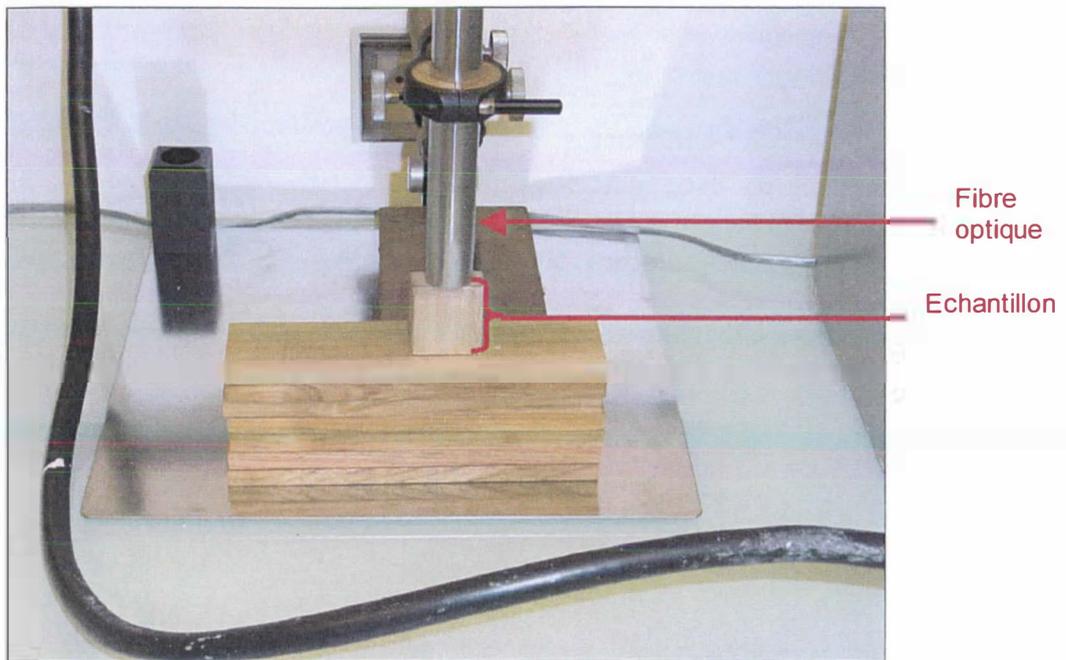


Figure 47 : positionnement de la fibre optique sur l'échantillon.

Le spectre est acquis en environ 1m30s (Figure 48).

Spectre sur bois massif

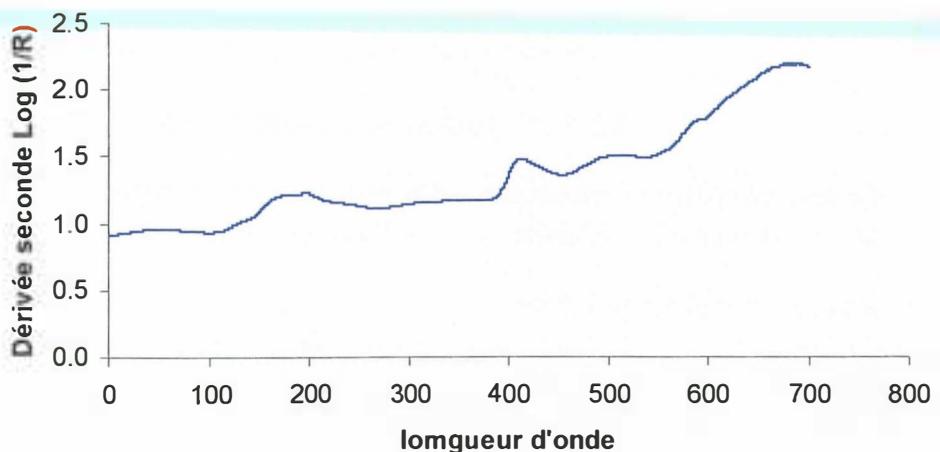
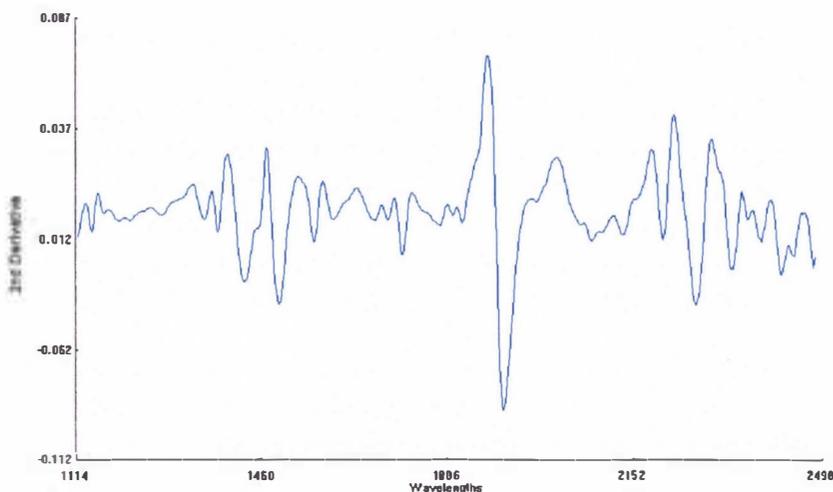


Figure 48 : un exemple de spectre proche IR acquis par fibre optique sur bois massif.

3.4.5.3. Analyse spectrale

la représentation du spectre moyen du bois analysé, sous la forme dérivée seconde en fonction des longueurs d'onde permet de mettre en évidence les bandes d'absorptions majeures :



Constituants	Longueurs d'onde spécifiques nm
Eau	1445 – 1790 – 1940
Protéines	1734 – 2060 – 2180 – 2300 – 2352 – 2470
Cellulose	1722 – 1780 – 1818 – 1860 – 2100 – 2270 – 2335 – 2348 – 2488
Amidon	1722 – 1780 – 2100 – 2270
Matières grasses	1759 – 2070 – 2140 – 2310 – 2380

3.4.6. TRAITEMENT DES DONNEES SPECTRALES ET RESULTATS DE CALIBRATION.

Les données spectrales sont traitées avec le logiciel informatique WINISI II.

3.4.6.1. Traitement des données spectrales avant la calibration.

Durant l'acquisition des données, 9 spectres ont été obtenus par échantillon (3 par face : longitudinale, radiale et tangentielle). Afin d'analyser une série de données spectrales par échantillon, plusieurs fichiers rassemblant des moyennes de spectres sont créés :

1. Un fichier contenant la moyenne de tous les spectres par échantillon.
2. Trois fichiers contenant la moyenne des spectres pour chaque face de tous les échantillons.
3. Trois fichiers contenant la moyenne des spectres pour chaque face des échantillons ne contenant pas les moelles.

Remarque : les fichiers n'incluant pas les échantillons contenant les moelles ont été créés car les moelles sont des échantillons très déformés et fissurés. L'influence de ces échantillons sera donc analysée séparément.

3.4.6.2. Traitement mathématique.

Avant tout calcul d'ACP ou de calibration, les données spectrales subissent un pré-traitement mathématique. Le logiciel permet de réaliser 4 types de traitements du signal :

Derivative : L'ordre de dérivée du spectre.

Gap : Le pas de calcul de la dérivée. C'est-à-dire l'intervalle en nm entre chaque calcul de dérivées.

Smooth : Le lissage des points N°1. le logiciel effectue un calcul (polynôme du second degré) sur un intervalle de point défini afin de remplacer ces points par le segment calculé. Le fabricant conseille pour la valeur de lissage la même valeur que le pas.

Second smooth : Lissage des points N°2. il est possible d'appliquer un second lissage. Ce lissage n'est en général jamais utilisé et la valeur conseillée est de 1. Ce traitement « écrase » l'information spectrale. Il est utilisé pour les spectres très « bruités ».

Il n'existe pas de traitement meilleur qu'un autre, seule l'expérience permet d'en évaluer l'utilité. D'après les travaux réalisés sur des calibrations SPIR et sous le conseil d'un spécialiste, le traitement mathématique choisi est :

Derivative : 2

Smooth : 5

Gap : 5

Second smooth : 1

3.4.6.3. Analyse des populations spectrales : ACP.

Une analyse en composante principale est effectuée sur les fichiers des données spectrales afin d'évaluer la disparité des populations.

Les résultats des calculs des ACP ne révèlent aucun échantillon hors de sa population « outlier » ($H > 3$).

De plus, il est possible d'observer ces échantillons suivant les trois premières composantes principales (Figure 48)

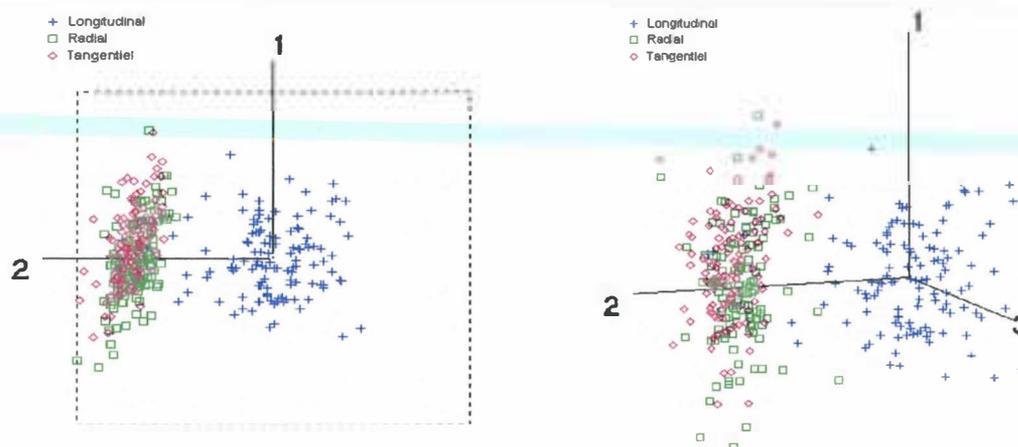


Figure 48 : populations spectrales des spectres des trois faces, représentés suivant les composantes principales de l'ACP des spectres face longitudinale.

L'observation des graphiques révèle que les populations spectrales sont groupées (on ne peut distinguer clairement plusieurs groupes). De plus la population spectrale des spectres face radiale est très proche de celle des spectres face tangentielle, alors que la population des spectres face longitudinale est la plus éloignée. Ce phénomène peut être expliqué par l'orientation des fibres dans le bois. L'image de la matière sur la face tangentielle est donc proche de celle de la face radiale, tandis que l'image offerte par la face longitudinale est très différente (Figure 49).

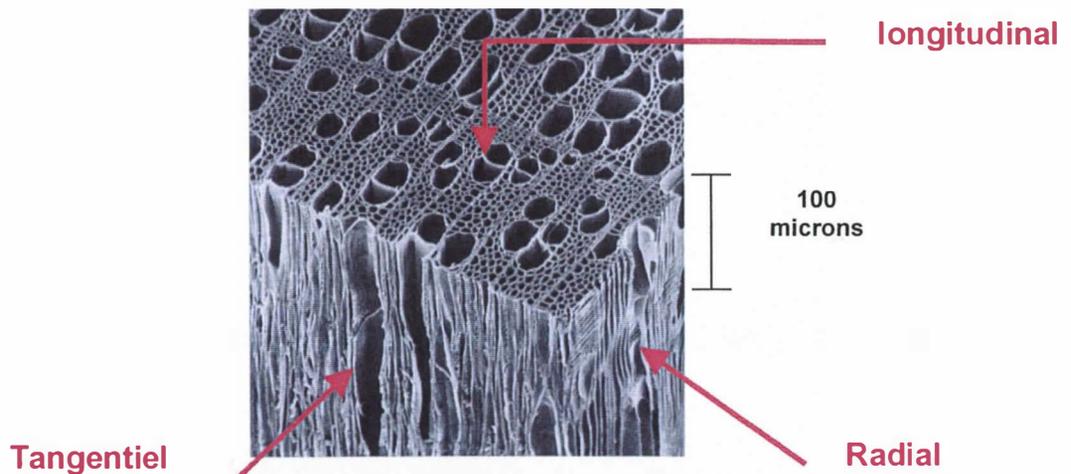


Figure 49 : Photo microscope X à balayage d'un échantillon de bois.

3.4.6.4. Calibration des propriétés mesurées.

Toutes les grandeurs mesurées précédemment (retrait, module d'élasticité, gonflement et densité) ainsi que leur rapport sur la densité font l'objet d'une calibration par les 7 fichiers de données spectrales établis à l'aide des mesures de spectres proche IR.

3.4.7. Analyse des calibrations

Le logiciel qui effectue la calibration, fournit plusieurs types de valeurs comme résultats. Les données nous intéressant sont :

- R^2 : le coefficient de détermination entre les valeurs mesurées (retrait, module...) et les valeurs prédites par la calibration.
- SEC : l'erreur de calibration donnée dans l'unité de la valeur étudiée.
- SECV : l'erreur de validation croisée.

Le graphique des valeurs mesurées en fonction des valeurs prédites.

En premier lieu, afin de pouvoir comparer et trier les calibrations valables, seul le coefficient de détermination est relevé. Plus ce coefficient est proche de 1, plus les valeurs prédites sont similaires aux valeurs mesurées. Ce terme est donc représentatif de la qualité globale d'une calibration. Le tableau suivant récapitule l'ensemble des calibrations développées. Les cellules grisées correspondent aux valeurs du coefficient de détermination supérieures à 0,5.

Longueur d'onde : 1108-2492—(8)	Moyenne des (3) spectres Face RAD	Moyenne des (3) spectres Face TAN	Moyenne des (3) spectres Face LON	Moyenne des (9) spectres de l'échantillon	Moyenne des (3) spectres Face RAD (sans moelles)	Moyenne des (3) spectres Face TAN (sans moelles)	Moyenne des (3) spectres Face LON (sans moelles)
Module Elasticité	0,068	0,235	0,176	0,140	0,063	0,135	0,149
Module (E/d_{sat})	0,634	0,752	0,907	0,873	0,564	0,743	0,906
Module ($E/d_{5\%}$)	0,550	0,707	0,891	0,890	0,486	0,717	0,894
Densité saturée	0,397	0,418	0,586	0,415	0,453	0,453	0,895
Densité 5%	0,364	0,495	0,696	0,665	0,519	0,654	0,347
Retrait RAD	0,139	0,462	0,464	0,476	0,126	0,097	0,093
Retrait TAN	0,173	0,571	0,607	0,444	0,394	0,779	0,588
Retrait LON	0,182	0,172	0,134	0,142	0,145	0,170	0,162
$R_{Rad}/d_{5\%}$	0,202	0,540	0,116	0,220	0,147	0,613	0,171
R_{Rad}/d_{sat}	0,180	0,424	0,465	0,167	0,086	0,081	0,152
$R_{tan}/d_{5\%}$	0,425	0,573	0,572	0,565	0,761	0,728	0,477
R_{tan}/d_{sat}	0,187	0,820	0,643	0,578	0,694	0,732	0,424
$R_{Lon}/d_{5\%}$	0,105	0,212	0,226	0,279	0,171	0,133	0,143
R_{Lon}/d_{sat}	0,218	0,170	0,123	0,279	0,173	0,165	0,142
Gonflement RAD	0,073	0,113	0,403	0,496	0,109	0,068	0,081
Gonflement TAN	0,335	0,136	0,464	0,316	0,167	0,668	0,540
Gonflement LON	0,077	0,116	0,066	0,070	0,123	0,074	0,061
G_{Rad}/d_{sat}	0,201	0,096	0,269	0,246	0,126	0,139	0,067
$G_{Rad}/d_{5\%}$	0,138	0,149	0,218	0,302	0,151	0,150	0,186
G_{tan}/d_{sat}	0,478	0,223	0,564	0,446	0,289	0,755	0,737
$G_{tan}/d_{5\%}$	0,464	0,393	0,519	0,554	0,202	0,633	0,792
G_{Lon}/d_{sat}	0,092	0,157	0,052	0,093	0,118	0,074	0,053
$G_{Lon}/d_{5\%}$	0,048	0,107	0,067	0,048	0,079	0,082	0,061

Le module d'élasticité est très mal prédit (R^2 de 0,063 à 0,235) tandis que ce même module divisé par la densité (saturée ou à 5%) a un coefficient de détermination proche de 1. La densité (saturée et 5%) se prédit généralement bien de 0.519 à 0.895.

Sur les trois retraits et gonflements, la mesure tangentielle est la seule à obtenir des résultats satisfaisants. De plus, on peut observer un classement : le retrait ou le gonflement tangentiel se calibre mieux que le radial qui se calibre mieux que le longitudinal. Les retraits et gonflements divisés par la densité se calibrent mieux. L'incertitude de la mesure explique en grande partie le classement de la qualité de la prédiction dans l'ordre :

1. tangentiel
2. radial
3. longitudinal

Les spectres « face radiale » semblent être ceux qui apportent les moins bons résultats.

Les spectres pris sans les moelles apportent de meilleurs résultats par rapport aux spectres avec moelles pour les faces radiales et tangentielles.

Le fait de diviser le module, le retrait ou le gonflement par la densité améliore les résultats de calibration. Cette opération permet de minimiser l'effet de la porosité du matériau. Les propriétés du bois étant essentiellement déterminées par les caractéristiques mécaniques des parois cellulaires, le fait de s'affranchir de la porosité améliore logiquement les calibrations.

Le retrait (gonflement) tangentiel se calibre mieux que le radial qui se calibre lui-même mieux que le longitudinal. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que le retrait tangentiel est plus important que le radial, lui-même plus important que le longitudinal. Plus le retrait est important, moins l'erreur commise sur la mesure est grande. De plus l'écart type des valeurs des trois retraits suit le même classement (tangentiel > radial > longitudinal). Plus la variabilité d'une caractéristique est élevée, plus sa calibration est aisée. Les calibrations avec les spectres sans les moelles des faces radiales et tangentielles apportent de meilleurs résultats. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que la moelle est une partie de l'arbre très hétérogène. Les spectres des faces radiales et tangentielles peuvent alors être entachés d'une plus grande incertitude. La face longitudinale peut faire exception ce qui lui confère une meilleure aptitude à la mesure spectrale.

Les calibrations par les spectres face longitudinale donnent généralement les meilleurs résultats. En effet, le bois possède des « pores » pour le transport de la sève. L'intérieur de ces canaux est rempli de composés qui n'influencent pas les caractéristiques mesurées (retrait, module d'élasticité et densité). Ces composés sont donc des « impuretés » qui brulent les spectres proche IR lorsque les spectres sont acquis sur des faces parallèle à la direction longitudinale. Par ailleurs la porosité du matériau, qui influence les grandeurs physiques mesurées, a un poids plus fort sur les spectres acquis sur la face radiale-tangentielle (dite « longitudinale » ici), il est donc logique que les prédictions soient de meilleure qualité lorsque ces spectres sont utilisés.

3.4.8. Prédiction des caractéristiques.

Une sélection de la meilleure calibration par caractéristiques est effectuée sur le critère du coefficient de détermination. Un lot de 30 échantillons sur les 123 est sélectionné au hasard. Une calibration est réalisée sur les 93 échantillons restants. Les 30 échantillons restants sont ensuite prédits par la nouvelle calibration. Cette opération permet d'évaluer l'erreur de prédiction (SEP). Elle est la plus représentative de l'erreur qui sera commise lors de

l'utilisation réelle de la calibration. Un tableau rassemblant, pour ces caractéristiques, les résultats de calibration et de prédiction est présenté à la page suivante.

Caractéristique	Spectre utilisé	N	M	SD	SEC		SECV	SEL	SEP	SD/SEP
Module E sur densité saturée	Sp LON	111	10.081	2.229	0.681	0.907	0.993	0.4	1.389	1.60
Densité saturée	Sp LON sans moelle	96	1132	34.4	11.17	0.895	22.56	7	25.896	1.33
Retrait radial sur densité 5%	Sp TAN	106	6.199	2.001	1.357	0.540	2.193	1.73	3.551	0.56
Retrait tangentiel sur densité saturée	Sp TAN	112	8.047	1.824	0.775	0.820	1.465	0.1	1.589	1.15
Retrait longitudinal sur densité 5%	Sp échantillon (9)	102	-2.086	2.924	2.482	0.279	2.878	5.7	3.800	0.77
Gonflement radial	Sp échantillon (9)	94	3.388	0.788	0.56	0.496	0.875	0.1	2.011	0.39
Gonflement tangentiel sur densité 5%	Sp LON sans moelle	99	13.593	3.540	1.615	0.792	2.477	0.169	2.871	1.23
Gonflement longitudinal	Sp RAD sans moelle	95	-0.034	0.125	0.117	0.123	0.132	0.063	0.150	0.83

N : nombre d'échantillons retenus par le modèle

M : moyenne

: coefficient de détermination.

SD : écart-type de la population de calibration

SEC : erreur standard de calibration

SCEV : erreur standard de validation croisée

SEL : erreur standard de la méthode de référence (laboratoire)

SEP : erreur standard de prédiction

Le tableau de résultats révèle que les meilleures calibrations sont celles du module d'élasticité, de la densité, du retrait et du gonflement tangentiel.

Les résultats du retrait (gonflement) radial sont médiocres. Les résultats des mesures longitudinales sont inexploitable. Tout au plus ils pourraient être utilisés pour définir 2 ou 3 classes. Pour toutes les caractéristiques, l'erreur de prédiction (SEP) est supérieure à l'erreur de calibration et très supérieure à l'erreur de laboratoire.

Ainsi, en observant les différents graphiques et tableaux, on peut remarquer que même pour les meilleures calibrations (module, densité, retrait et gonflement tangentiel) les résultats des prédictions sont encore trop incertains pour pouvoir substituer les calibrations aux techniques classiques de mesures. En effet, la SEP est toujours très supérieure à la SEL. La technique de mesure laboratoire est donc beaucoup plus précise que les calibrations établies.

Tous ces résultats peuvent être expliqués par les raisons suivantes

- Le spectromètre utilisé est un appareil industriel probablement moins précis qu'un modèle de laboratoire.
- L'acquisition des spectres par fibres optiques apporte certainement une incertitude supplémentaire.
- Au niveau échantillonnage, tous les échantillons étudiés proviennent d'arbres frères, ce qui restreint grandement la variabilité du lot d'échantillons en particulier pour les valeurs extrêmes. Ce manque de variabilité est représenté dans le tableau de résultat par le RPD (SD/SEP). En effet, ce coefficient est faible même pour les meilleures calibrations. L'écart type SD de la population est trop faible.
- Enfin la taille des éprouvettes est trop grande. Les gradients de propriétés à l'intérieur de l'éprouvette risquent d'être trop importants au regard de la mesure ponctuelle de spectres. Par exemple, les gradients du module d'élasticité du cœur à l'écorce sont d'un facteur 4 à 5.

Ainsi, du point de vue précision, les calibrations réalisées ne permettent pas de remplacer les méthodes laboratoires ($SEP > SEL$). Elles permettent toutefois de classer les échantillons en plusieurs lots distincts. Cependant la spectrométrie par fibres optiques permet un temps de mesure très réduit comparativement à la méthode de référence. De plus, la mesure d'un seul spectre permet de prédire une liste de caractéristiques (module d'élasticité, densité, retrait et gonflement tangentiel). Le gain de temps par rapport aux mesures laboratoires de toutes ces caractéristiques est très grand.

Ce gain de temps est très intéressant pour la sélection d'arbres. En effet, on a vu que la variabilité intra-arbre est grande. Lors de la sélection d'un arbre on peut raisonnablement se demander laquelle des deux stratégies choisir

1. La sélection de l'arbre en prélevant peu d'échantillons et en mesurant par des techniques classiques et précises le retrait, le gonflement, le module d'élasticité et la densité ?

2. La sélection en prédisant à plusieurs endroits dans l'arbre les mêmes caractéristiques par l'acquisition de spectres proches infrarouges, mais de façon moins précise ?

En tenant compte de la forte variabilité intra-arbre, il est probable que la sélection d'arbres par spectrométrie proche IR soit plus en rapport avec l'objectif d'amélioration des propriétés du bois et surtout de leur homogénéité entre arbres. Il est alors possible d'accepter le fait que ponctuellement les estimations SPIR soient moins précises que les méthodes laboratoires. Une étude statistique mériterait d'être conduite dans cet objectif.

Enfin, si cette étude devait être de nouveau réalisée, les échantillons utilisés devraient être plus nombreux, comporter une plus grande variabilité et l'utilisation d'un spectromètre de laboratoire serait conseillée. De plus les éprouvettes utilisées doivent être de plus petites dimensions afin de limiter les effets d'hétérogénéité.

3.5. CONCLUSIONS SUR LA SPECTROMETRIE PROCHE INFRAROUGE

Cette technique s'est révélée particulièrement intéressante pour la prédiction des caractéristiques chimiques (taux d'extrait, lignine de Klason, ratio S/G) avec précision suffisante. Son utilisation peut être généralisée à l'ensemble de la famille hybride.

Pour les caractéristiques physiques et mécaniques son utilisation s'est révélée peu satisfaisante hormis pour le module d'élasticité et éventuellement pour le retrait tangentiel. L'utilisation d'un spectromètre de type « industriel » muni d'une fibre optique n'est pas une solution optimale pour la prédiction des caractéristiques physiques et mécaniques dans le cadre d'une évaluation quantitative sur des individus d'une même famille de plein frères.

4. Extraction systématique des caractéristiques technologiques destinées à la cartographie génétique

SAR4.8 : caractérisation rhéologique de fibres d'eucalyptus : typage de 200 arbres (P2)
SAR6.2 : chez l'eucalyptus (P1, 2, 5), piloté par P2

4.1. Fentes en bout

Rappelons que les longueurs des fentes ont été mesurées, sur l'ensemble de l'échantillon congolais, environ un mois après abattage. Toutes ces mesures ont été réalisées en prenant soin de noter leurs positions angulaires par rapport à celles des mesures des DRLM. Les observations qualitatives des faciès externes de la fissuration ont montré que la plupart des fentes se composent de 2, 3 ou 4 branches de longueur plus souvent inégales et faisant entre elles un angle variant entre 45° et 180° . Sur 177 billons, 26% ont eu au moins une fente débouchante (une fente qui a atteint la périphérie). On note aussi que les fentes débouchantes sont plus fréquentes chez les billons présentant des fentes à 4 branches. Dans le cas des fentes à 2 branches le risque des fentes débouchantes semble être moins important (Tableau 23).

	<i>Nombre de billons</i>	<i>Proportion de billons ayant au moins une fente débouchante (%)</i>
<i>Billons à 2 fentes</i>	39	13
<i>Billons à 3 fentes</i>	119	29
<i>Billons à 4 fentes</i>	19	32
<i>Tous</i>	177	26

Tableau 23 : Proportion des fentes sur le fin bout

4.1.1. Typologie

Le figure 50 montre une représentation graphique des différentes directions des fentes. Celle-ci est construite en attribuant la position 0° à la direction de la plus grande fente débouchante, ou (en cas d'absence de fente débouchante) la plus grande fente transverse. Cette représentation a l'avantage de bien montrer la typologie des fentes : dans le cas des fentes à 4 branches, le profil est typiquement celui d'une fente en croix ; autrement dit, l'écart angulaire entre deux branches voisines est en moyenne égale à 90° . Pour les fentes à deux branches, le profil montre que dans la majorité des cas, les deux branches de la fente font en moyenne un angle de 180° . Cependant, le profil des fentes à 3 branches présente un ensemble de situations de fissuration distinctes.

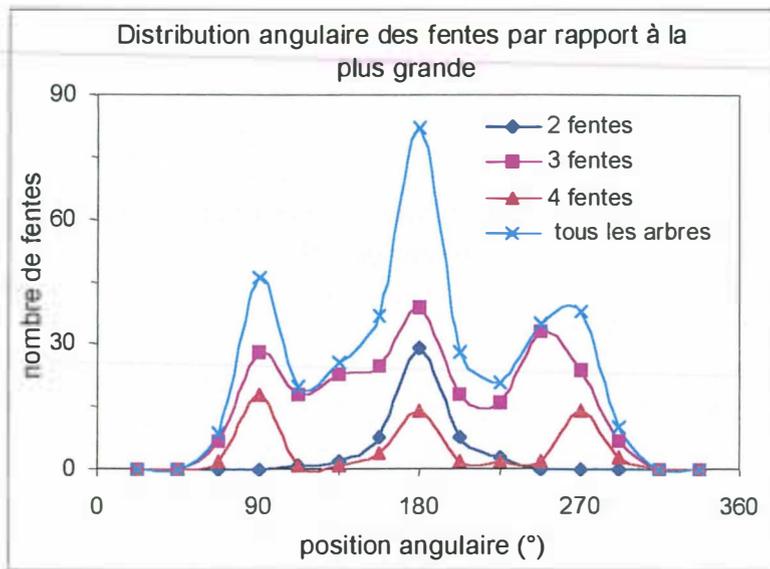


Figure 50: Distribution angulaire des fentes par rapport à la plus grande fente (y compris fente débouchante)

Afin de clarifier ce dernier cas (cas des fentes à 3 branches) nous avons distingué 3 classes de distribution de fentes radiales. La figure 4.12a présente, en utilisant la même représentation, les 3 profils correspondants : On observe une première classe de fentes dont deux branches font entre elles un angle de 180° et la troisième en moyenne un angle de 90° . La deuxième classe est légèrement différente de la première : deux branches font entre elles un angle de 158° et la troisième se positionne à un écart angulaire, par rapport aux deux autres, d'environ 90° . La troisième classe regroupe les fentes ayant deux branches faisant en elles un angle d'environ 135° , elle présente un profil typique d'une fente en étoile : en effet la troisième branche se positionne, vis-à-vis des deux autres, en faisant en moyenne un angle d'environ 90° à 135° (Figure 51).

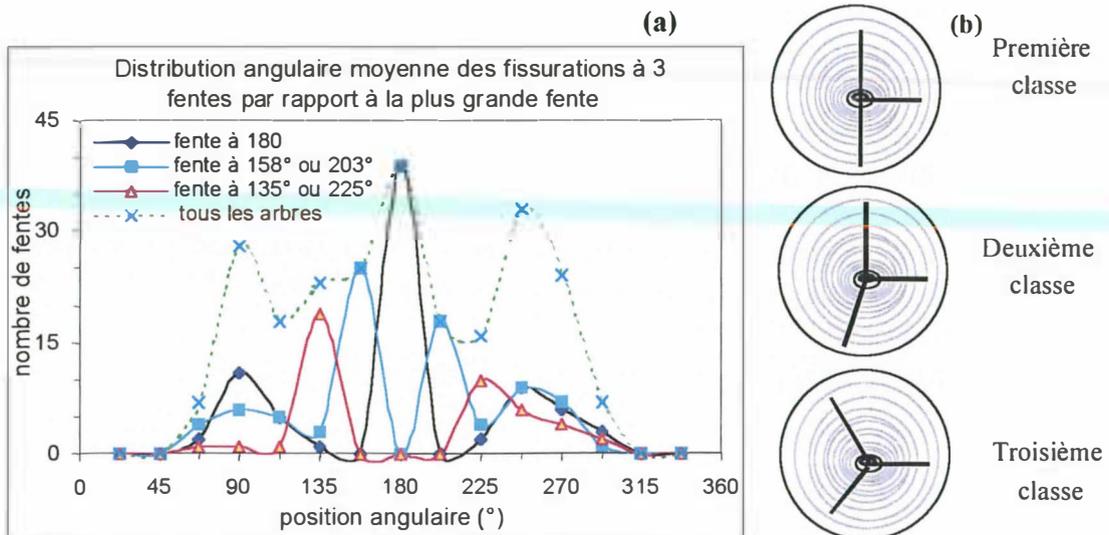


Figure 51: Typologie des fentes à trois branches regroupée en trois différentes classes qui distinguent les différentes configurations rencontrées dans l'échantillon congolais

L'étude de la typologie des fentes a montré que les fentes à cœur se manifestent plus souvent en fentes à trois branches. Cette classe de fentes présente une grande diversité de situations avec une fréquence plus élevée des fentes en étoile.

4.1.2. Corrélation avec le niveau de DRLM

La corrélation linéaire entre la DRLM moyenne calculée pour chaque arbre et l'indice d'éclatement mesuré à mois est significative au seuil de 0.001 (Figure 52).

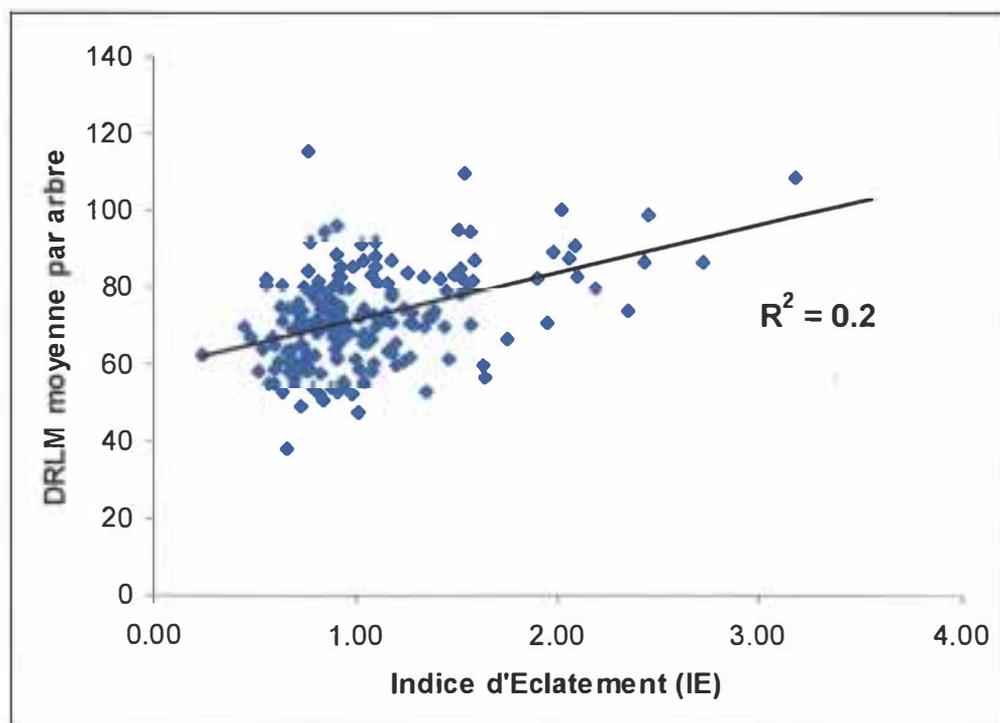


Figure 52 : Corrélation entre la proportion de fentes en bout et la DRLM moyenne par arbre

La DRLM n'explique qu'une faible variabilité de l'indice d'éclatement car :

1. La mesure de DRLM est localisée e périphérie de la tige alors que les phénomènes à l'origine de la création des fentes en bout proviennent de tout le volume de la tige.
2. La ténacité transverse du bois est un paramètre qui intervient dans la propagation des fentes en bout. Dans une direction donnée par rapport à l'axe de la tige, elle peut être très influencée par la direction du fil bois.
3. L'hétérogénéité intra-tige des propriétés mécaniques est aussi un paramètre qui intervient dans les phénomènes de propagation des fentes en bout.

4.2. Caractéristiques chimiques (taux d'extrait)

(SAR2.3 : Taux d'extraits et taux de lignine)

Les dosages des teneurs des différents composés du bois ont été effectué à partir du broyat (mesh 40) d'une rondelle entière prélevée à mi-hauteur de la hauteur commerciale. Au total 193 échantillons ont été dosés. Le taux d'extrait a été déterminé en suivant le protocole décrit

à la Figure 53. Les poudres extraites ont été expédiées à l'Institut du Pin pour les dosage de lignines.

PROCEDURE EXTRACTION BOIS EUCALYPTUS

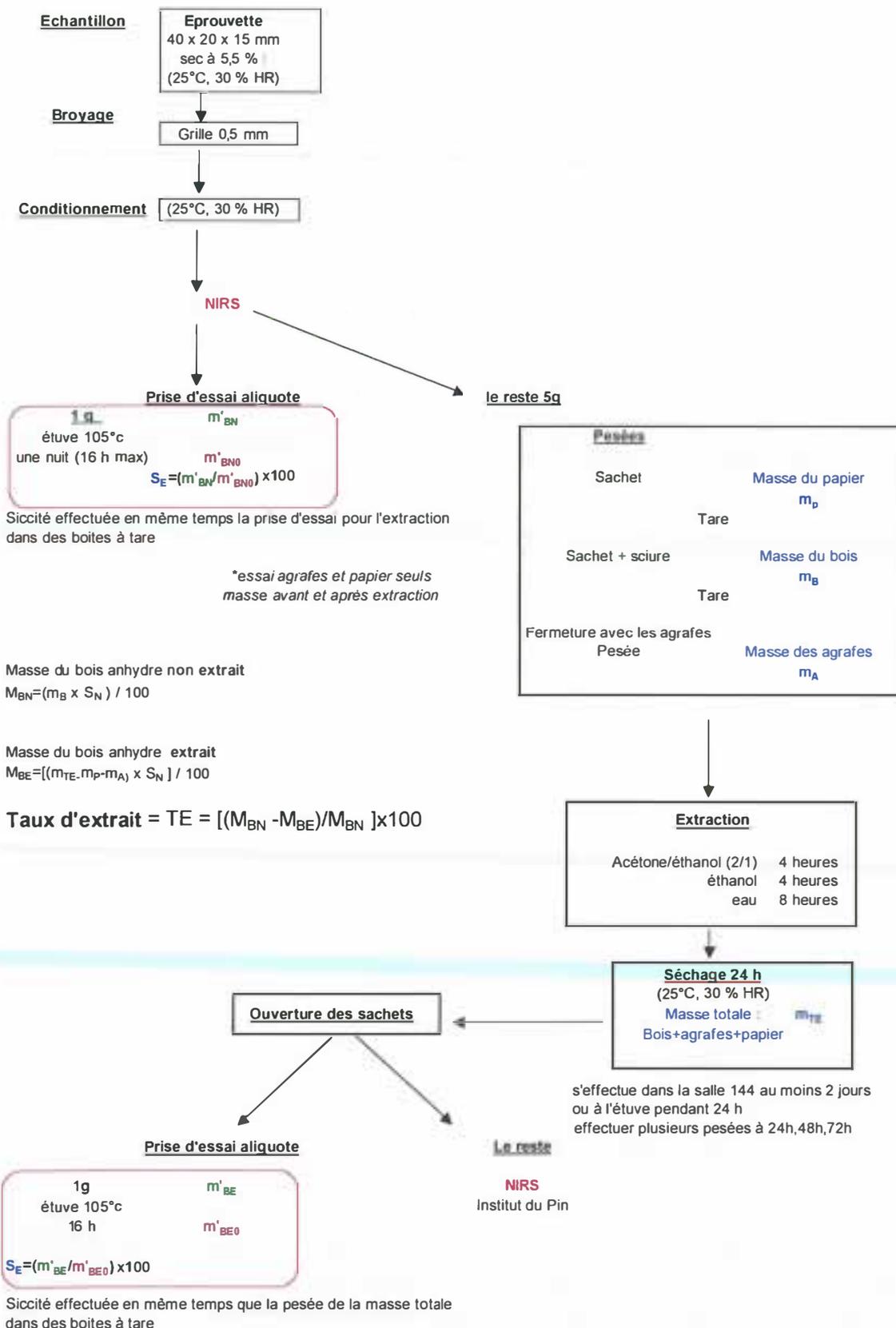


Figure 53 : récapitulatif du protocole de dosage des extractibles du bois sur rondelle entière

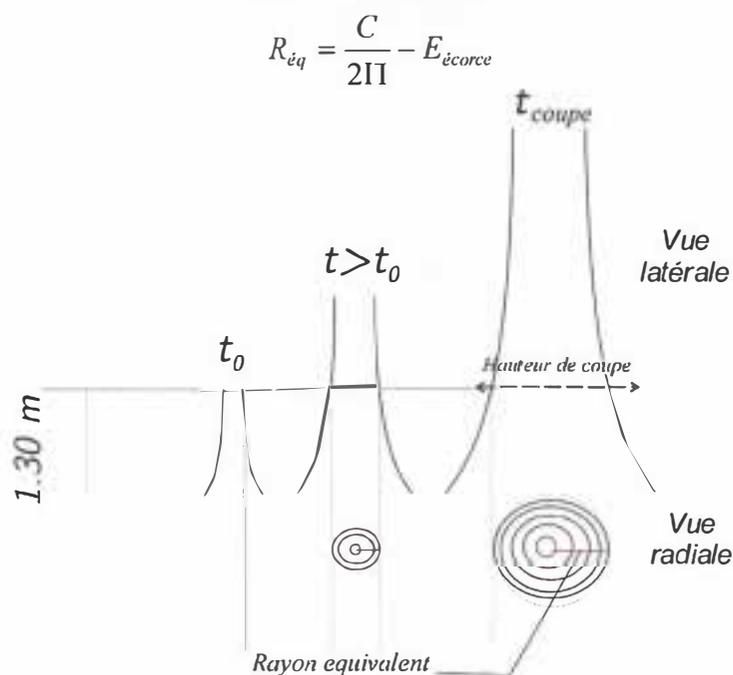
4.3. Caractéristiques physico-mécaniques

Le bois est un matériau d'origine biologique, il est formé à partir du cambium. Le fonctionnement biologique du cambium est influencé par les conditions internes et exogènes de l'arbre. Il s'en suit une variabilité des propriétés technologiques du bois entre arbres et au sein de l'arbre. La variabilité intra-arbre est souvent identifiée comme étant la plus forte. Cette hétérogénéité et les interactions entre effets inter et intra arbres limitent fortement les approches retenues pour la caractérisation de la qualité du bois dans les programmes de sélection génétique. La prise en compte des critères d'hétérogénéité nécessite l'évaluation d'indicateurs fiables des propriétés du bois et leur distribution au sein de l'arbre.

4.3.1. Matériels et méthodes

4.3.1.1. Mesure de la cinétique de croissance radiale des arbres

Les cernes annuels des eucalyptus étudiés ne sont pas discernables. La datation des tissus, notamment l'identification de l'âge cambial ne peuvent donc être réalisées sur la base des seules observations. La circonférence à 1,30 m ainsi que l'épaisseur de l'écorce de chacun des arbres ont été mesurées régulièrement au cours du temps¹. Le rayon équivalent (R_{eq}) est déduit de la mesure de la circonférence en supposant un tronc circulaire et en soustrayant l'épaisseur de l'écorce $E_{écorce}$ (figure 54). La position du rayon extérieur de l'arbre est assimilée dans cette étude à la position du cambium (c'est-à-dire position réelle juste sous l'écorce).



4.3.1.2. Méthode d'échantillonnage au sein de l'arbre

Dans le but de représenter la variation radiale des propriétés du bois, il est nécessaire de prélever plusieurs éprouvettes le long de l'axe passant par la moelle. Des éprouvettes de dimensions constantes 40 cm (L) x 40 mm (T) x 20 mm (R), sont prélevées sur le plateau

¹ Mesures effectuées à 14, 26, 32, 50 et 59 mois

diamétral à la hauteur de coupe de 1,30 m. Cette dimension ainsi que la seule hauteur échantillonnée ont été adoptées afin de concilier la pertinence de l'information avec la quantité du travail à réaliser qui peut prendre des proportions industrielles dès que l'on multiplie les modalités. Selon le diamètre de l'arbre, 3 à 8 éprouvettes sont prélevées par arbre. 8 arbres n'ont pas fait l'objet de mesure en raison de leur très petite dimension, ce qui réduit la population d'étude à 191 arbres. Au total, 1161 éprouvettes sont étudiées.

La découpe est réalisée à environ 3,5 mm sous l'écorce compte tenu de la cylindricité en direction de la moelle. Ce choix favorise la qualité des éprouvettes externes et augmente la proportion de bois périphérique échantillonné. La largeur de l'éprouvette centrale contenant la moelle est ajustée de manière à obtenir un échantillonnage régulier comme indiqué sur la figure 5. Suivant ce protocole, le nombre d'éprouvettes débitées de part et d'autre de la moelle varie avec l'excentricité de la moelle. Les positions radiales des éprouvettes sont repérées à partir de la distance à la moelle.

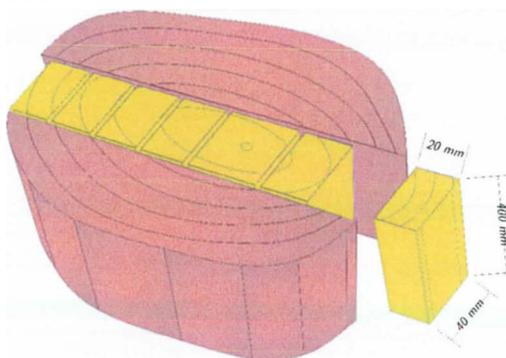


Figure 55 : Schéma de découpe des éprouvettes le long de l'axe diamétral

Les éprouvettes sont conservées dans de l'eau à température ambiante avant mesure. Elles sont de ce fait saturées en eau lors des mesures.

4.3.1.3. Caractérisation des propriétés technologiques

La figure 56 récapitule les principales caractéristiques étudiées : de l'arbre aux éprouvettes.

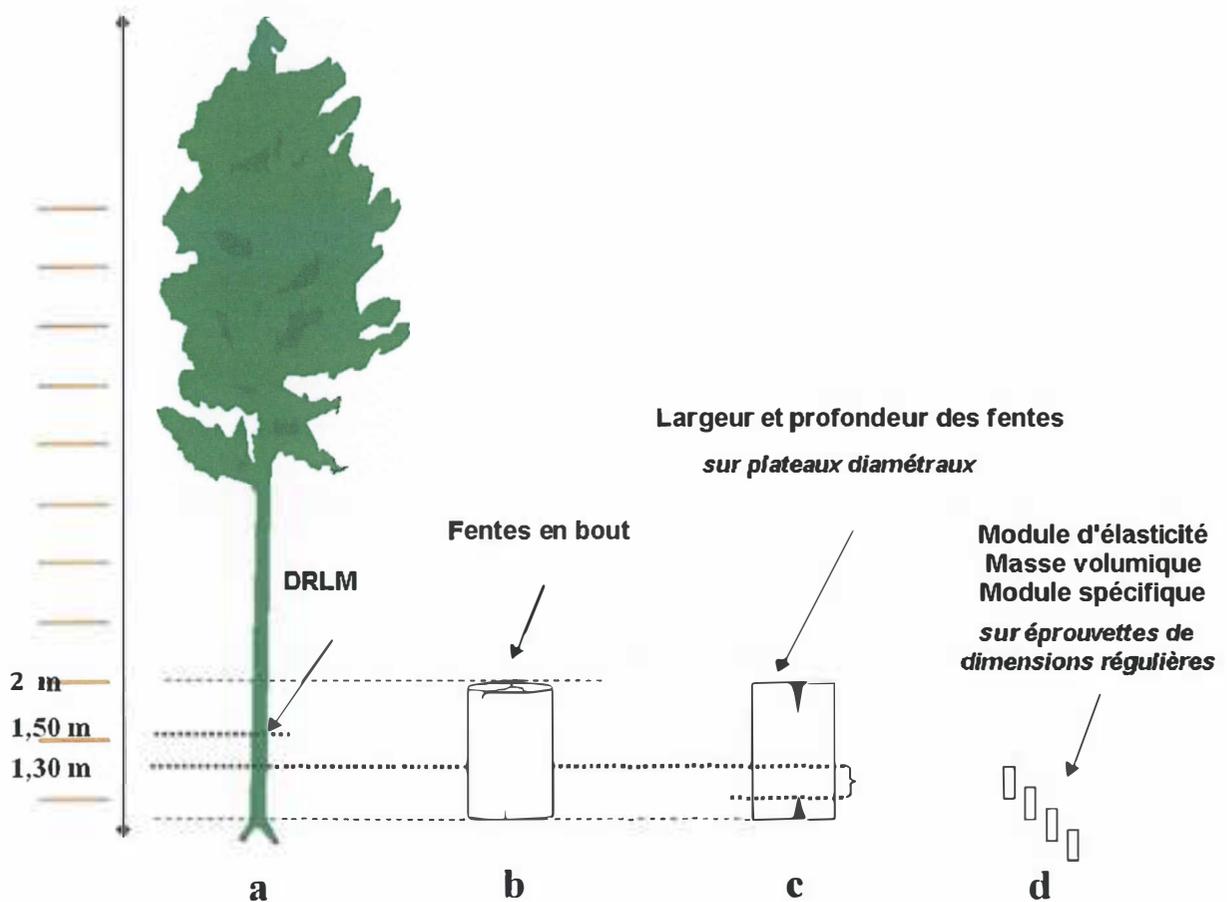


Figure 56 : Principales caractéristiques étudiées :
 a) arbre, b) billon, c) planche, d) éprouvettes

Cinq propriétés technologiques importantes ont été mesurées. Elles caractérisent :

- les problèmes technologiques de la « nervosité du bois », elles sont mesurées in situ : la déformation résiduelle longitudinale de maturation (DRLM) et les fentes en bout,
- la variation intra-arbre, elles sont mesurées après coupe et échantillonnage : le module d'élasticité, la masse volumique et le module spécifique à l'état saturé d'eau.

Les DRLM et les fentes en bout ont été préalablement mesurées par l'équipe du CIRAD.

4.3.1.4. Mesures in situ

4.3.1.4.1. Déformation résiduelle longitudinale de maturation (DRLM)

Les mesures de DRLM sont effectuées à la périphérie des arbres sur pied avant leur découpe. L'estimation de cette caractéristique intrinsèque de l'arbre permet d'évaluer les efforts internes supportés par le bois des arbres sur pied. La libération de ces contraintes dites « contraintes de croissance » entraînent lors de l'abattage des effets indésirables tels que l'apparition des fentes et la déformation des planches.

La DRLM est mesurée en 8 points numérotés à partir de l'axe Nord dans le sens antihoraire (figure 57).

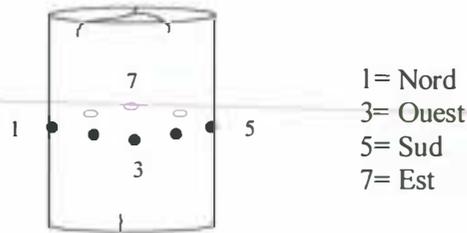


Figure 57 : Distribution angulaire des mesures de DRLM à la périphérie de l'arbre

La DRLM est estimée à l'aide d'un capteur développé par le CIRAD (Marvaux, 1983, Archer, 1986) dont le principe métrologique est basé sur la méthode du trou unique connue en métallurgie. Le principe physique s'appuie sur la mesure de variation de distance entre 2 pointes distantes de 45 mm enfoncées à 10 mm dans le bois, après perçage d'un trou central de 20 mm de diamètre. La déformation est obtenue par l'application de la relation linéaire empirique établie par Baillères (1994) :

$$\text{Déformation} = 16,8 \text{ DRLM} - 188 \text{ avec } r^2 = 0,50 \quad [5]$$

4.3.1.4.2. Proportions de fentes

Deux caractéristiques de fentes sont mesurés :

- l'indice d'éclatement (IE) sur les billons prélevés à 2 m de hauteur à 1 jour et 1 mois après l'abattage, défini par : [6]

$$IE = \frac{\sum \text{longueur totale des fentes observées sur la coupe transversale et sur la périphérie du billon}}{\text{Diamètre de la section}}$$

- la profondeur et la largeur des fentes observées sur les planches diamétrales d'épaisseur 40 mm provenant du billon précédent. Les planches sont prélevées dans une direction Nord-Sud, correspondant à l'axe des mesures de DRLM 1 et 5. Cette méthodologie permet de s'appuyer sur une mesure localisée qui correspond à une région où les « déformations » sont mesurées.

4.3.1.5. Mesures après coupe sur échantillons

4.3.1.5.1. Masse volumique à l'état saturé

La masse volumique du bois (ρ_0) est évaluée à partir de la masse et des dimensions de l'éprouvette à l'état saturé. L'erreur relative est de l'ordre de 3%.

4.3.1.5.2. Module d'élasticité à l'état saturé

Le module d'élasticité longitudinal (E) est défini par le rapport entre la contrainte imposée et la déformation résultante suivant l'axe longitudinal. C'est une caractéristique mécanique importante pour les utilisations en structure car il traduit la rigidité du bois. Cette propriété est également le meilleur estimateur de la résistance à la rupture.

Le module d'élasticité longitudinal est mesuré à partir d'une mesure vibratoire non destructive (BING, CIRAD-forêt, <http://www.indexld.com>) pour l'ensemble des éprouvettes à l'état saturé ayant servi à la mesure de la densité. Les essais sont réalisés en flexion longitudinal – radial. Cette méthode rapide de mesure permet la préservation des éprouvettes pour des essais complémentaires. La précision de mesure est évaluée à 8% selon la formule 7.

$$\left| \frac{dE}{E} \right| = \left| \frac{dM}{M} \right| + 3 \left| \frac{dL}{L} \right| + \left| \frac{dl}{l} \right| + 3 \left| \frac{de}{e} \right| + 3 \left| \frac{df1}{f1} \right| + \left| \frac{df2}{f2} \right| \quad (\text{Brancheriau, comm.pers.}) \quad [7]$$

4.3.1.5.3. Module spécifique à l'état saturé

Dans le sens longitudinal, les propriétés élastiques du bois sont essentiellement déterminés par les caractéristiques mécaniques des parois cellulaires. De ce fait, la comparaison de la qualité du matériau constitutif de ces parois peut être réalisée en s'affranchissant de la porosité. Une manière simple de procéder est d'utiliser le module spécifique. Il s'agit du rapport entre le module d'élasticité et la masse volumique (E/ρ) (Gibson *et al.*, 1999).

4.3.1.6. Méthode pour le calcul de la distribution continue des propriétés

Une estimation continue de la croissance radiale avec l'âge cambial et la distribution radiale de E , ρ et E/ρ sont calculées à partir d'une méthode des **moindres carrés régularisées (MCR)**. Cette approche non déterministe et non paramétrique est particulièrement adaptée pour la reconstruction d'informations en présence :

- d'un nombre réduit de données (mesures de croissances, nombre d'éprouvettes),
- d'informations redondantes (échantillonnage de part et d'autre de la moelle),
- d'incertitude sur les mesures (recherche de maxima de vraisemblance au sens des moindres carrés, c'est-à-dire minimisation de la variance),
- et la prise en compte de contraintes quant à la variation des grandeurs reconstruites (linéarité, régularité, symétrie, valeurs moyennes par intervalles).

4.3.1.7. Principe de l'approximation polynomiale de $Y=f(X)$ par une méthode MCR

La méthode MCR consiste à minimiser la fonctionnelle suivante (Tikhonov, 1977, Girosi, 1998) :

$$\arg \min_{\Psi_n, n} \left(\underbrace{C \|\mathbf{Y} - \mathbf{K}\Psi_n\|_2^2}_{\text{fonctionnelle erreur}} + \frac{1}{2} \underbrace{\|\Phi(\Psi_n)\|_2^2}_{\text{fonctionnelle de régularité}} \right) \quad [8]$$

- Ψ_n , polynôme d'Hermite de degré n

- $\mathbf{K} \in \mathfrak{R}^{m \times n}$, $m \geq n$, noyau d'interpolation relatif à \mathbf{X} , contraintes sur les dérivés $n^{\text{ème}}$ et les valeurs locales moyennées de chaque éprouvette

$$\Phi(\Psi_n) = \left[\frac{\Psi_i}{\sigma_i + \gamma} \right]_{i=1, \dots, n}$$

- σ tel que $\sigma = \text{diag}(\Sigma)$ où $\mathbf{K} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}'$

$\sigma_i \rightarrow \gamma$ implique un terme non significatif de degré i en Ψ_n

- γ , nombre positif menant vers $\sigma_i + \gamma$

- C , nombre positif contrôlant le compromis entre l'écart entre les données \mathbf{Y} et la régularité

La minimisation de (8) est résolue pour Ψ_n et n (c'est-à-dire le degré du polynôme n n'est pas connu a priori) par une méthode spectrale décrite par Hansen (1994).

4.3.1.8. Application à la détermination de la courbe de croissance continue

L'objectif est d'obtenir une représentation continue de la relation âge cambial en fonction de la position radiale relative r^\bullet défini par r/r_{\max} . r_{\max} est défini par la distance entre la moelle et la périphérie au moment de la coupe. Cette approche est utilisée pour normaliser la représentation pour l'ensemble des arbres quelle que soit la valeur de r_{\max} .

Le noyau d'interpolation est constitué des conditions qui assurent :

- la minimisation des écarts aux points expérimentaux,
- une convexité nulle du polynôme aux points extrêmes.

4.3.1.9. Application à l'identification de la distribution radiale des propriétés

L'objectif est d'obtenir une représentation continue de la relation des propriétés (module d'élasticité longitudinal, densité et module spécifique à l'état saturé) en fonction de la position radiale relative comme définie dans § 3.5.2. L'adimensionnement est utilisé pour s'affranchir des dimensions des arbres à un instant t et de traiter indifféremment les mesures obtenues de part et d'autre de la moelle. Dans cette approche, la valeur de la propriété de l'éprouvette est supposée égale à la valeur moyenne de la distribution radiale de la propriété dans cette même éprouvette.

Le noyau d'interpolation est constitué

- des valeurs moyennes du polynôme sur l'intervalle des valeurs de r^\bullet correspondantes aux extrémités des éprouvettes,
- d'une contrainte prenant en compte la parité de l'approximation polynomiale c'est-à-dire symétrique par rapport à la moelle $r^\bullet=0$,
- d'une contrainte prenant en compte la nullité de la dérivée première à la moelle,
- d'une contrainte prenant en compte une convexité nulle pour r^\bullet tendant vers 1.

4.3.1.10. Interprétation de la variation des propriétés avec l'âge cambial

Puisque les arbres ont crû en même temps, dans des conditions homogènes, on peut considérer que le seul facteur de variabilité serait uniquement le vieillissement du cambium au cours du temps. Afin d'évaluer la contribution du vieillissement du cambium sur la variabilité des propriétés de l'arbre, une représentation implicite de la variation de la propriété avec l'âge cambial est obtenue à partir des représentations paramétriques

$$\left. \begin{array}{l} \text{âge cambial} = f_1(r^\bullet) \\ \text{propriété} = f_2(r^\bullet) \end{array} \right\} \text{propriété} = g(\text{âge cambial})$$

f_1 et f_2 sont obtenues respectivement à partir de la méthode § 3.5.2 et § 3.5.3.

L'ensemble des algorithmes de reconstruction des distributions continues ont été obtenus sous Matlab R11 (Mathworks, EU), programmation réalisée par Olivier VITRAC.

4.5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce travail a pour objectif de contribuer à la caractérisation de la variabilité des propriétés technologiques des bois de plantation et son interprétation en termes de la variation du fonctionnement biologique du cambium au cours de la croissance de l'arbre. La mise en place de trois propriétés technologiques (module d'élasticité, masse volumique et module spécifique à l'état saturé) du bois, au sein de 204 arbres issus d'une population de plein frères d'eucalyptus hybrides, a ainsi été étudiée à partir de mesures de croissance radiale et des mesures sur des éprouvettes appartenant à un même plateau diamétral. Une approche nouvelle non déterministe et non paramétrique a été utilisée pour interpréter les mesures, issues des 1161 éprouvettes prélevées, sous la forme de distributions continues et régulières dans le temps et dans l'espace. La méthode basée sur des approximations polynomiales (polynômes de Hermite de degrés variables) identifiées à l'aide d'une méthode des moindres carrés régularisée (recherche de maximum de vraisemblance) a montré une robustesse importante même en présence d'un faible nombre d'échantillons, d'échantillons dissymétriques ou d'incertitude sur les mesures.

Les distributions obtenues pour un même arbre sont conformes à celles déjà décrites dans la littérature pour des éprouvettes provenant d'individus différents. L'allure sigmoïdale de la variation des propriétés technologiques au cours du temps a été utilisée pour paramétrer le fonctionnement du cambium en termes de mise en place de propriétés. Les paramètres endogènes et indépendants retenus sont l'âge cambial à la fin de la période de latence et au point d'inflexion, les propriétés à la moelle, au point d'inflexion et au double de l'âge au point d'inflexion. Le caractère régulier des distributions a en outre permis le calcul du module d'élasticité et de la contrainte de croissance périphériques. Ces caractéristiques ont permis de mettre en évidence deux domaines de valeurs des paramètres précédents ($20 \leq C_p \leq 25$ Mpa et $110 \leq dE/dr_{\max} \leq 120$ Gpa/m⁻¹ ; $27 \leq C_p \leq 32$ Mpa et $200 \leq dE/dr_{\max} \leq 250$ Gpa/m⁻¹) pour les quels l'indice d'éclatement est maximum.

Par ailleurs, les résultats montrent que la variabilité intra arbre et notamment la variation radiale des propriétés est 3 fois supérieure à la variabilité inter arbres. Ce dernier résultat justifie la prise en compte des contraintes de variabilité internes des propriétés technologiques dans les programmes d'amélioration génétique. Les paramètres endogènes ainsi que la propriété globale de l'arbre à 40 mois sont retenus pour la recherche des QTL contrôlant la variation des propriétés technologiques du bois. Les résultats sont analysés par le laboratoire de génétique forestière de l'INRA de Bordeaux et par le programme « arbres et plantations » (Amélioration génétique et création variétale).

L'étude de la distribution continue d'autres propriétés technologiques telles que le retrait au séchage, l'infradensité ou la fissilité au sein de l'arbre nécessite la mesure de ces propriétés sur des éprouvettes radiales prélevés à la même hauteur. D'où l'intérêt de développer en parallèle des techniques de mesure rapides et non invasives des propriétés technologiques du bois comme l'utilisation du NIRS (spectrométrie d'absorption dans le proche infrarouge) pour la mesure du retrait au séchage. L'approche doit être généralisée en prenant en compte à la fois la dimension radiale et longitudinale. Cela nécessiterait des prélèvements d'éprouvettes de même âge cambial suivant la hauteur et un suivi de la croissance en hauteur.

La reconstruction de la variation radiale continue pourrait être améliorée en augmentant la fréquence de relevés des données de croissance et en réduisant la taille des éprouvettes.

5. Bibliographie

1. Baillères H., 1994. *Précontraintes de croissance et propriétés mécano-physiques de clones d'Eucalyptus (Pointe Noire-Congo) : hétérogénéités, corrélations et interprétations histologiques*. Thèse de doctorat en Sciences du bois, Université de Bordeaux 1. 121 p.
2. Baillères H., Verhaegen D., Gion J.M., Grima-Pettenati J., Plomion C., Rozenberg P., Chantre G., Ham-Pichavant F., Pardon P., Doignie J.C., 2000. *Introducing biotechnology to improve the selection efficiency of wood quality traits in Eucalyptus : description of a French research project*. Proceedings of the First IUFRO Workshop : The futur of Eucalypts for wood products. Country Club Casino, Launceston, Tasmania, 19-24 March 2000.p. 271-282.
3. Baillères H., Chanson B., Fournier-Djimbi M., 1997. *Plantations d'arbres à croissance rapide et qualité des produits forestiers sous les tropiques*. XI Congrès forestier mondial, Octobre 1997. Antalya, Turquie. Vol 3, Thème 12 pp : 54 – 62.
4. Chudnoff M., 1961. *The physical and mechanical properties of Eucalyptus camaldulensis*. Israelian Journal of Forestry Research 66, 39p.
5. Downes G.M., Hudson I.L., Raymond C.A., Dean G.H., Michell A.J., Schmileck L.R., Evans R., Muneri A., 1997. *Sampling plantation eucalypts for wood and fibre properties*. CSIRO publishing. 132 p.
6. FAO, 1980. *Amélioration génétique des arbres forestiers*. Etude FAO Forêts (20), compte rendu du cours de formation FAO/DANIDA sur l'amélioration génétique des arbres forestiers. Pp :193 p.
7. Gérard J., 1994. *Contraintes de croissance, variations internes de densité et de module d'élasticité longitudinal, et déformations de sciage chez les eucalyptus de plantation*. Thèse de Doctorat en Sciences du bois, Université de Bordeaux 1. 149 p.
8. Gibson L.J., Ashby M.F., 1999. *Cellular solids : structure and properties*. Cambridge Solid State Science Series. 510p.
9. Girosi F., 1998. *An equivalence between sparse approximation and support vector machines*. Neural Computation, 10 (6) : 1455 – 1480.
10. Grattapaglia D., Bertolucci F.L.G., Penchel R., Sederoff R., 1996. *Genetic mapping of quantitative trait loci controlling growth and wood quality traits in Eucalyptus grandis using a maternal half-sib family and RAPD markers*. Genetics, 144 : 1205 - 1214.
11. Groover A., Devey M., Fiddler T., Lee J., Megraw R., Mitchel-Olds T., Sherman B., Vujcic S., Williams C., Neale D., 1994. *Identification of quantitative trait loci influencing wood specific gravity in an outbred pedigree of loblolly pine*. Genetics, 138 :1293 - 1300.
12. Hans A.S., Burley J., Williamson P., 1972. *Wood quality in Eucalyptus grandis (Hill) Maiden, grown in Zambia*. Holzforschung, 26 : 138 - 141.
13. Hansen, C., 1994. *Analysis and solution of discrete ill posed problems*. Numerical Algorithms, 6 : 1 – 35.
14. Helinska-Raczkowska L., Fabisiac E., 1999. *Radial variation of earlywood vessel lumen diameter as an indicator of the juvenile growth period in ash (Fraxinus excelsior L.)*. Holz als Roh- und Werkstoff, 57 : 283 – 286.
15. Keller R., 1994. *La constitution du bois* in Le bois matériau d'ingénierie. ARBOLOR Nancy, pp.13 – 51.
16. Kucera B., 1994. *A hypothesis relating current annual height increment to juvenile wood formation in Norway spruce*. Wood and fiber science, 26(1) : 152 - 167.

17. Kumar S., Spelman R.J., Garrick D.J., Richardson T.E., Lausberg M., Wilcox P.L., 2000. *Multiple-marker mapping of wood density loci in an outbred pedigree of radiata pine*. Theoretical and Applied Genetics, 100 : 926 - 933.
18. Kuramoto N., Kondo T., Fujisawa Y., Nakata R., Hayashi E., Goto Y., 2000. *Detection of quantitative trait loci for wood strength in Cryptomeria japonica*. Journal of Forestry Research, 30 :1525 - 1533.
19. Laghdir, 2000. Modélisation de la fissuration en bout de grumes liée aux contraintes de croissance Applications aux eucalyptus. Thèse de doctorat en mécanique. Université de Montpellier 2. 175 p.
20. Malan F.S., 1988. *Genetic variation in some growth properties among 18 full-sib families of South African grown Eucalyptus grandis : a preliminary investigation*. South African Forestry Journal 146 : 38 - 43.
21. Malan F.S., 1988. *Wood density variation in four trees of South African grown Eucalyptus grandis (Hill ex Maiden)*. South African Forestry Journal 144 : 36 - 42.
22. Megraw R.A., 1985. *Wood quality factors in Loblolly Pine. The influence of tree age, position in tree, and cultural practice on wood specific gravity, fiber length, and fibril angle*. TAPPI Presser Atlanta. 88 p.
23. Nanson A., 1980. *Le point sur l'amélioration des arbres forestiers*. Annales de Gembloux, 86 : 153 - 171.
24. Nepveu G. 1991. *La variabilité du bois*. INRA Centre de recherche forestière de Nancy Champenoux, 31 p.
25. Plomion C., 2000. *Cartographie génétique chez les végétaux et utilisation des cartes de liaison*. <http://www.pierroton.inra.fr/genetics/cartoql/>
26. Purnell R.C., 1988. *Variation in wood properties of Eucalyptus nitens in a provenance trial on the Eastern transvaal highveld in South Africa*. South African Forestry Journal, 144 : 10 - 22.
27. Sewell M.M., Bassoni D.L., Megraw R.A., Wheeler N.C., Neale D.B., 2000. *Identification of QTLs influencing wood property traits in loblolly pine (Pinus taeda L.) I. Physical wood properties*. Theoretical and Applied Genetics, 101 : 1273 - 1281.
28. Skolmen R.G., 1972. *Specific gravity variation in robusta eucalyptus*. USDA Forest Service research paper, 7 p.
29. Tikhonov A.N., Arsenin V.Y., 1977. *Solutions of ill posed problems*. Scripta Series in Mathematics, John Willey Sons, New York.
30. Verhaegen D., Plomion C., Gion J.M., Poitel M., Costa P., Kremer A., 1996. *Quantitative trait dissection analysis in Eucalyptus using RAPD markers : 1. Detection of QTL in interspecific hybrid progeny, stability of QTL expression across different ages*. Theoretical and Applied Genetics, 95 : 597 - 608.
31. Vigneron, P., 1991. *Création et amélioration de variétés d'hybrides d'Eucalyptus au Congo*. In : IUFRO Symp « Intensive Forestry : the role of Eucalyptus ». Durban, South Africa. pp : 345 - 360.
32. Zobel B.J., 1985. *Juvenile wood in tropical forest plantations : its characteristics and effect on the final product*. Camcore Bulletin on tropical forestry, 2 : 1 - 1.
33. Zobel B.J., Van Buijtenen J.P., 1989. *Wood variation, its causes and control*. Springer Verlag Budapest, 363 p.
- Zobel B.J., Jett J.B., 1995. *Genetics of wood production*. Springer Verlag Budapest, 2

6. PUBLICATIONS

Baillères H, Verhaegen D, Gion Jm, Grima-Pettenati J, Plomion C, Rozenberg P, Chantre G, Ham-Pichavant F, Pardon P, Doignie Jc (2000) Introducing biotechnology to improve the selection efficiency of wood quality traits in eucalyptus: description of a French research project. In: Proceedings of an IUFRO Conference "the Future of Eucalypts for Wood Products". FIAT, Hobart, Tasmania, Australia 19--24 March 2000. Launceston, Tasmania, Australia, pp 271--282

Bailleres H., Davrieux F., Ham-Pichavant F., 2000 Near Infrared analysis as a rapid screening tool for some major wood characteristics in Eucalyptus. Poster presented at the XXI IUFRO World Congress Malaysia, 7-12 August, 2000.

Henri Bailleres, Fabrice Davrieux, Sébastien Allefredre, Frédérique Ham-Pichavant, 2001 : Near Infrared Analysis As A Rapid Screening Tool For Some Major Wood Characteristics In Eucalyptus. International conference "Wood, Breeding, Biotechnology and industrial expectation". June 11-14 2001, La cité mondiale, Bordeaux France.

H. Bailleres, F. Davrieux, S. Allefredre, F. Ham-Pichavant, J. Garcia, 2001 : Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus., IUFRO International Symposium, Developing The Eucalypt Of The Future. Valdivia, Chile, 10 - 15 September, 2001.

Henri Bailleres, Fabrice Davrieux, Frédérique Ham-Pichavant Near infrared analysis as a tool for rapid screening of some major wood characteristics in a eucalyptus breeding program. Annals of Forest Science, Editorial Secretary, Centre de Nancy, INRA, F-54280 Champenoux, France.

Article en préparation :

Henri Baillères, Olivier Vitrac, Tahiana Ramanantoandro : Assessment of continuous distribution of wood properties from a low number of samples: application to the variability of wood modulus of elasticity between trees and within tree

7. Mémoires de fin d'études

ALLEFRESDE Sébastien : Estimation des propriétés physiques du bois d'eucalyptus par spectrophotométrie proche infrarouge. Application à la sélection génétique. Licence professionnelle « Elaboration et Technologie des Matériaux Polymères Organiques ». Juillet 2001.

4.4. Résultats et discussions

Ce chapitre présente les principaux résultats obtenus dans cette étude. Dans une première partie, les variations des propriétés technologiques au sein de l'arbre sont présentées ainsi que leur paramétrisation. La distribution des paramètres est ensuite examinée et discutée au sein de la population d'étude. Finalement, ces paramètres sont interprétés pour l'analyse de problèmes technologiques tels que les fentes en bout.

4.4.1. Exemples typiques de distribution continues des propriétés technologiques au sein d'un arbre

4.4.1.1. Module d'élasticité (E)

La figure 58 présente un résultat typique de reconstruction de la distribution du module d'élasticité au sein d'un arbre. L'arbre présente un rayon de 93,90 mm au moment de la coupe à 59 mois. Cette caractéristique le classe parmi la deuxième moitié des arbres étudiés de distribution normale (moyenne=85,97 mm, écart-type=13,59 mm).

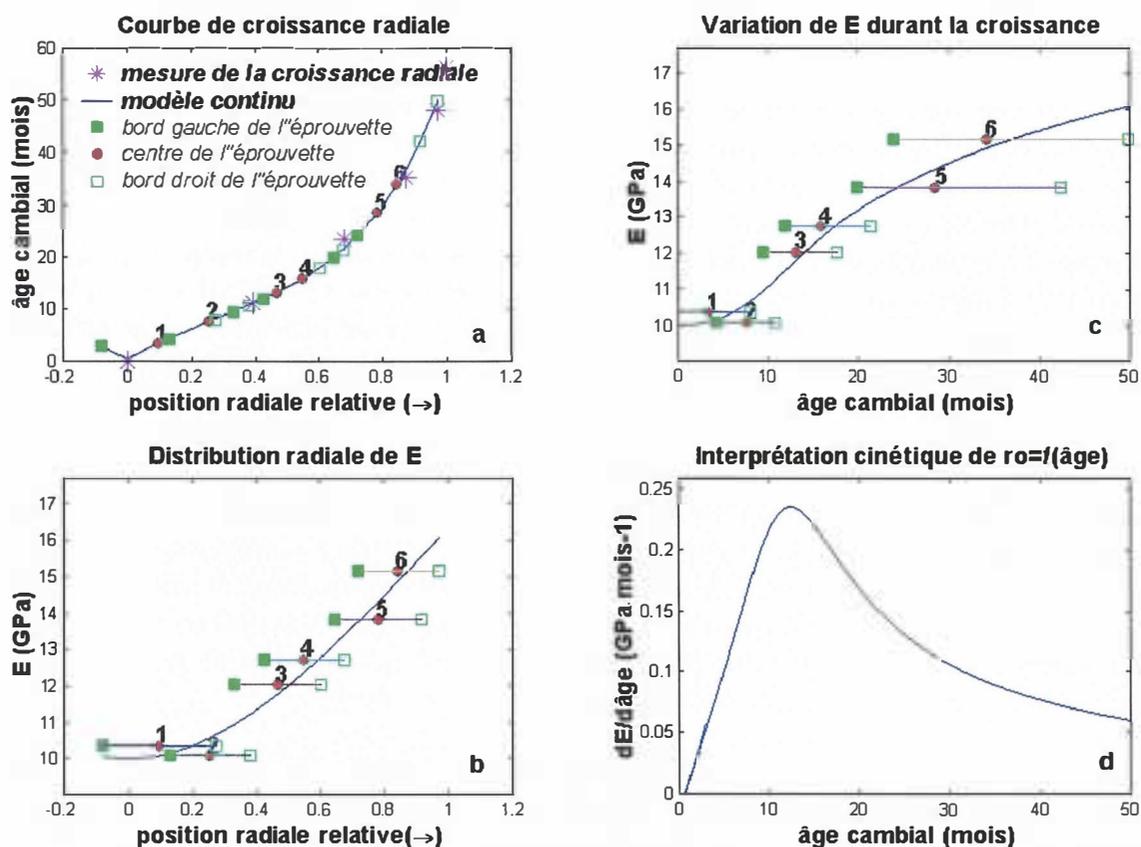


Figure 58 : Reconstruction typique de la distribution dans le temps et dans l'espace du module d'élasticité au sein d'un arbre

La figure 58a présente les résultats de la cinétique de croissance radiale à 1,30 m évaluée à partir de 6 mesures expérimentales de circonférence. L'âge cambial est présenté en fonction de la position radiale relative. La période de mesure est de 12 mois. Une représentation continue est obtenue à partir d'un polynôme de Hermite (ici de degré 3 après optimisation)

prenant en compte la proximité aux rayons équivalents calculés et les contraintes de construction. L'âge théorique des extrémités et du milieu des 6 éprouvettes numérotées de 1 à 6 est également indiqué.

La distribution reconstruite est consistante avec les résultats expérimentaux obtenus par Bouvet (1995) à l'aide d'un modèle monomoléculaire sur des essences équivalentes.

La distribution continue calculée permet d'obtenir une approche satisfaisante et uniforme de la cinétique de croissance malgré le nombre réduit de points expérimentaux et de l'incertitude quant aux variations initiales et finales de l'âge en fonction de la position relative. Elle montre un déplacement rapide du cambium au début de la croissance puis un ralentissement progressif au cours du temps. Elle tend vers un asymptote vertical à $r=1$ dont la position ne peut pas être déterminée précisément au regard de l'information disponible.

La figure 58b présente le module d'élasticité des 6 éprouvettes issues d'un même plateau diamétral (3 éprouvettes à gauche [2, 4, 6] et 3 éprouvettes à droite de la moelle [1, 3, 5]) en fonction de la position relative de leurs extrémités. La distribution continue du module au sein de l'arbre est également représentée pour une identification déduite du recouvrement partiel des valeurs des 6 éprouvettes (ici un polynôme de Hermite de degré 3). La reconstruction proposée s'appuie sur un fort critère de régularité (faible convexité) et symétrie de la distribution du centre vers la périphérie.

L'éprouvette centrale contenant la moelle possède un module élevé, ceci a également été observé par Gérard (1994) et Baillères (1994) et peut être attribué à la présence de bois de tension aux jeunes âges.

Les mesures expérimentales et les données reconstruites sur la base de maximum de vraisemblance (hypothèse de paramètres aux résultats expérimentaux et régularité) montrent une variation strictement monotone du module en fonction de la position, faible puis quasi linéaire pour les positions relatives supérieures à 0,5. Il a été vérifié que des hypothèses plus complexes de la variation du module en fonction de la position conduisent pour un même écart relatif aux valeurs moyennes (c'est-à-dire monotone, exemple maximum local au centre) à des incohérences biologiques (fonctionnement irrégulier ou non symétrique du cambium). Les différences de modules calculées pour les éprouvettes de part et d'autre de la moelle est ainsi attribuée à la symétrie partielle des positions des éprouvettes et/ou à une augmentation de l'asymétrie du tronc et de ses propriétés au cours de la croissance. La démarche de reconstruction non déterministe proposée permet de s'affranchir d'une convergence non uniforme (effet d'interpolation de Runge) au voisinage de la moelle et de la périphérie observée dans les travaux antérieurs. La nature du modèle de représentation continue retenu résulte ici d'un compromis entre le nombre de résultats expérimentaux et leur qualité obtenues pour chaque arbre. Les meilleurs approximations en terme de minimisation de la variance ont été obtenues pour l'ensemble des 191 arbres et un nombre d'éprouvettes de 3 à 8 par plateau diamétral ont été obtenues avec des polynômes de degré 3 ou 4.

La représentation explicite du module d'élasticité en fonction de l'âge cambial déduite des représentations paramétriques en fonction de la position (figure 58a et 58b) est tracée sur la figure 8c. Les éprouvettes sont représentées par une valeur moyenne de E égale à la valeur mesurée et les âges théoriques des extrémités des mêmes éprouvettes. La courbe présente une allure sigmoïdale caractéristique. Le module est faible au centre et augmente rapidement avec l'âge cambial pour tendre vers une valeur asymptotique qui n'est pas atteinte lors de la campagne de mesures à 59 mois. Baillères (1994) a en effet trouvé que les propriétés se stabilisent vers 142 mois pour le clone 1-41 en particulier. Cette représentation met en évidence la forte variation de l'âge cambial dans les éprouvettes (de dimension constante) près de la périphérie et justifie ainsi l'utilisation d'une distribution continue.

Une interprétation cinétique de la variation du module au cours du temps est donnée sur la figure 58d. Le maximum de la courbe confirme l'existence d'un point d'inflexion dans la courbe module en fonction de l'âge. Avant le point d'inflexion, l'allure linéaire de la courbe démontre une évolution parabolique de la propriété pour des faibles âges cambiaux. De même, l'allure hyperbolique après le point d'inflexion confère une croissance logarithmique ou quasi asymptotique.

Les résultats obtenus ici sont consistants avec ceux présentés par Zobel *et al.* (1989) et Baillères (1994) et Gérard (1994). Ces résultats permettent toutefois de préciser la variation des propriétés technologiques lors des premiers mois de croissance et d'identifier une phase de latence non précédemment décrite.

4.4.1.2. Masse volumique (ρ_0)

La figure 59 présente un résultat typique de reconstruction de la distribution de la masse volumique au sein de deux arbres représentatifs de 2 comportements identifiés au sein de la population. Dans le cas de l'arbre A correspondant à 92% de l'effectif total, une masse volumique croissante en fonction de la position radiale est observée (figure 9Aa). En revanche, pour l'arbre B correspondant à 8% de l'effectif total (i.e. 16 arbres sur 191), la masse volumique est décroissante en fonction de la position radiale (figure 59Ba). L'arbre (A) est le même que celui présenté pour le module d'élasticité (§ 4.1.1). Le second arbre (B) a un rayon de 77,99 mm au moment de la coupe et se classe dans la moitié inférieure de la population d'arbres étudiée.

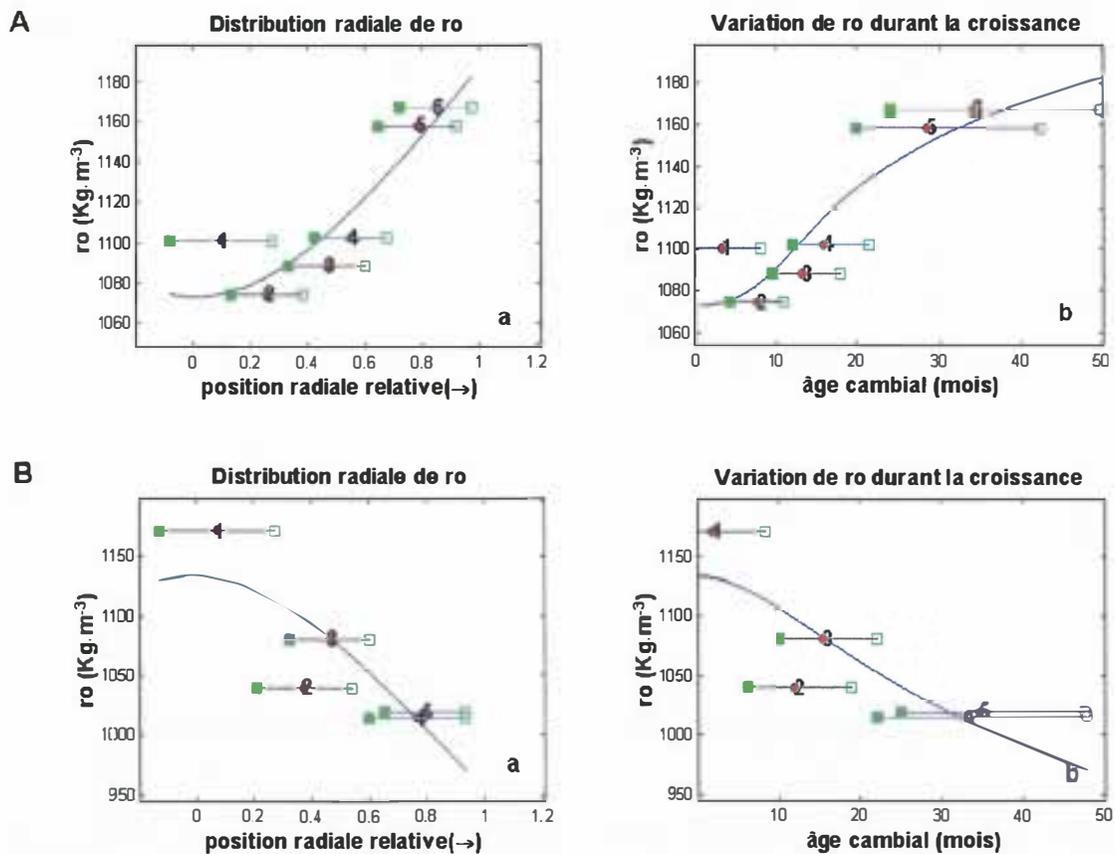


Figure 59 : Reconstruction typique de la distribution dans le temps et dans l'espace de la variation de la masse volumique

A) Cas de ρ_0 décroissant suivant le rayon

B) Cas de ρ_0 croissant suivant le rayon

❖ Pour le cas de l'arbre A :

La figure 9Aa présente la masse volumique (mesurée sur les 6 mêmes éprouvettes ayant servi à la mesure du module d'élasticité) en fonction de la position radiale relative. La distribution continue de la masse volumique au sein de l'arbre est également présentée. L'éprouvette contenant la moelle a une masse volumique élevée, ce phénomène peut être dû à la présence de bois de tension en début de croissance. L'algorithmme a sélectionné un polynôme de degré 3 pour représenter la distribution continue de la masse volumique au sein de l'arbre. L'allure de la courbe ressemble à celle présentant la distribution continue du module d'élasticité (figure 8b). Cela confirme la ressemblance des 2 caractéristiques trouvée par Laghadir (2000) sur les mêmes individus.

La figure Ab présente la variation de la masse volumique durant la croissance et l'interprétation cinétique de la variation de la masse volumique en fonction de l'âge cambial. Elle présente une allure sigmoïdale semblable à la courbe obtenue sur le module d'élasticité (figures 8). On retrouve la période de latence suivie de la période de forte croissance et la période de ralentissement.

❖ Pour le cas de l'arbre B :

La figure 9Ba présente la masse volumique des 5 éprouvettes débitées sur un même plateau diamétral (1, 3, 5 prélevées à gauche de la moelle, 2 et 4 prélevées à droite). La masse volumique décroît de la moelle vers la périphérie, que ce soit d'un côté ou de l'autre de la moelle. Cet effet est significatif car l'amplitude de la masse volumique est supérieure à l'erreur de mesure de 3%. La distribution continue de son module d'élasticité ne varie pourtant pas dans le même sens décroissant.

La figure 59Bb présente la variation de la masse volumique durant la croissance. La distribution continue est caractérisée par une allure sigmoïdale, mais inversée comparée à celle de la figure 9Ab.

4.4.1.3. Module spécifique (E/ro)

La figure 60 présente une reconstruction typique de la variation du module spécifique. Elle est reconstruite à partir des mêmes arbres que ceux des figures 8 et 9.

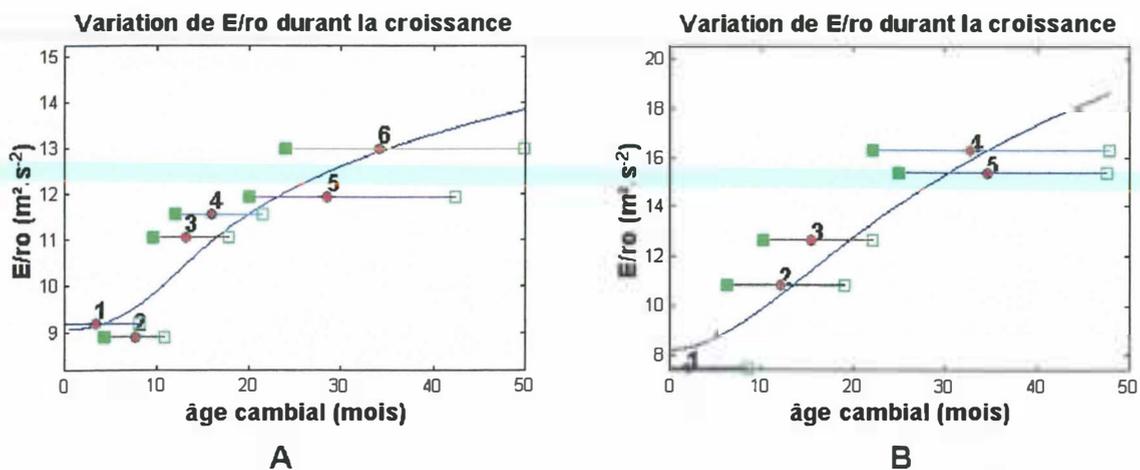


Figure 60 : Reconstruction typique de la distribution dans le temps de la variation du module spécifique

A) Cas de ro croissant suivant le rayon

B) Cas de ro décroissant suivant le rayon

La représentation de la variation radiale continue de E/ro , présente la même allure que celle obtenue avec le module d'élasticité (figure 58), que la masse volumique soit décroissante ou pas en fonction de la position de la position radiale relative. Comme le module spécifique est obtenu à partir du rapport entre le module d'élasticité et la masse volumique, c'est donc le module d'élasticité qui l'emporte puisque sa variation est significativement plus importante.

4.4.1.4. Evaluation des différentes sources de variabilité des propriétés technologiques au sein de la population d'étude

Les contributions des sources de variations (arbre, temps de croissance et position radiale) sur la qualité du bois sont évaluées à partir des distributions continues des propriétés technologiques moyennées sur le rayon de l'arbre pour les deux premières et locale pour la dernière.

Un exemple typique de la variation du module d'élasticité de la qualité globale de l'arbre au cours de son cycle de vie est donné pour le même arbre que celui des figure 58, 59A et 60A. La cinétique de variation du module moyen de l'arbre est homothétique de la cinétique de variation des propriétés locales mises en place par le cambium (figure 58c). L'amplitude de variation est toutefois plus faible et plus amortie à l'échelle de l'arbre entier (figure 61).

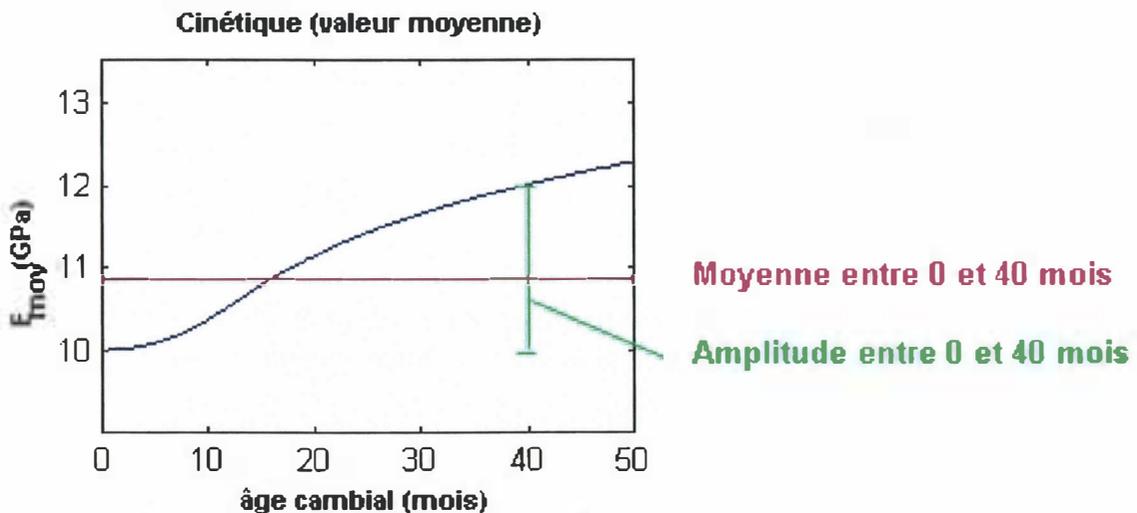


Figure 61 : Variation typique du module d'élasticité globale de l'arbre au cours de sa vie

Pour chacun des 191 arbres étudiés et chacune des propriétés (module d'élasticité, masse volumique, module spécifique), la figure 62 récapitule les diagrammes de dispersion :

- de l'amplitude de la variation temporelle de la propriété moyennée à l'échelle de l'arbre entre 0 et 40 mois ($E_{cum40} - E_{cum0}$) (figure 61),
- de la moyenne temporelle de la propriété à l'échelle de l'arbre entre 0 et 40 mois (E_{cm}) (figure 61),
- de l'amplitude de la variation spatiale de la propriété au sein d'un plateau diamétral ($E_p - E_{moelle}$) (figure 58b).

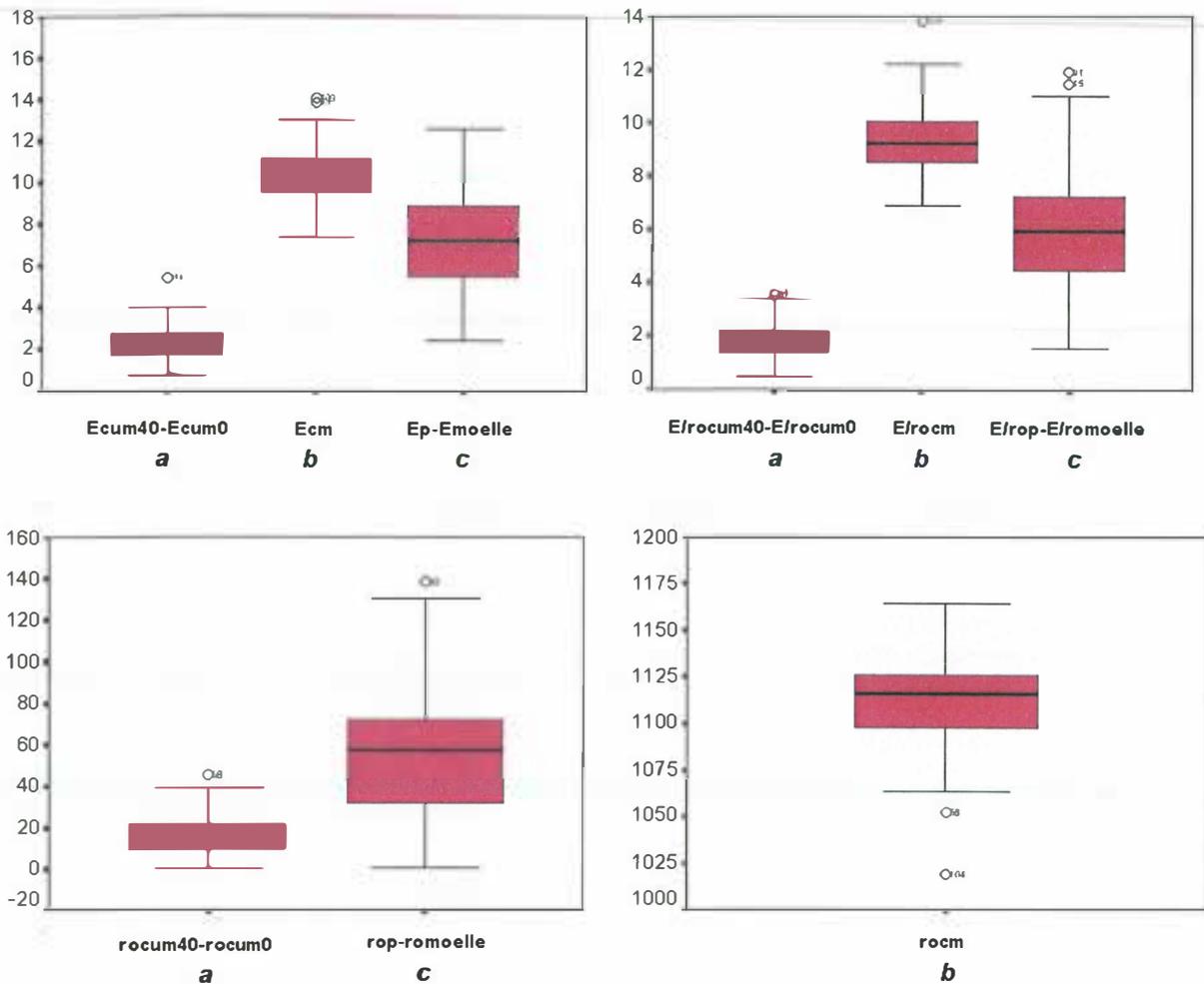


Figure 62 : diagramme de dispersion de : a) amplitude de la variation temporelle
 b) moyenne temporelle c) amplitude de la variation spatiale pour les 3 propriétés

Les contributions des sources de variations arbre, temps de croissance et position sont évaluées à partir respectivement de la moyenne (ou médiane) du diagramme a, de la dispersion (ou amplitude) du diagramme b, de la moyenne (ou médiane) du diagramme c. Les principales conclusions sont résumées dans le tableau 24.

	E (Gpa)	ro (Kg.m ⁻³)	E/ro (m ² /s ²)
Arbre	2,26	18,44	1,87
Temps de croissance	6,72	108,03	6,93
Position radiale	7,16	50,58	5,92

Tableau 24 : Quantification de la contribution des 3 sources de variation (arbre, temps, position radiale) des propriétés du bois dans l'arbre

Pour E et E/ro, la variation radiale des propriétés est 3 fois supérieure à la variabilité inter arbres, elle est de même ordre de grandeur que la variation temporelle. Pour ro, la variation radiale des propriétés est 3 fois supérieure à la variabilité inter arbres et la variation temporelle est 2 fois supérieure à la variation radiale. La forte variabilité due à l'effet position radiale et l'effet temps justifie la prise en compte des contraintes de variabilité internes des propriétés technologiques dans les programmes d'amélioration génétique.

4.4.1.5. Paramétrisation des variations des propriétés technologiques au cours du fonctionnement du cambium (paramètres endogènes)

La variation continue des trois propriétés technologiques étudiés (module d'élasticité, masse volumique, module spécifique) avec l'âge cambial présente une allure sigmoïdale caractéristique déterminée de manière satisfaisante par cinq degrés de libertés. Les distributions reconstruites sont ainsi utilisées pour retenir 5 paramètres endogènes répartis en deux groupes : paramètres cinétiques (en mois) et paramètres d'état (dans la même unité que la propriété étudiée notée X) :

Notations	Mode de calcul	Groupe	Unité	Signification
X_{moelle}	Min(Xinterpolée)	Paramètre d'état	GPa ou $Kg.m^{-3}$ ou m^2/s^2	propriété à la moelle
X_i	X correspondant à $(dX/dA)_{max}$	Paramètre d'état	GPa ou $Kg.m^{-3}$ ou m^2/s^2	propriété au point d'inflexion
A_i	Age correspondant à $(dX/dA)_{max}$	Paramètre cinétique	mois	âge cambial au point d'inflexion
X_{2i}	X correspondant à A_i	Paramètre d'état	GPa ou $Kg.m^{-3}$ ou m^2/s^2	propriété après le point d'inflexion, au double de l'âge i
A_u	$\frac{A_i (X_i - X_{moelle})}{(dX/dA)_{max}}$	Paramètre cinétique	mois	âge cambial de fin de période de latence

Tableau 25 : Description des paramètres endogènes retenus

La propriété à la périphérie (E_{periph} à $r=r_{max}=1$) n'a pas été prise pour représenter la propriété après le point d'inflexion parce que la reconstruction n'est pas précise au delà de la moitié de la dernière éprouvette vue sa taille en âge.

4.4.2. Variation des paramètres au sein d'une population de plein frères

Cette partie s'intéresse à la distribution des précédents paramètres au sein de la population d'arbres étudiés.

4.4.2.1. Distribution des paramètres endogènes

La figure 63 présente l'histogramme de distribution du paramètre a_i pour le module d'élasticité au sein de la population.

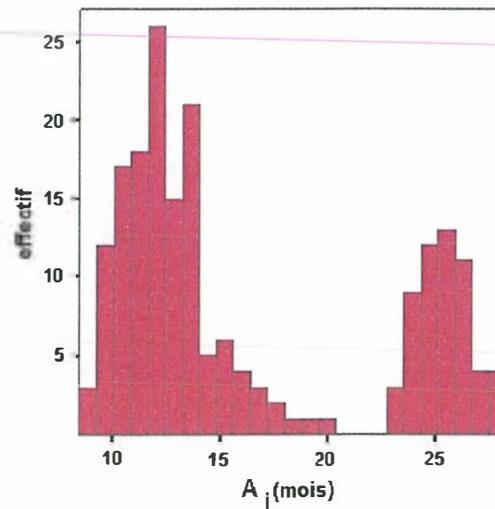


Figure 63 : Distribution des valeurs du paramètre a_i dans la population étudiée

La distribution apparente du paramètre a_i est bimodale et normale sur chacune des ses modalités. La première modalité, de moyenne 12,4 mois (écart-type=2,1 mois) regroupe 134 arbres. La deuxième de moyenne 25,4 mois (écart-type=1,4 mois) regroupe 57 arbres. Ces derniers arbres appartiennent au groupe des arbres pour lesquels la période d'échantillonnage est la plus grande (36 mois contre 14 mois pour les 134 arbres de la première modalité). Le caractère bi-modal de la distribution traduirait un artefact expérimental et non une variabilité naturelle. Ainsi, seuls les paramètres temporels calculés pour les 134 arbres de la première distribution sont utilisés pour le reste de cette étude. Pour les paramètres d'état, l'ensemble de la population est considérée car l'erreur d'estimation est peu sensible à la période d'échantillonnage.

La figure 64 présente la distribution des paramètres endogènes pour les trois propriétés technologiques au sein de la population d'étude.

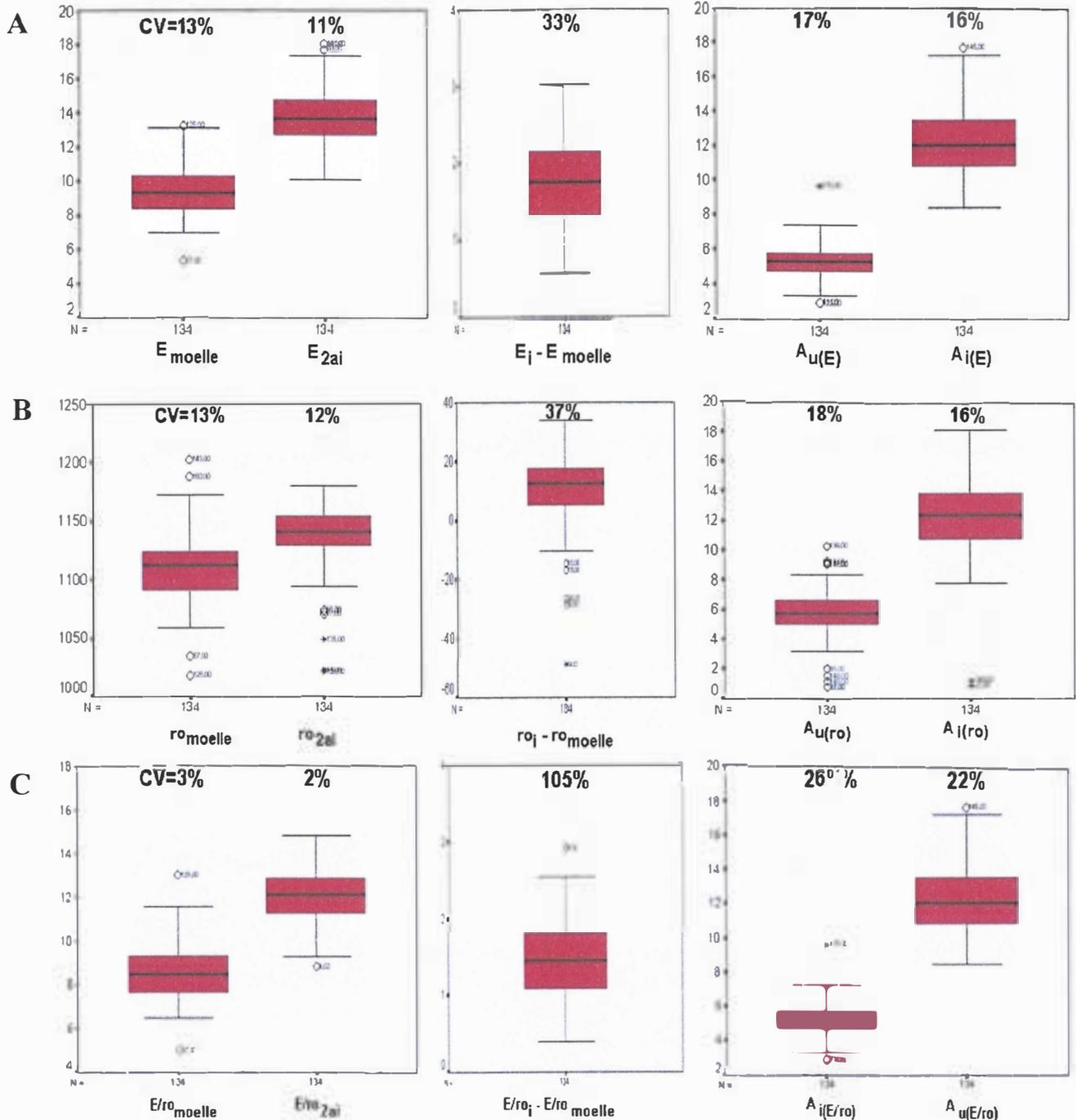


Figure 64 : Distribution des paramètres endogènes au sein de la population de plein frères avec leur coefficient de variation (CV) respectif

a) Module d'élasticité b) Masse volumique c) Module spécifique

Pour les 3 propriétés étudiées, les propriétés varient significativement entre les arbres. La distribution des paramètres est de type normal au sein de la population étudiée. Le coefficient de variation est compris entre 2% à 105% pour les paramètres d'état, de 16% à 26 % pour les paramètres cinétiques. Le fonctionnement du cambium en termes de mise en place des propriétés du bois diffère ainsi entre les arbres. Sur chaque propriété, ce sont les différences entre les propriétés au point d'inflexion et les propriétés à la moelle ($X_i - X_{moelle}$)

qui varient le plus. Le coefficient de variation très élevé ($CV= 105\%$) observé sur ro_i-ro_{moelle} est attribué à la valeur négative due à la décroissance de la masse volumique de la moelle vers la périphérie.

La masse volumique varie moins entre arbres ($CV=3\%$) que le module d'élasticité ($CV= 13\%$). Ce phénomène est probablement expliqué par la mesure sur des échantillons saturés d'eau : la masse d'eau contenue dans le bois tend à écraser la plage de variation. Par ailleurs, la composition des parois cellulaires évolue singulièrement dans la phase juvénile et explique les forts changements de E pour des faibles variations de ro . L'utilisation de l'infradensité aurait été plus judicieuse.

4.4.2.2. Étude de la colinéarité des paramètres

Les paramètres temporels identifiés sont indépendants de l'unité de la propriété utilisée pour leur identification. Les figures 15 et 16 présentent les corrélations linéaires 2 à 2 pour les paramètres relatifs à l'âge.

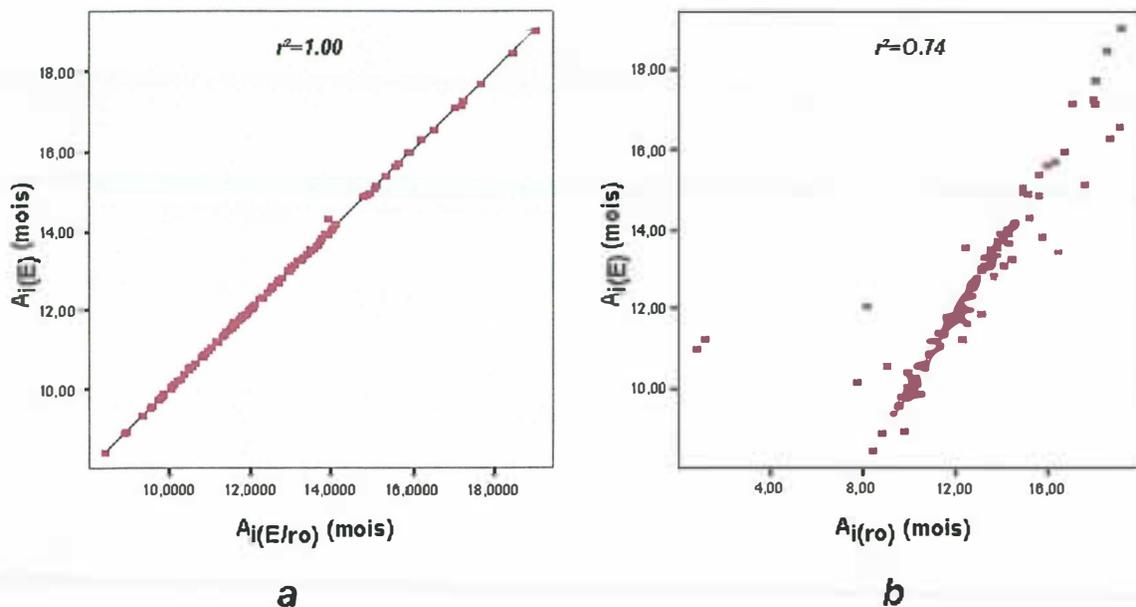


Figure 65 : Corrélations entre les paramètres endogènes a_i du module d'élasticité avec :
a) le module spécifique
b) la masse volumique

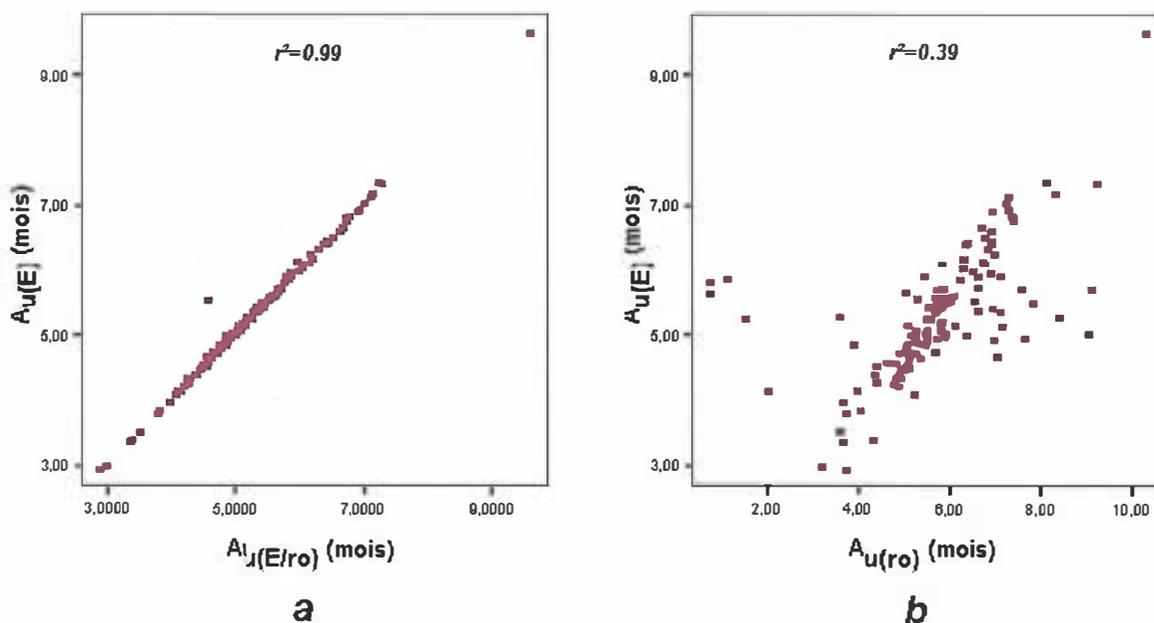


Figure 66 : Corrélations entre les paramètres endogènes A_u du module d'élasticité avec :
 a) le module spécifique
 b) la masse volumique

Elles sont significatives et non biaisées pour les paramètres A_i et A_u des distributions des propriétés E et E/ro (figure 63a et 64a), confirmant ainsi la prédominance de la variation temporelle du module d'élasticité sur la variation du module spécifique. Les représentations 2 à 2 des paramètres A_i et A_u calculés à partir des propriétés E et ro (figures 66b et 67b) montrent une orientation privilégiée du nuage suivant une droite de pente 1 et d'ordonnée à l'origine nulle. Le caractère non biaisé de la corrélation confirme la liaison biologique partielle entre les paramètres. Cette dernière n'est toutefois pas vérifiée pour les arbres dont la masse volumique décroît de la moelle vers la périphérie, cette sous population apparaît sous la forme d'un second nuage d'orientation horizontale et pour lesquels les variations temporelles de E et de ro sont indépendantes.

4.4.3. Définition des critères endogènes pour l'identification de marqueurs génétiques contrôlant la variation des propriétés technologiques

L'identification de paramètres endogènes indépendants autorise la définition de critères utiles pour l'identification des marqueurs génétiques associés à la variation des propriétés technologiques dans l'arbre. Le tableau 5 résume les valeurs souhaitables pour des arbres « optimaux » aux regard des propriétés technologiques.

Paramètre	Valeur attendue
Age de fin de latence (A_u)	faible
Age au point d'inflexion (A_i)	faible
Propriété de la moelle (X_{moelle})	élevée
Propriété au point d'inflexion – propriété de la moelle ($X_i - X_{moelle}$)	élevée
Propriété après l'inflexion (X_{2ai})	élevée

Tableau 26 : Critères retenus pour l'identification de marqueurs contrôlant la variabilité des propriétés technologiques

Le problème d'optimisation multicritères ainsi formulé peut être standardisé à partir d'une fonctionnelle régularisée équivalente à une méthode d'optimisation sous contraintes comme indiqué dans l'équation 9.

$$\arg \min \left[\alpha \|a_u\|_2^2 + \beta \|a_i\|_2^2 + \gamma \|X_i - X_{moelle}\|_n^2 + \delta \|X_{2i} - X_i\|_n^2 \right] \quad [9]$$

où $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ caractérisent le poids respectif de chacune des contraintes.

Le technologue recherche plus particulièrement une faible variation entre les propriétés à la moelle, au point d'inflexion, et à la position à $2a_i$. Dans cette stratégie, les valeurs nominales ont moins d'importance et une cinétique de variation des propriétés est privilégiée pour arriver rapidement à une stabilisation des propriétés à un âge jeune.

La propriété globale de l'arbre à un âge donné est donnée sur la figure 11. Les données issues de cette représentation (par exemple Ec_{um} à 40 mois) seront prises comme critères pour identifier les QTL associés à la qualité du bois. Vu que les paramètres A_i et A_u pour les 3 propriétés étudiées sont corrélés entre eux, les paramètres suivants sont retenus pour l'identification des QTL associés à la variabilité des propriétés du bois : $A_u(E), A_i(E), X_{moelle}, X_i - X_{moelle}, X_{2ai}$.

4.4.4. Analyse du problème technologique de fentes en bout à l'aide des distributions endogènes des propriétés technologiques

Le problème technologique de fente en bout est analysé à partir des valeurs périphériques de E et de la contrainte périphérique (C_p exprimée en MPa) définie par l'équation 10. Les valeurs sont déduites respectivement de l'extrapolation de la distribution radiale continue de E et de son gradient radial à la périphérie ($r = 1$).

$$C_p = \varepsilon \times E \quad [10]$$

où ε est la déformation (μdef) (§3.4.1.1)

E le module d'élasticité à la périphérie (Mpa).

La figure 57 présente les relations 2 à 2 de l'indice d'éclatement à 1 mois (IE_{1mois}) avec les valeurs de DRLM moyen, la contrainte périphérique et le gradient de E à la périphérie.

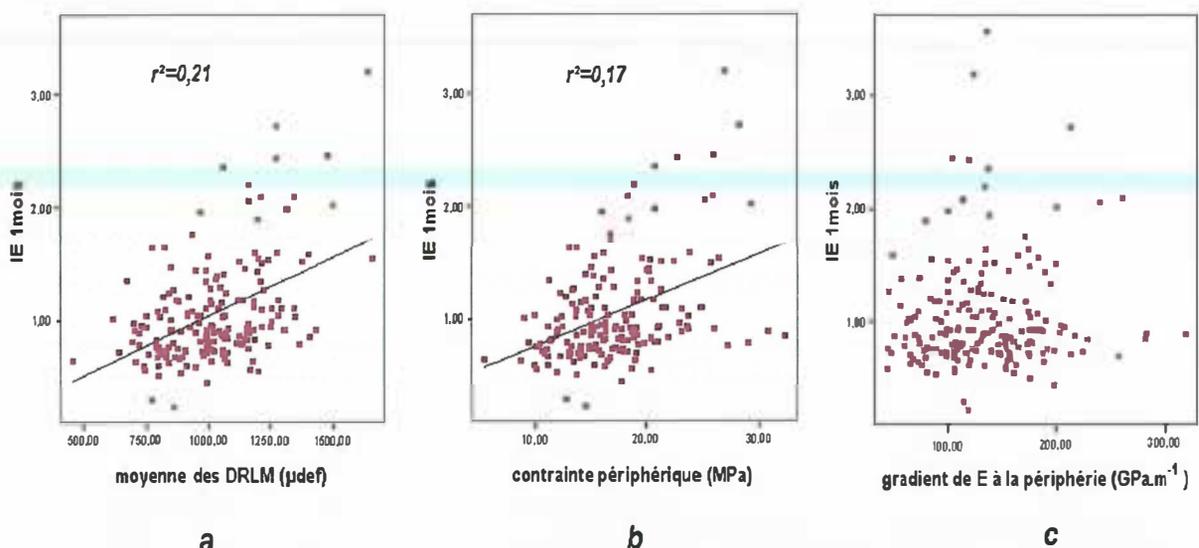


Figure 57 : Corrélation entre $IE_{1 mois}$ et :
 a) la moyenne des DRLM b) C_p c) le gradient de E à la périphérie

IE augmente globalement avec la moyenne des DRLM (figure 17a). Toutefois, des variations importantes sont observées d'un arbre à l'autre et peuvent difficilement être approchées à partir d'une approximation linéaire. Ces résultats contredisent ceux trouvés par Baillères (1994) selon lesquels la moyenne des DRLM est un bon indicateur des proportions de fentes en bout ($r^2=0,80$). Son étude a été réalisée sur plusieurs clones au comportement contrasté. Au sein d'une population homogène comme des plein-frères, d'autres caractéristiques doivent être prises en compte.

La relation 2 à 2 entre IE et Cp (figure 17b) montre 2 tendances. Pour une première sous-population, IE augmente globalement avec Cp mais des variations sont observées d'un arbre à l'autre. Pour une deuxième sous-population, IE reste constant quand Cp augmente, IE est dans ce cas indépendant de Cp.

La figure 57c montre que IE est indépendant du gradient de E à la périphérie.

Les régressions linéaires ne donnent pas une explication satisfaisante des fentes en bout. D'autres facteurs méritent d'être pris en compte comme la ténacité transverse qui augmente fortement avec la présence de contre-fil. Dans ce cas, malgré des contraintes de croissance périphérique élevées, les fentes en bout sont peu développées.

La figure 58 est une représentation non linéaire de IE 1 mois en fonction de C_p et dE/dr_{\max} .

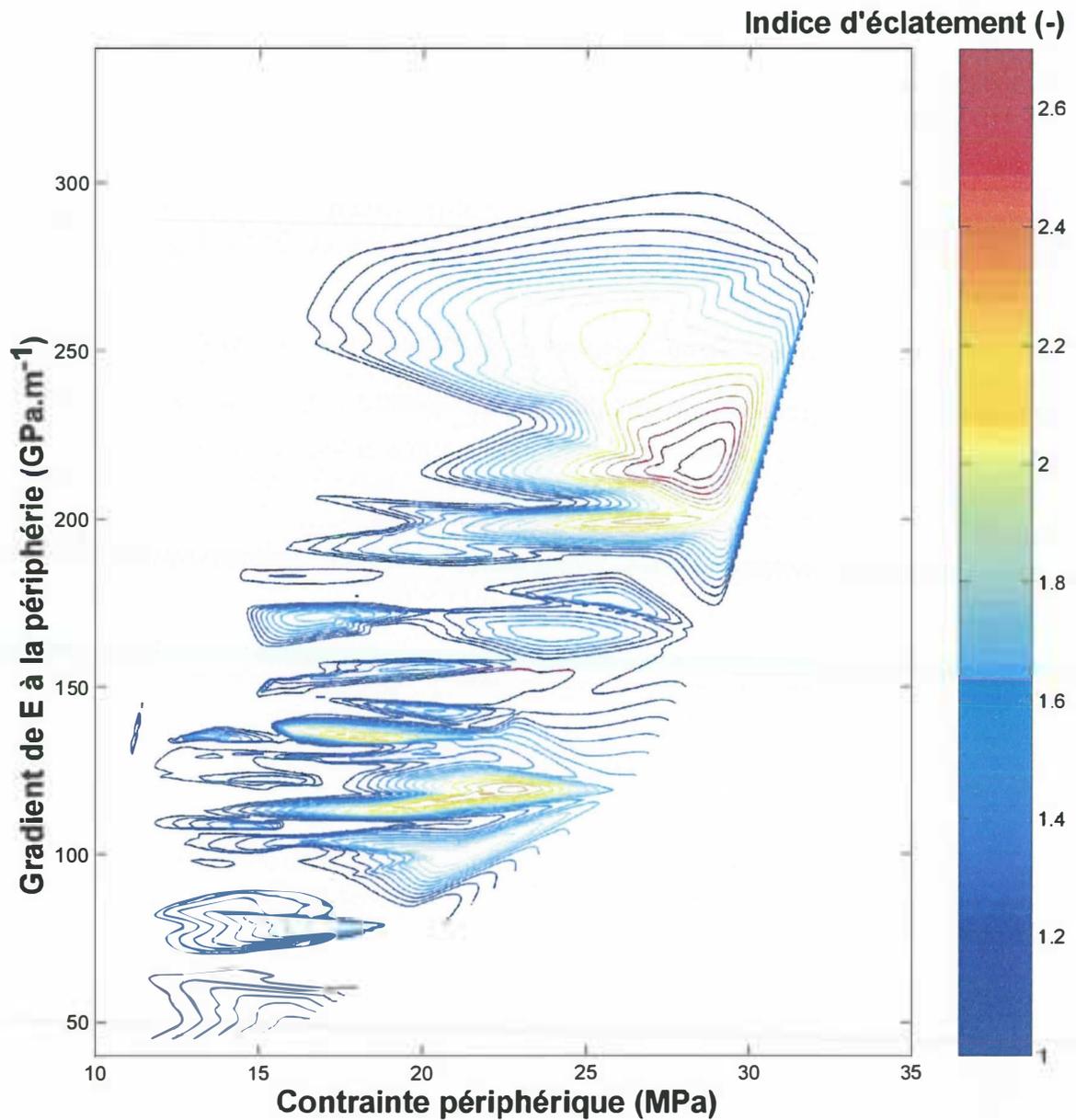


Figure 58 : Représentation de l'indice d'éclatement en fonction du gradient de E à la périphérie et C_p

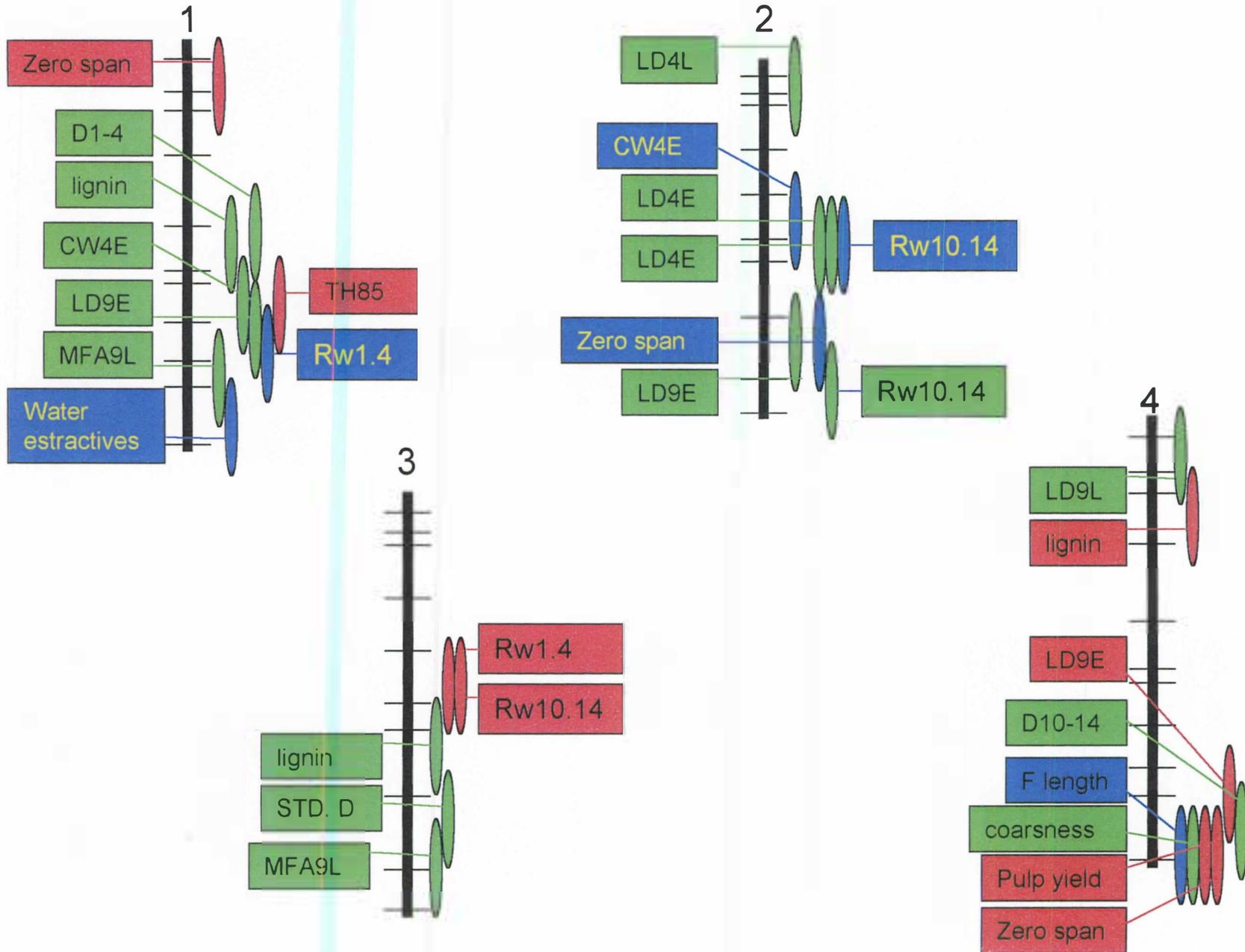
La figure 18 permet de distinguer 2 domaines qui offrent un niveau limitant la qualité finale du bois (où IE est maximal) : il s'agit des domaines pour lesquels :

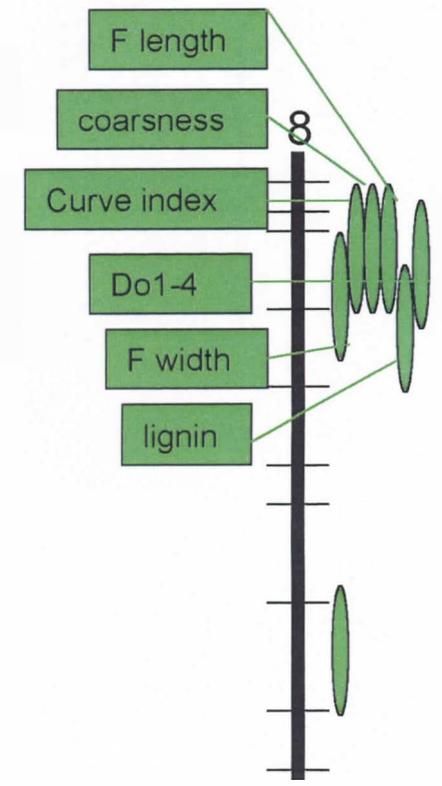
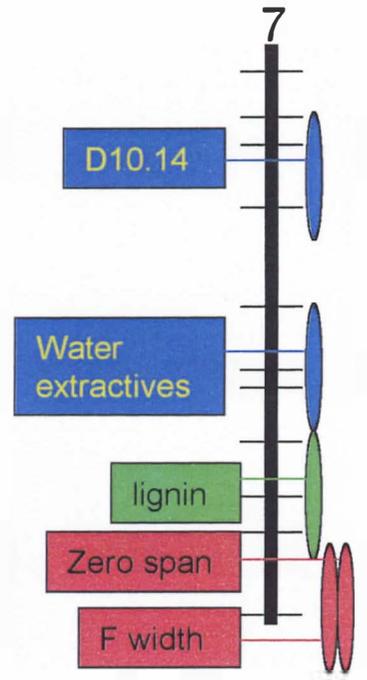
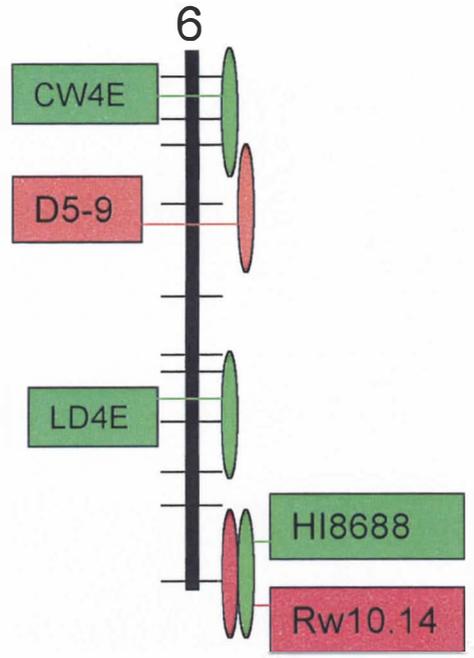
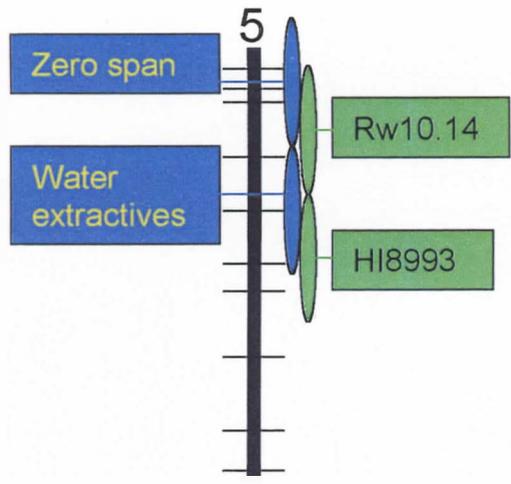
- C_p est compris entre 20 et 25 Mpa et dE/dr_{\max} entre 110 et 120 Gpa.m⁻¹,
- C_p est compris entre 27 et 32 Mpa et dE/dr_{\max} entre 200 et 250 Gpa.m⁻¹.

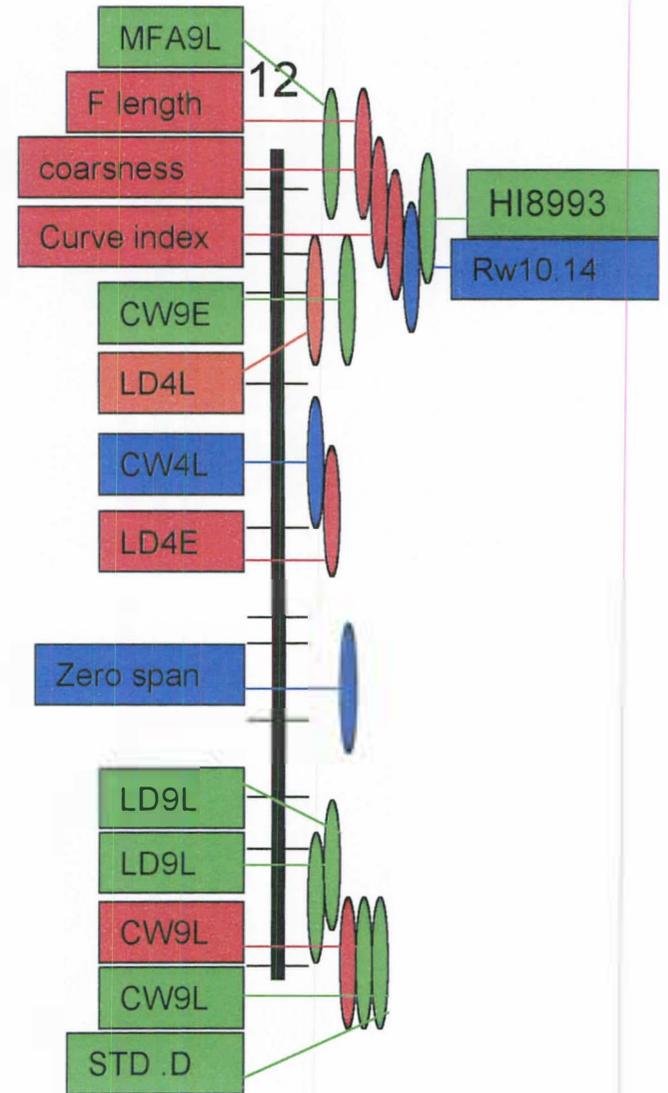
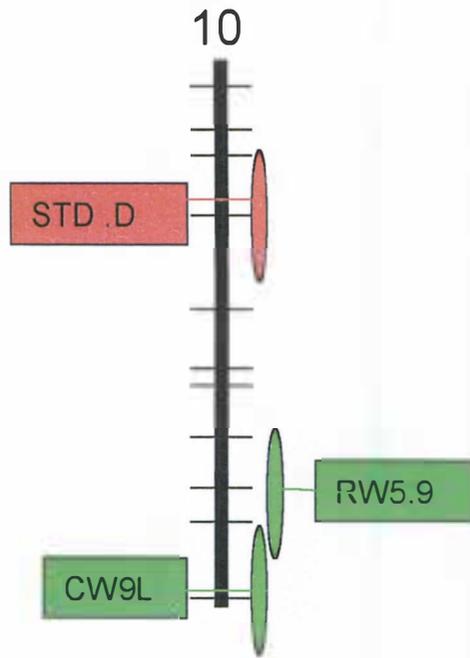
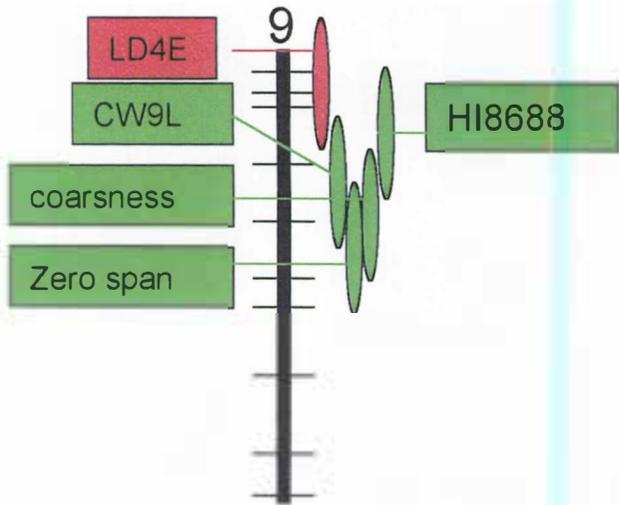
RAMANANANTOANDRO Tahiana : Prise en compte des caractéristiques technologiques du bois dans les méthodes d'amélioration génétique : application aux eucalyptus tropicaux. DEA « sciences du bois », Bordeaux, juillet 2001

LAGHDIR Azziz, 2000. Modélisation de la fissuration en bout de grumes liée aux contraintes de croissance Applications aux eucalyptus. Thèse de doctorat en mécanique. Université de Montpellier 2. 175 p.

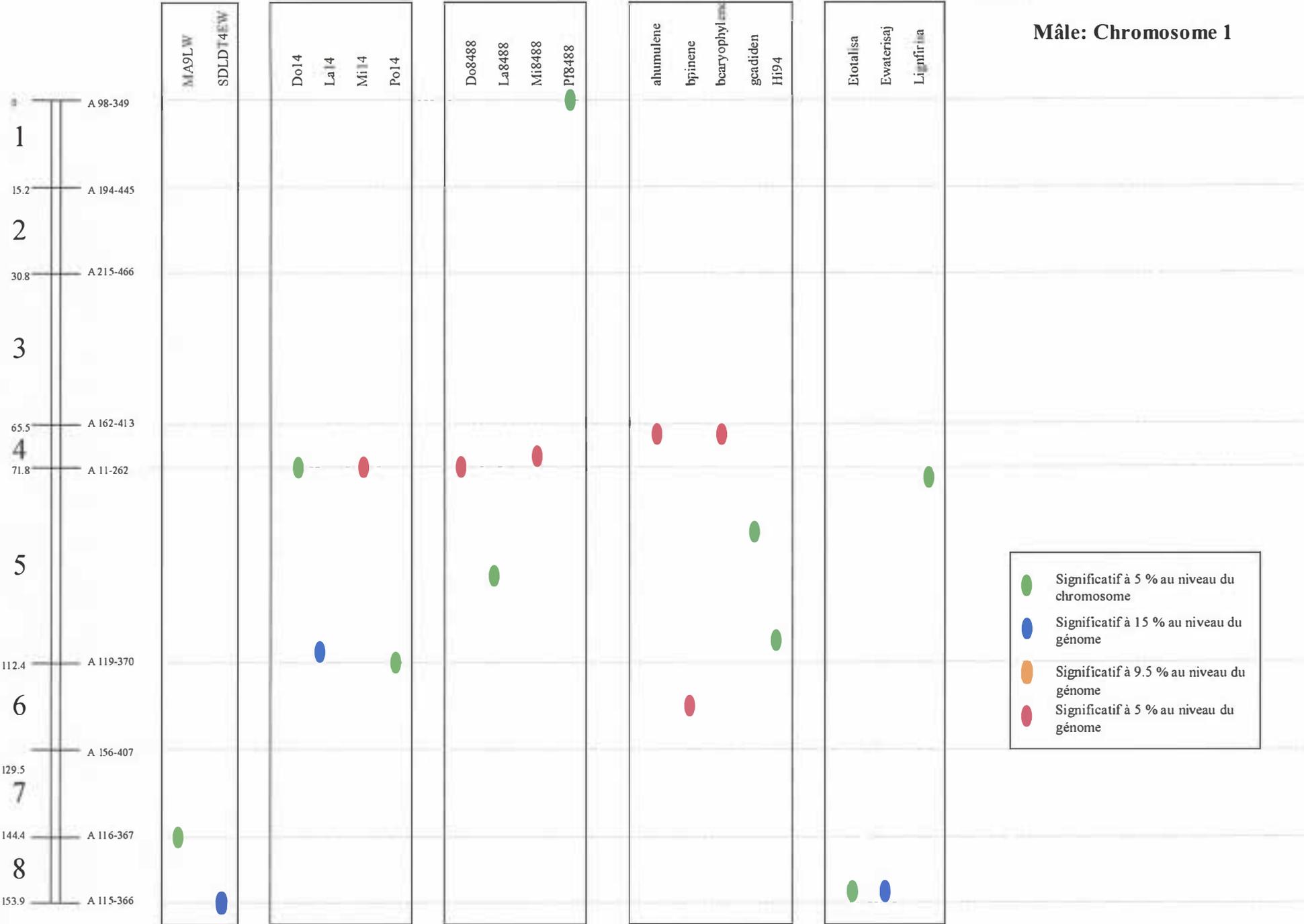
Localisation des QTLs sur la carte génétique du pin maritime (Groupes 1 à 12).
Se reporter au tableau précédent pour la définition des caractères.



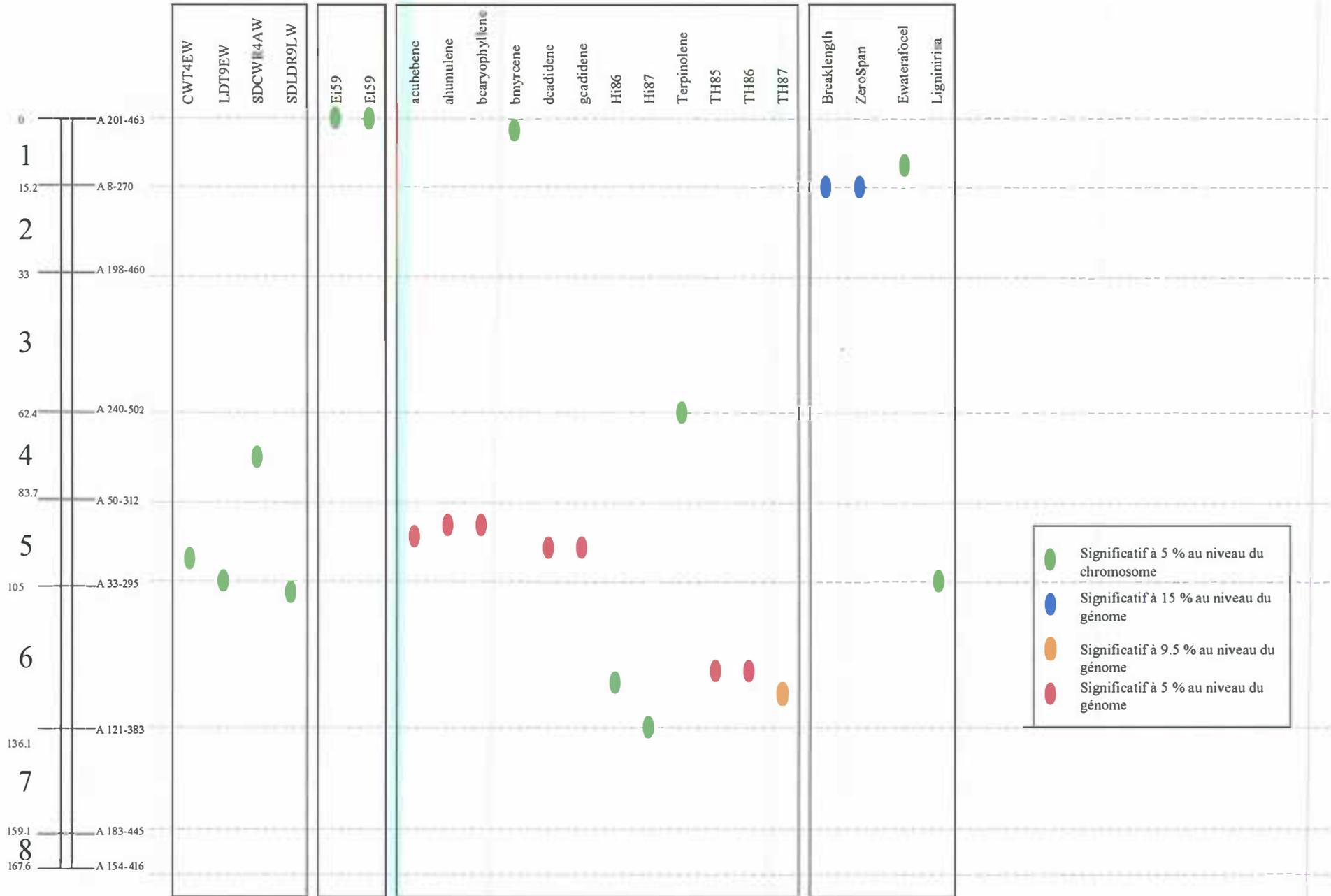


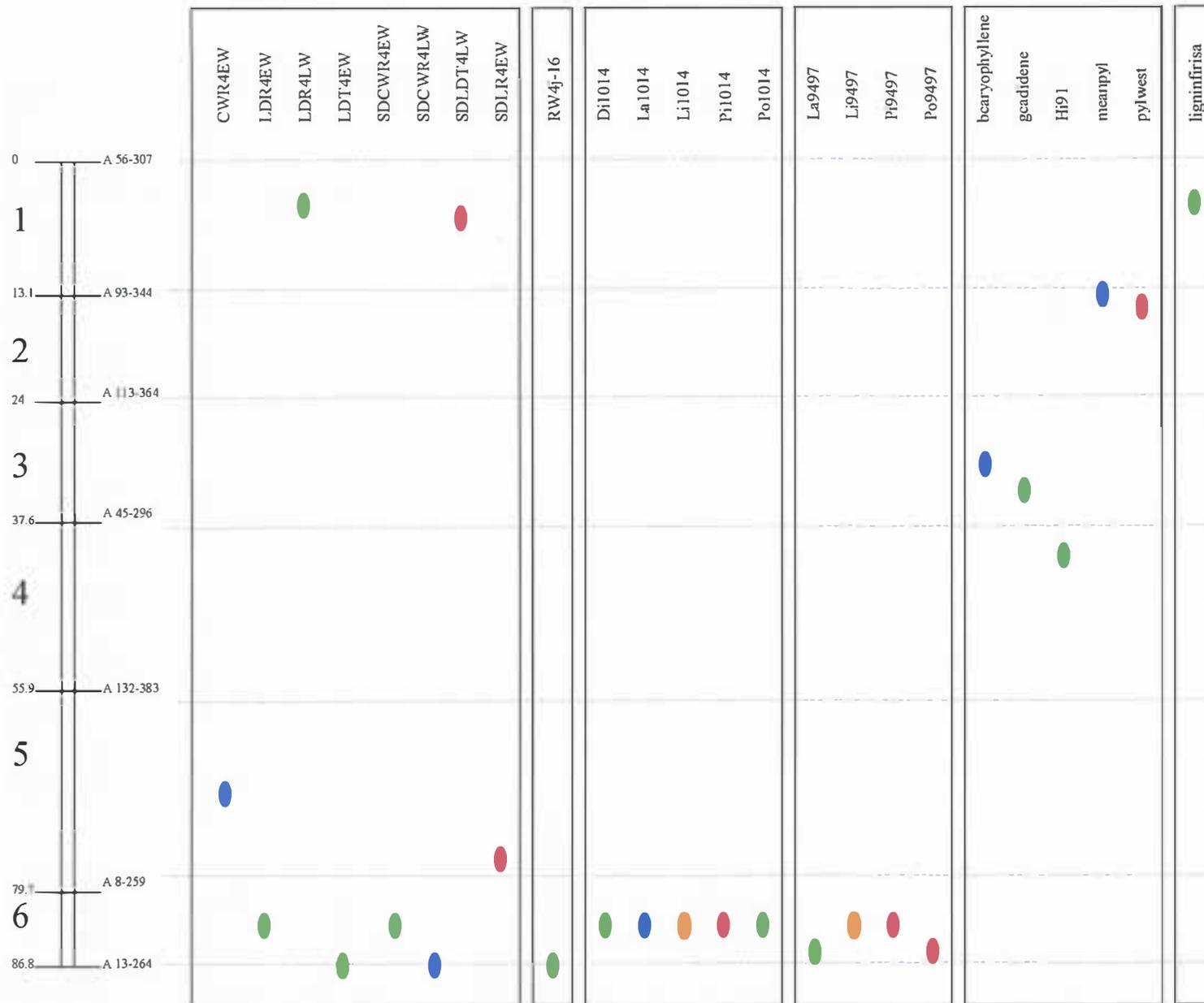


Mâle: Chromosome 1

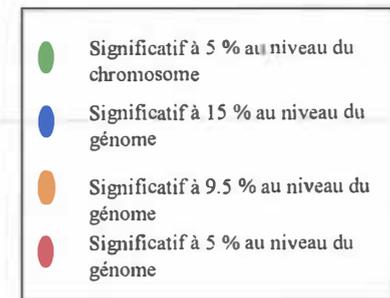


Femelle: Chromosome 1

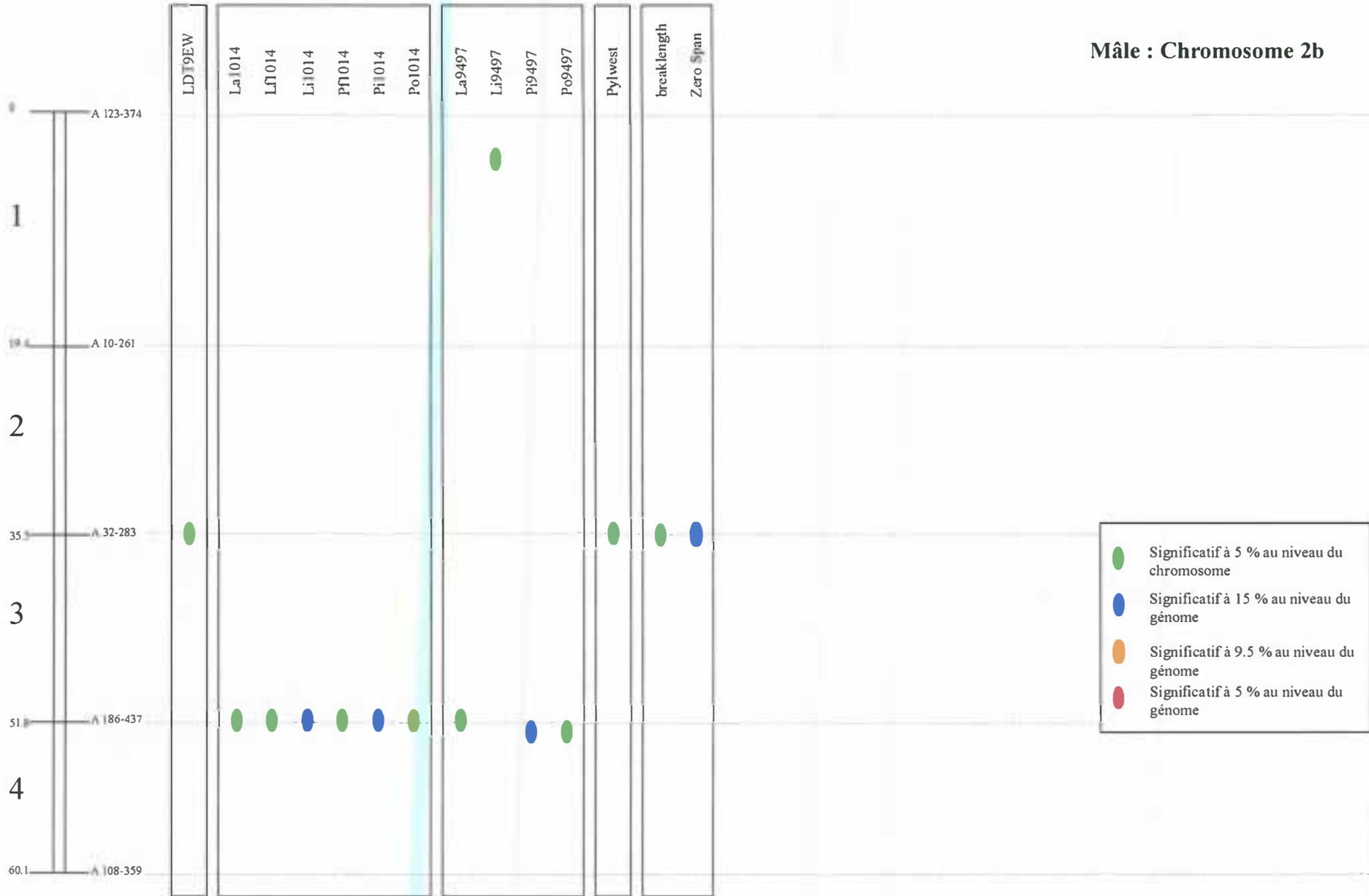




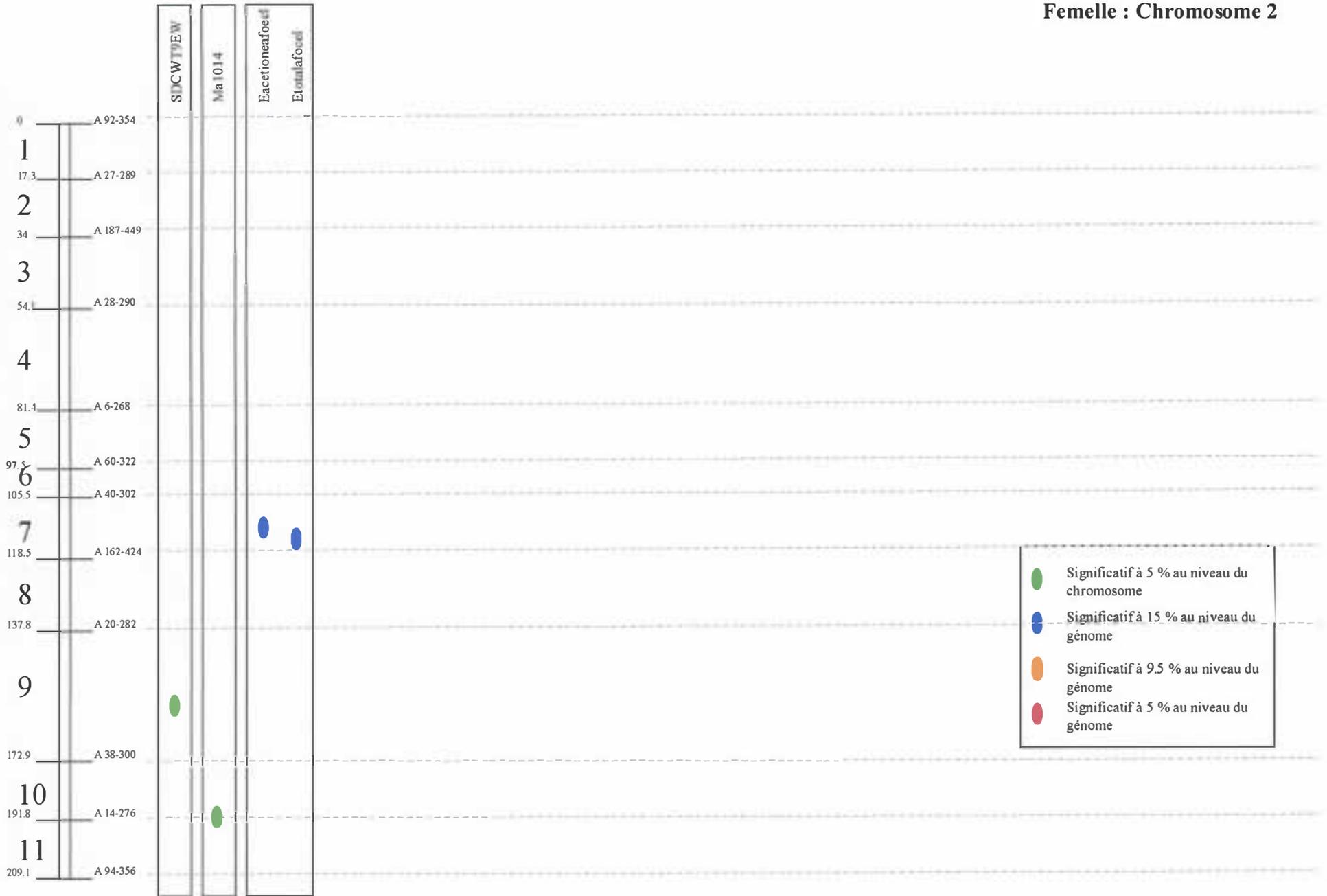
Mâle : Chromosome 2a



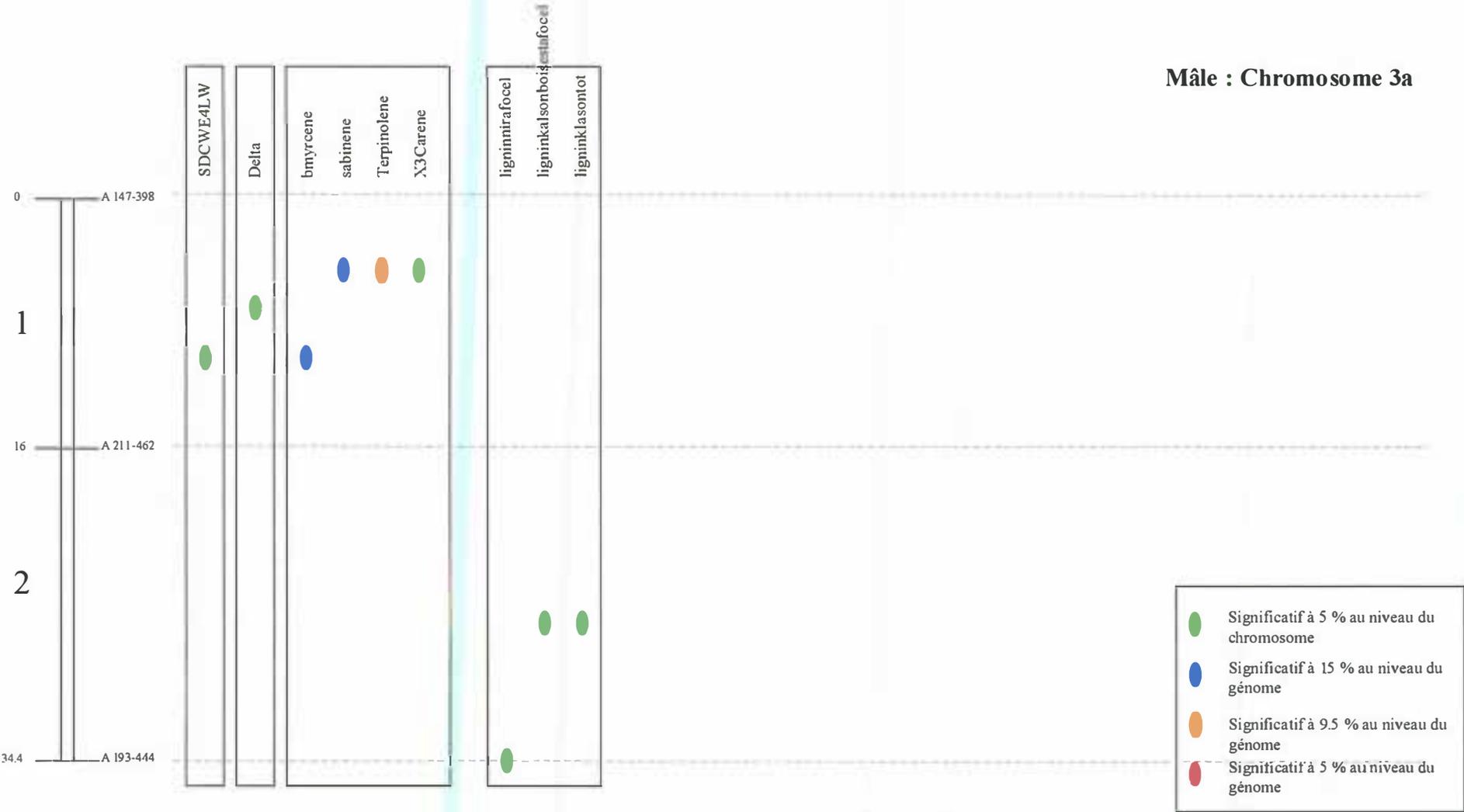
Mâle : Chromosome 2b

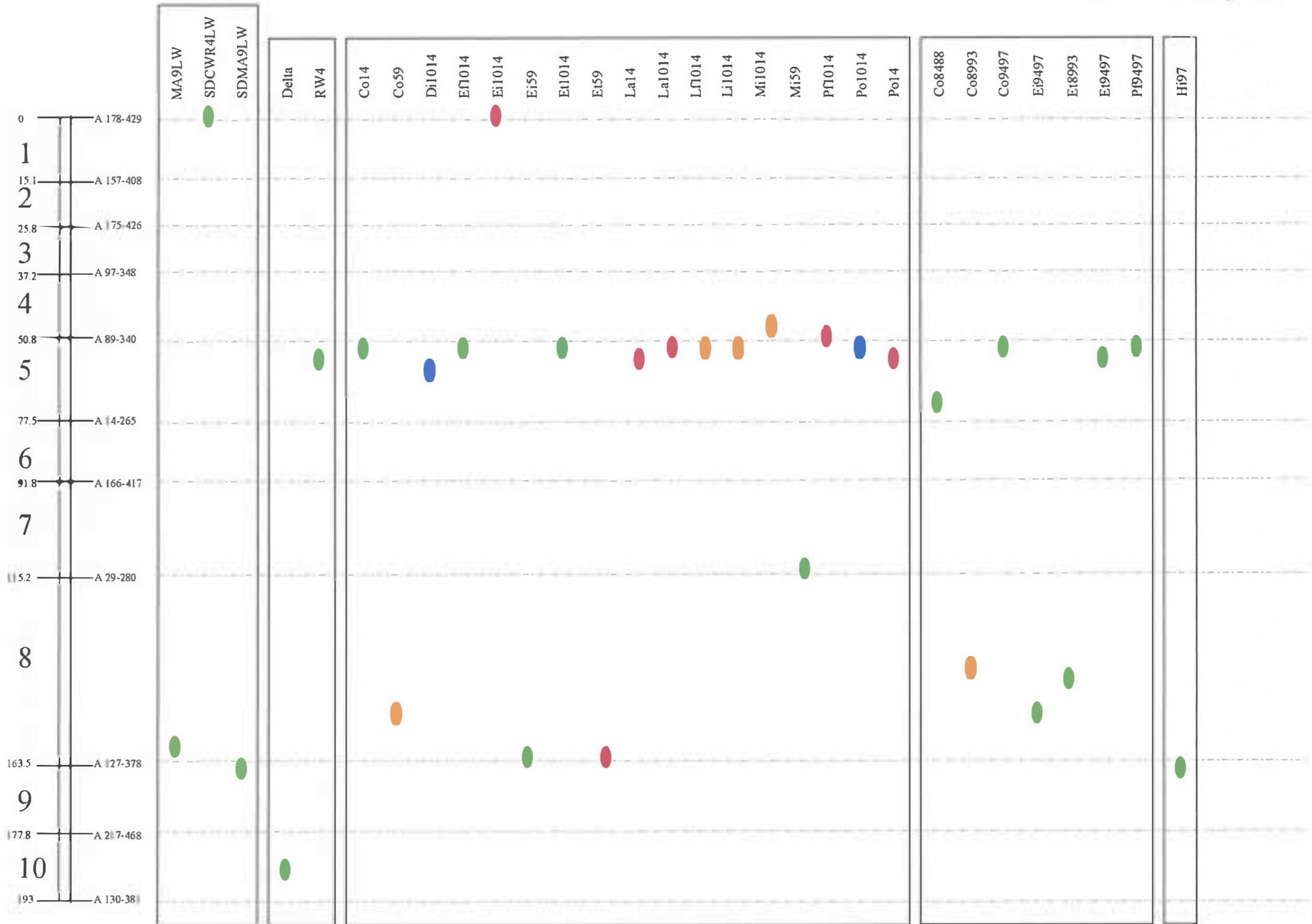


Femelle : Chromosome 2

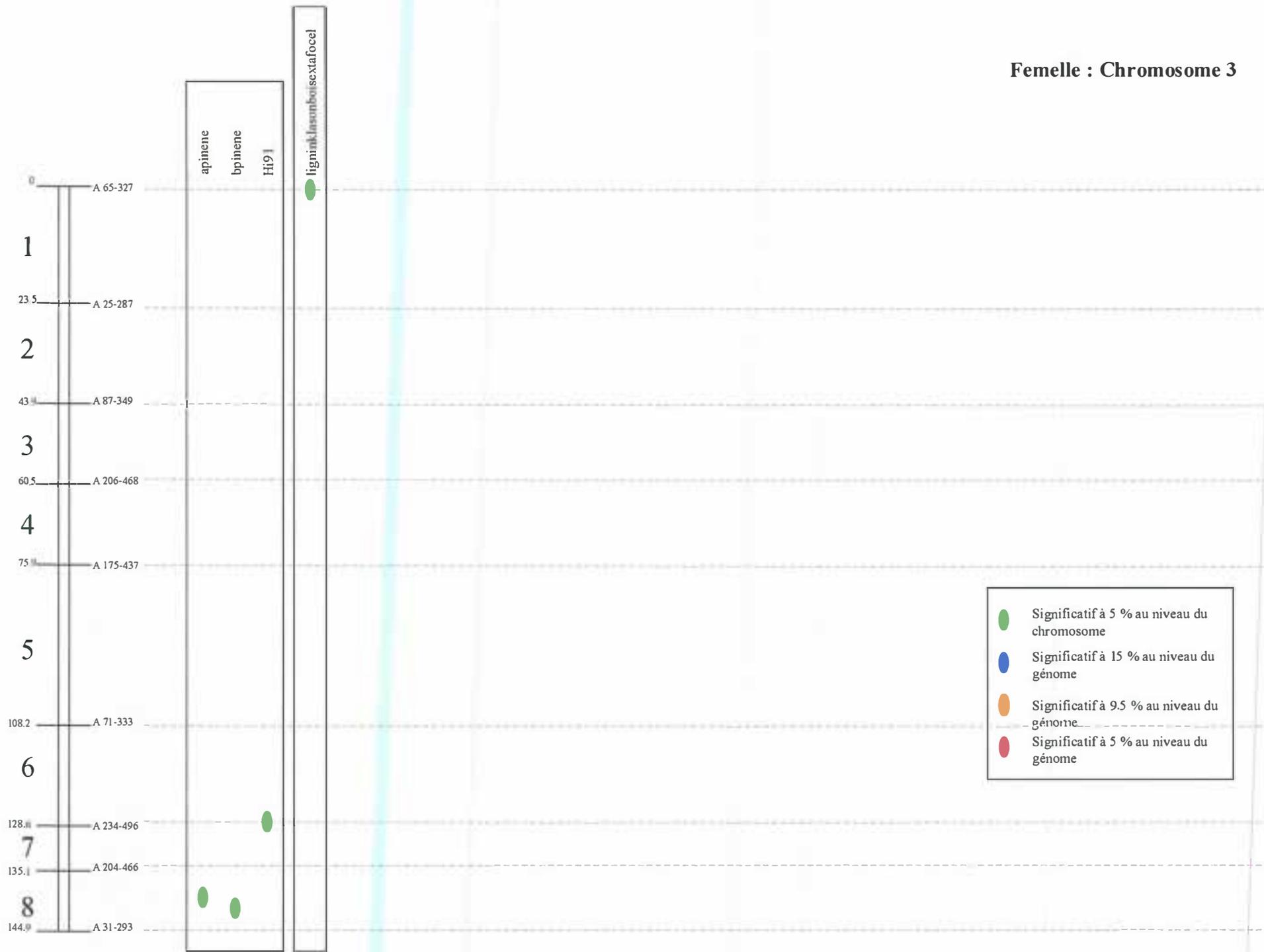


Mâle : Chromosome 3a

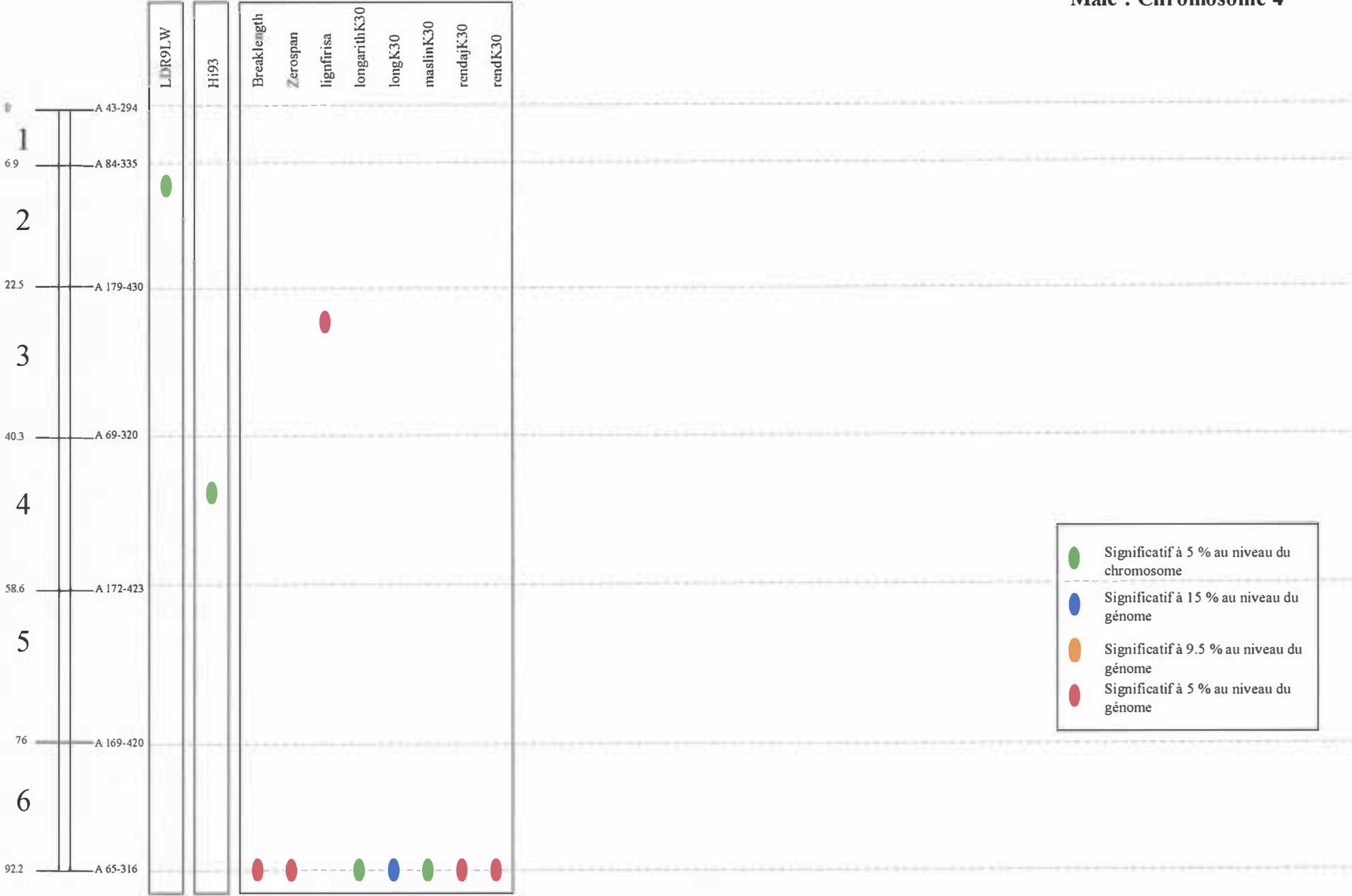




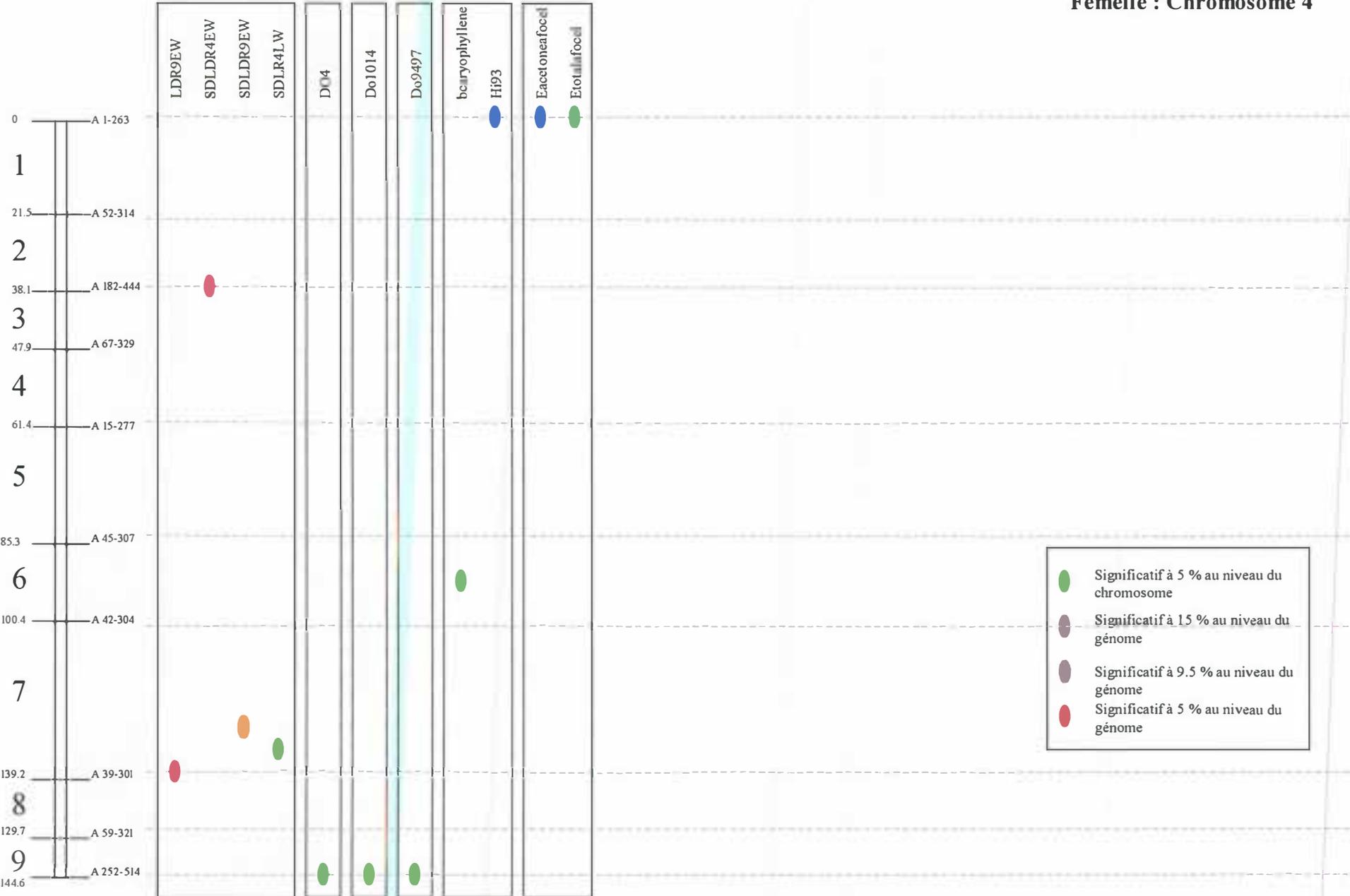
Femelle : Chromosome 3



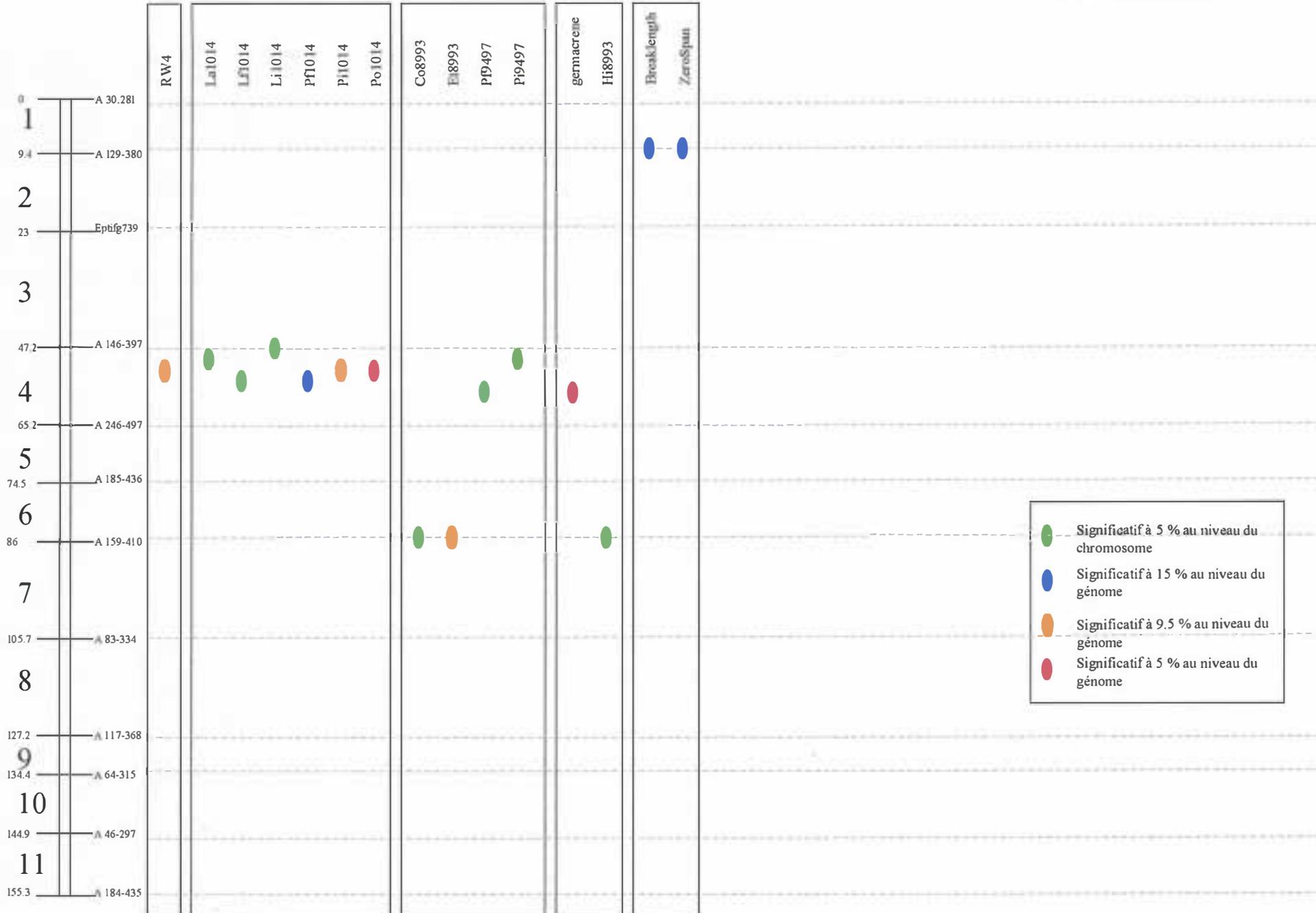
Mâle : Chromosome 4



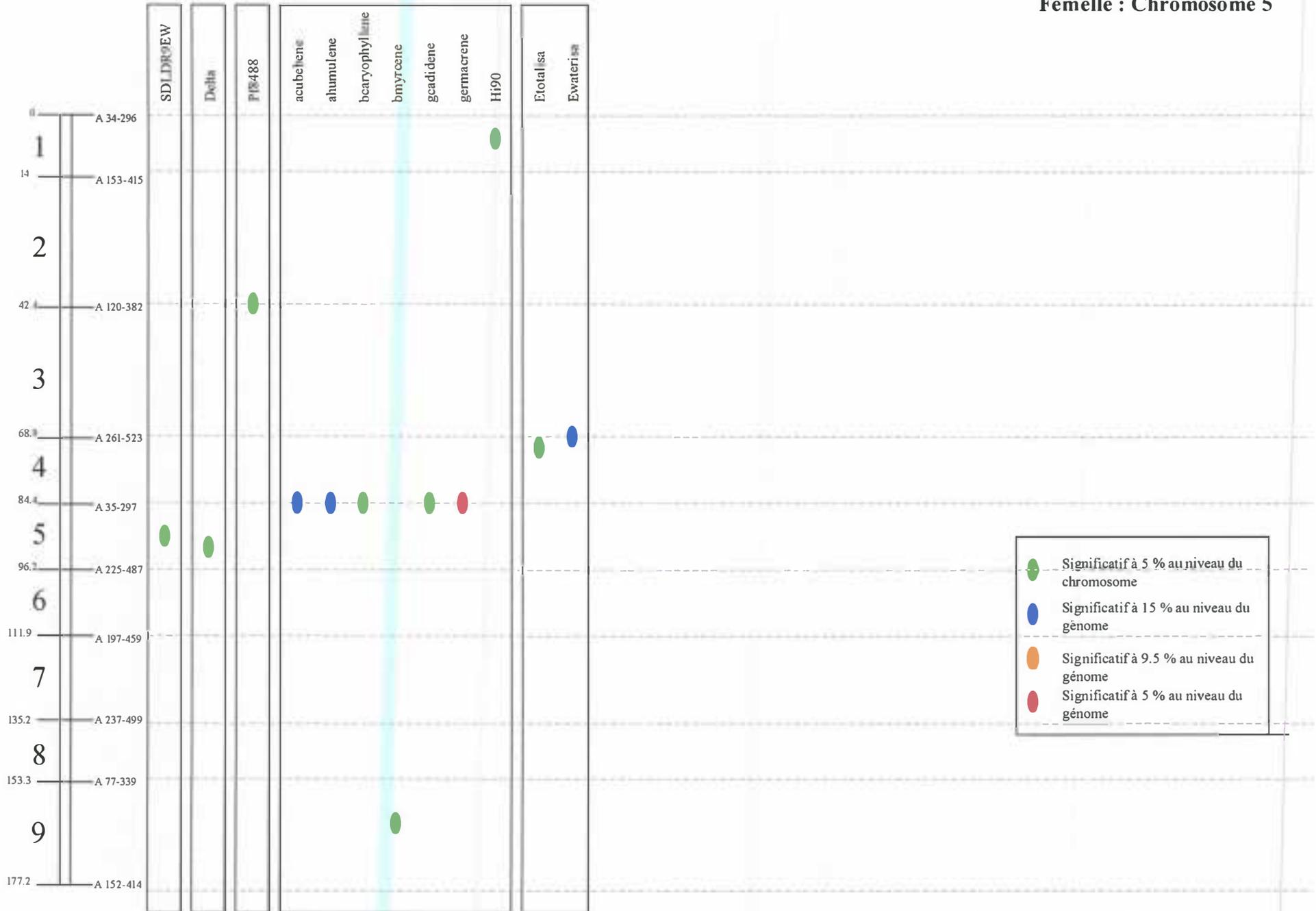
Femelle : Chromosome 4

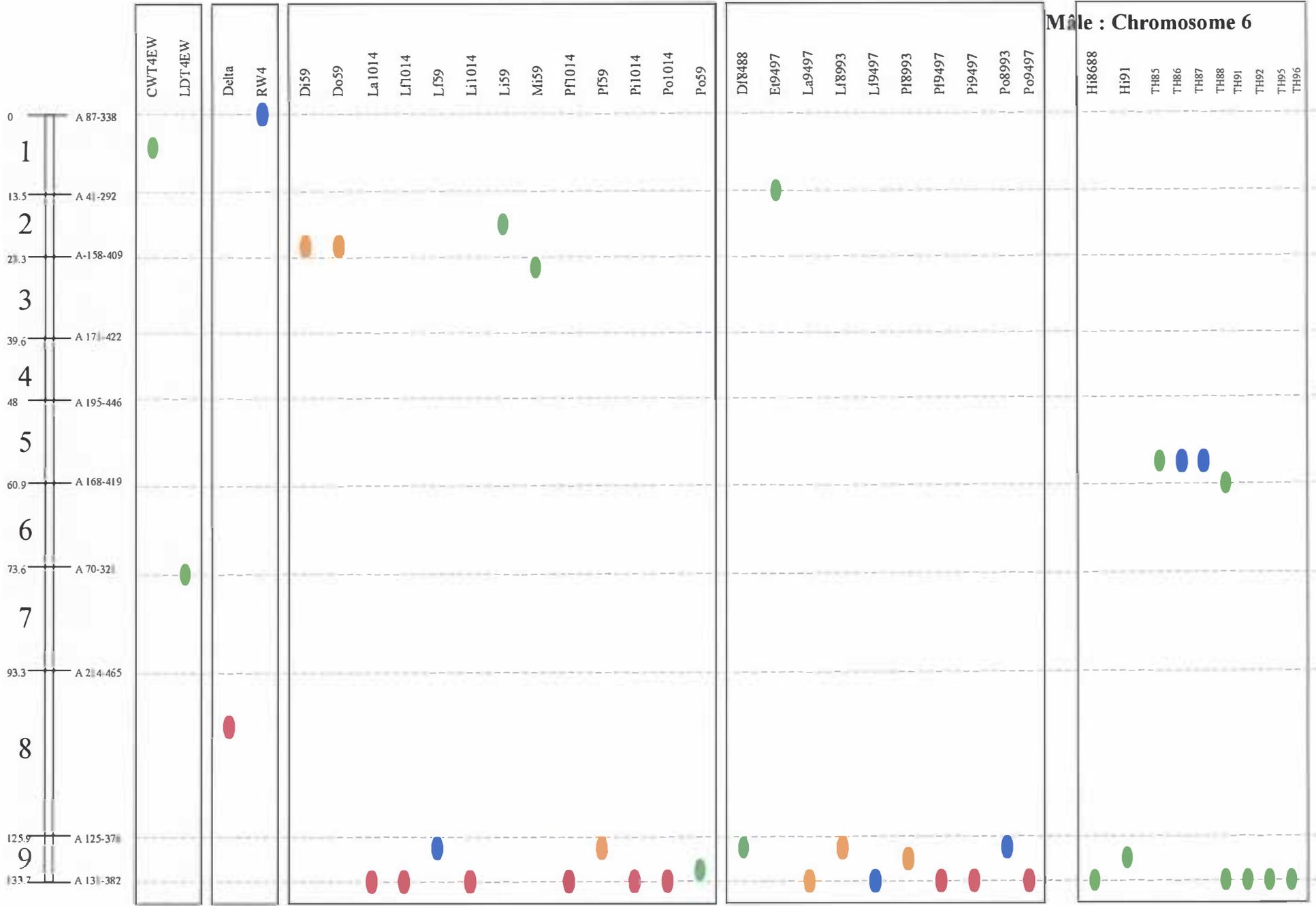


Mâle : Chromosome 5

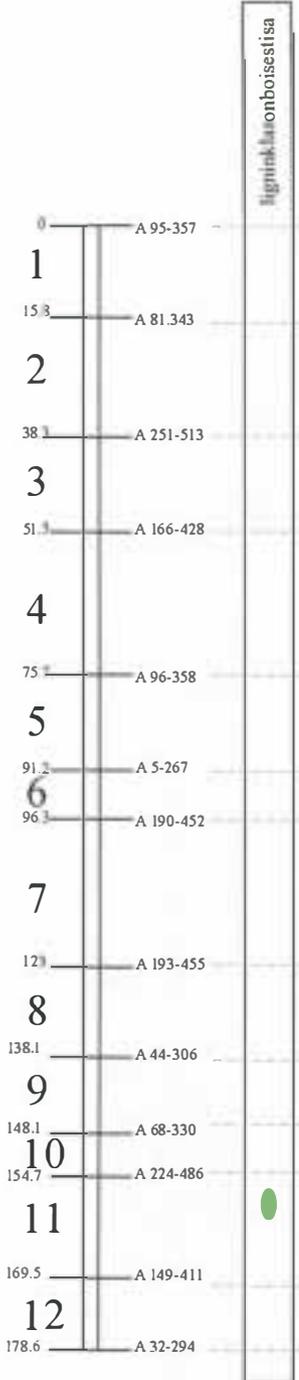


Femelle : Chromosome 5



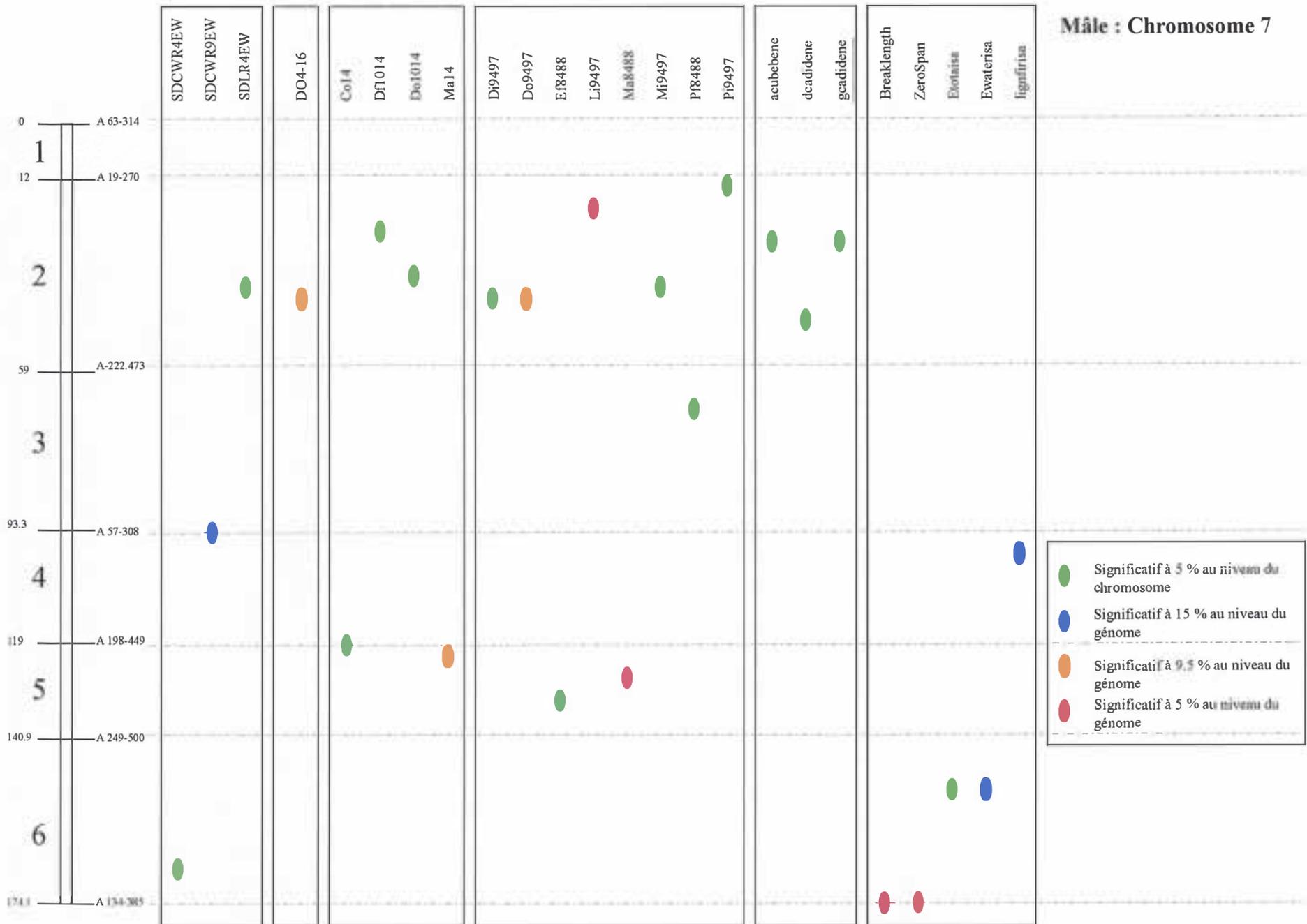


Femelle : Chromosome 6

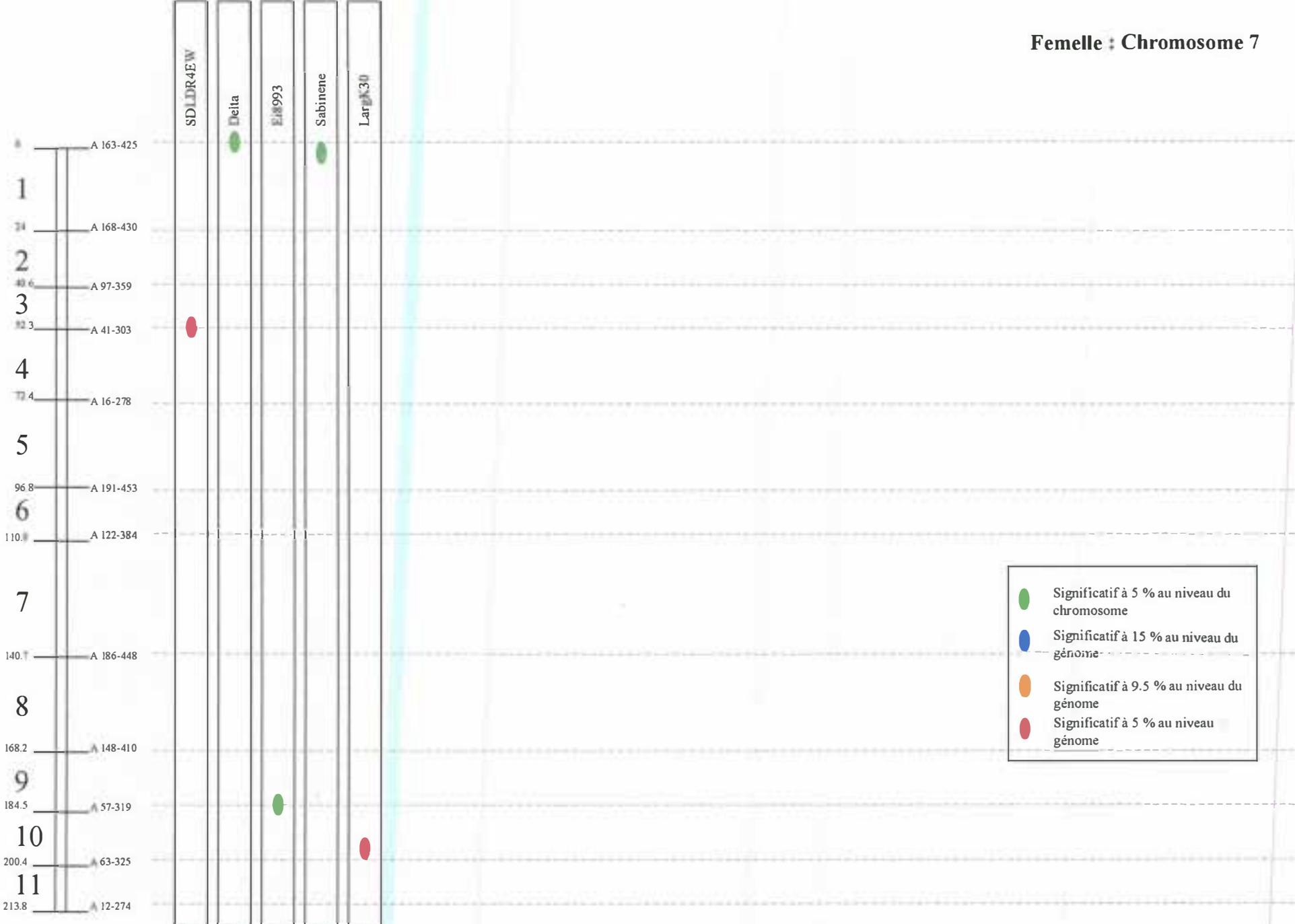


	Significatif à 5 % au niveau du chromosome
	Significatif à 15 % au niveau du génome
	Significatif à 9.5 % au niveau du génome
	Significatif à 5 % au niveau du génome

Mâle : Chromosome 7

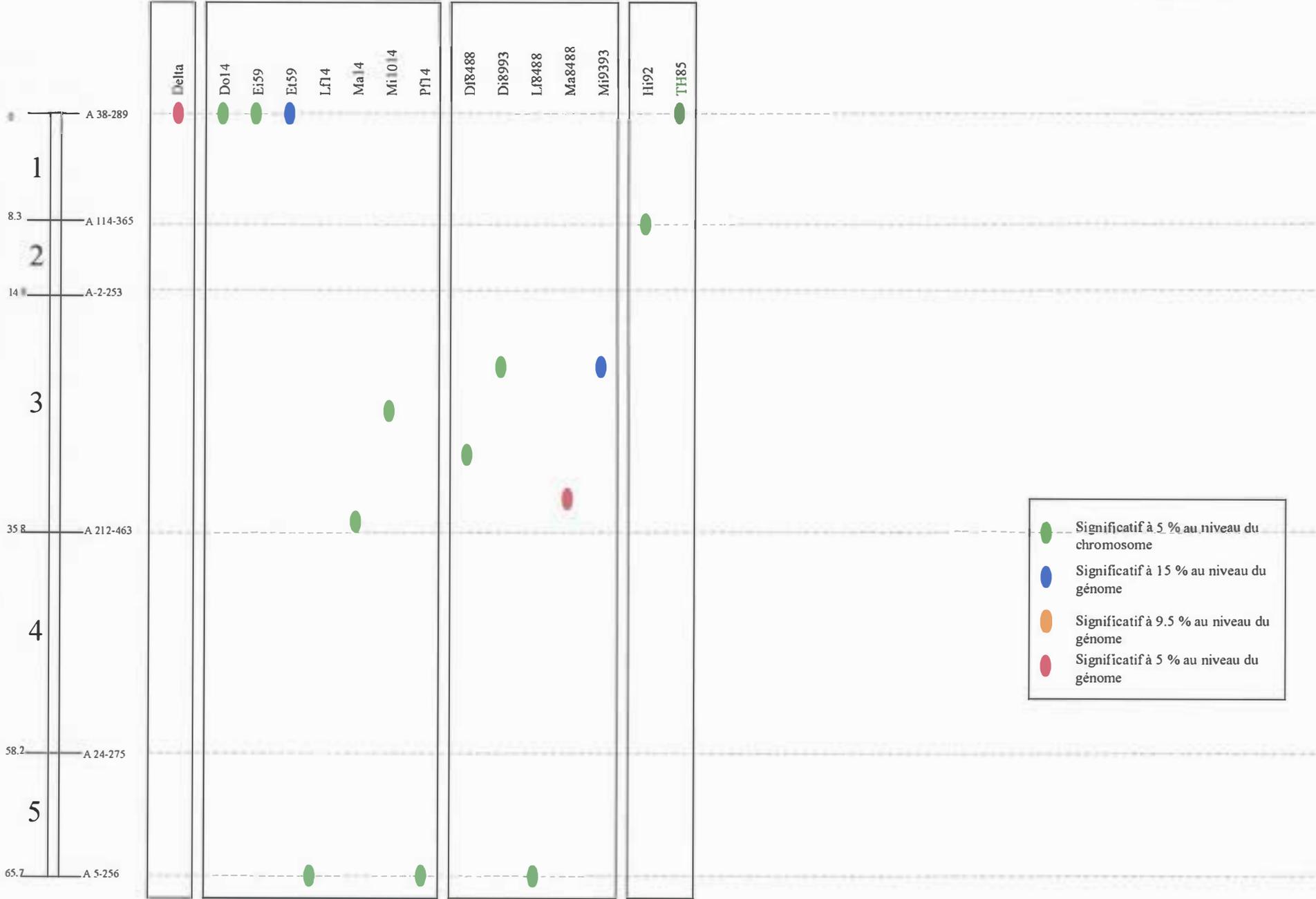


Femelle : Chromosome 7

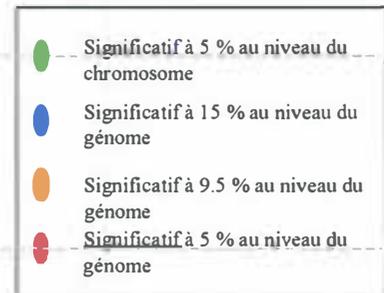
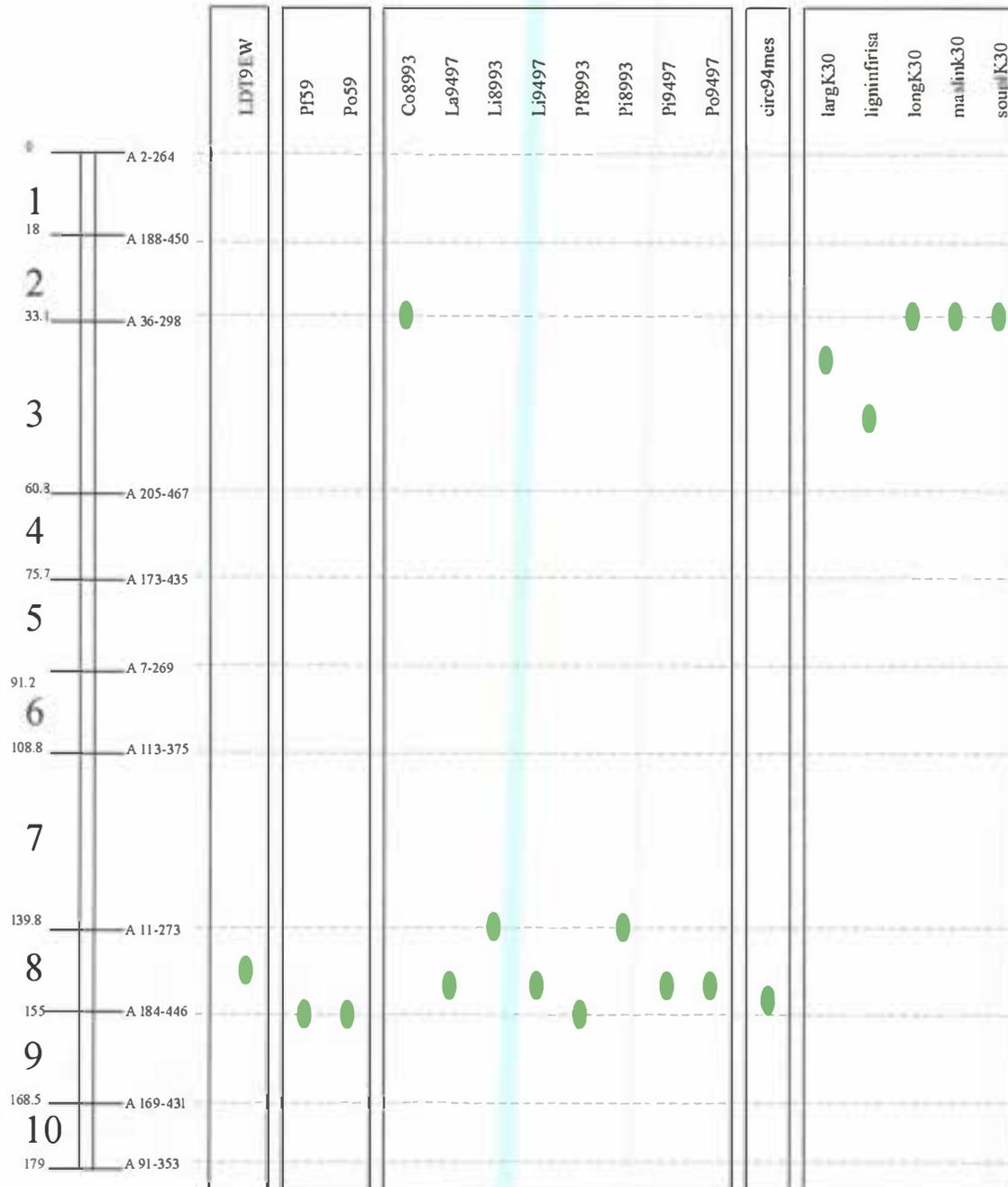


- Significatif à 5 % au niveau du chromosome
- Significatif à 15 % au niveau du génome
- Significatif à 9.5 % au niveau du génome
- Significatif à 5 % au niveau du génome

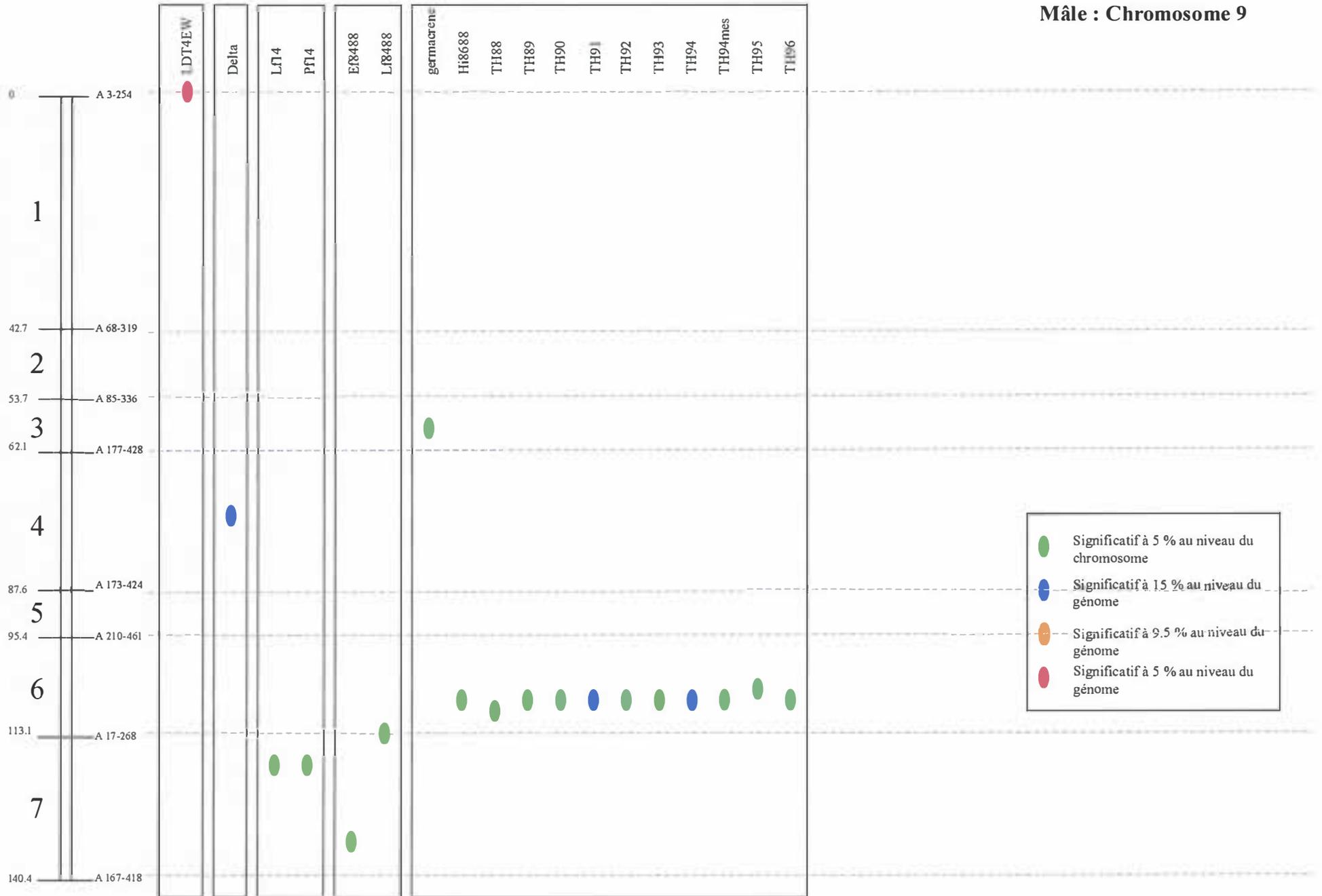
Mâle : Chromosome 8



Femelle : Chromosome 8



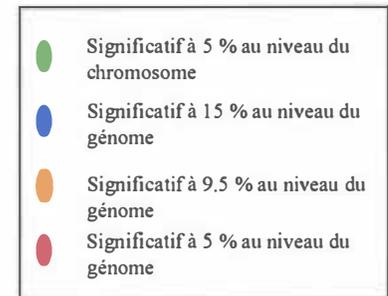
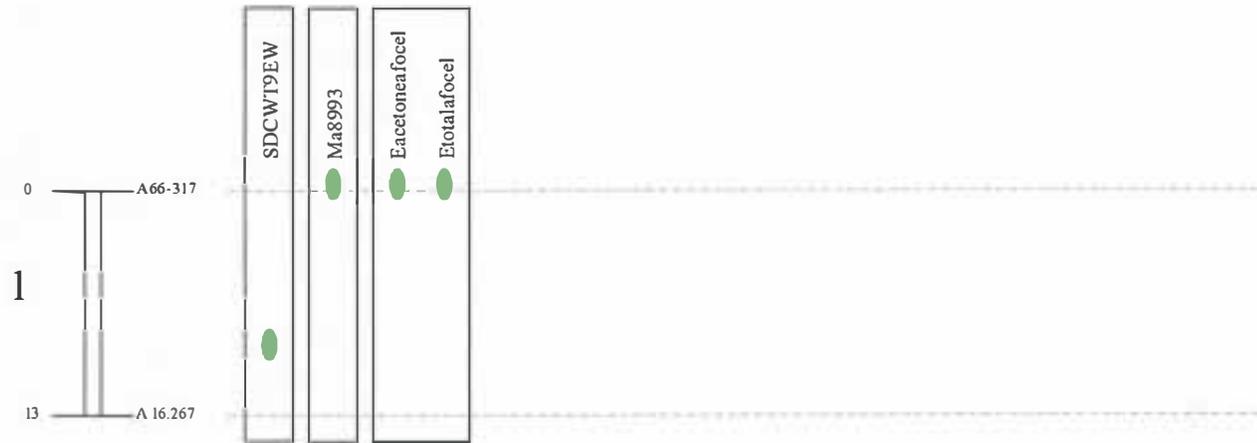
Mâle : Chromosome 9



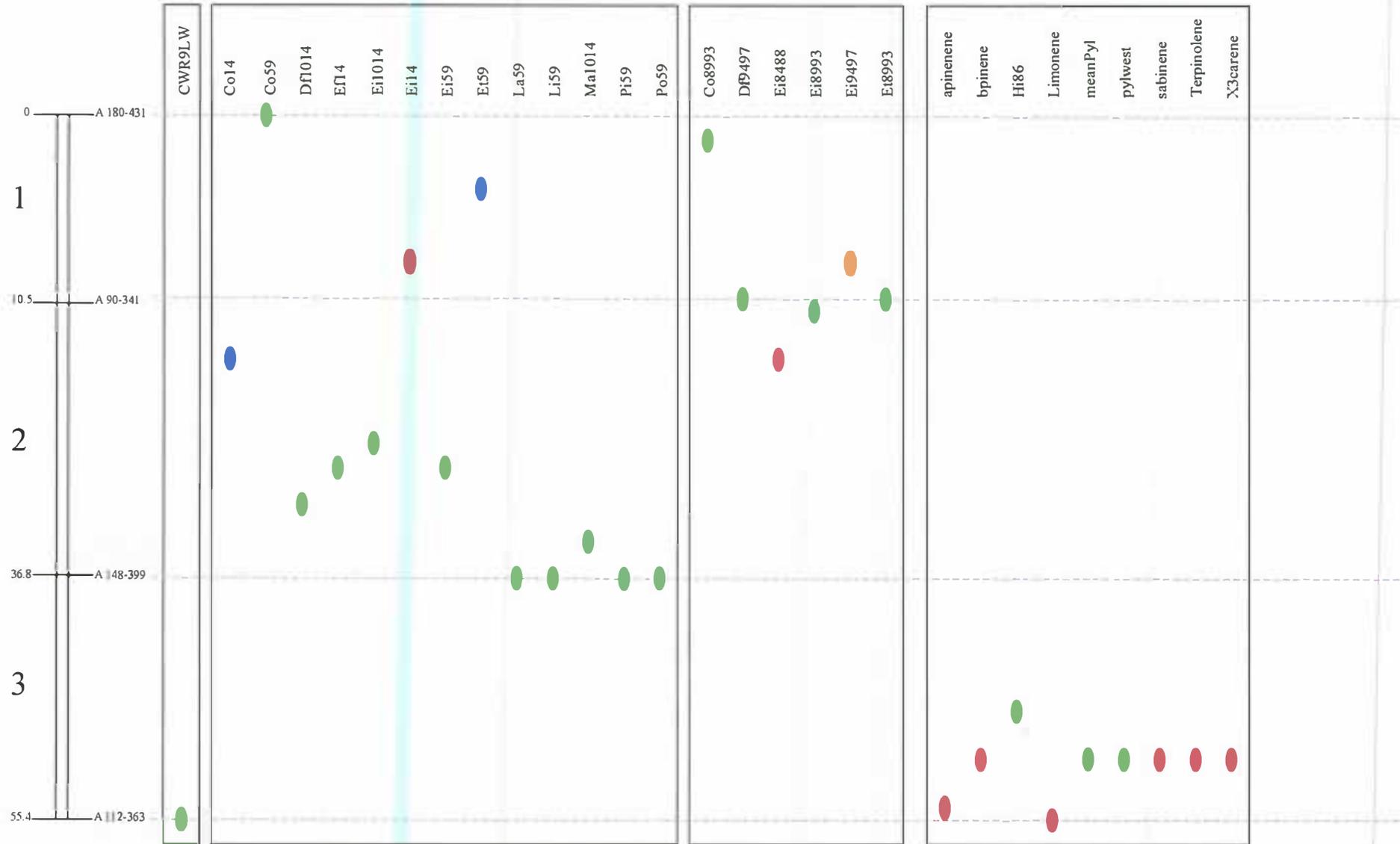
Femelle : Chromosome 9



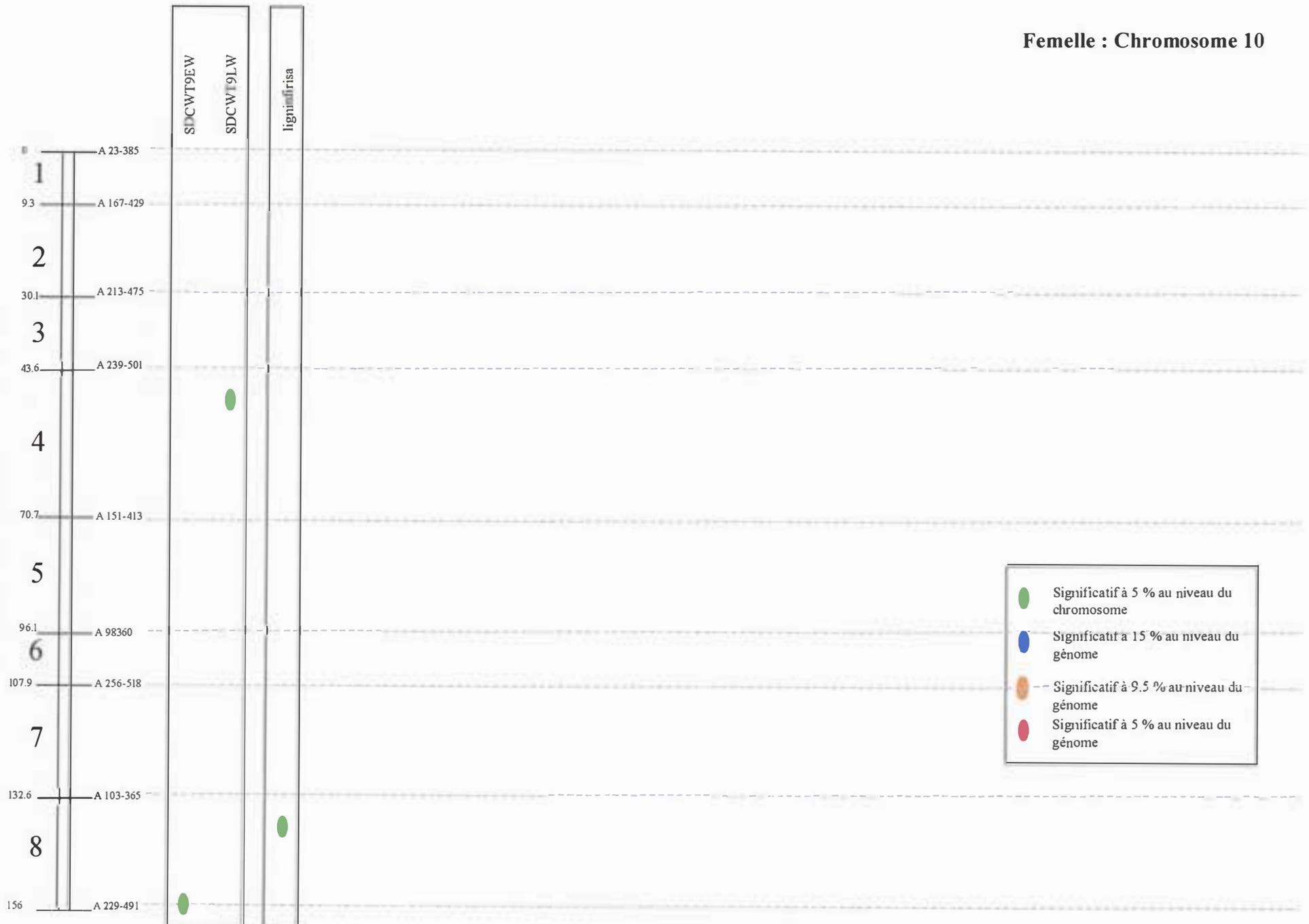
Mâle : Chromosome 10a



Mâle : Chromosome 10b



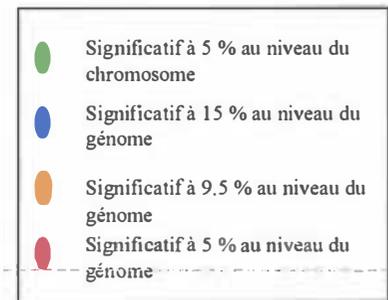
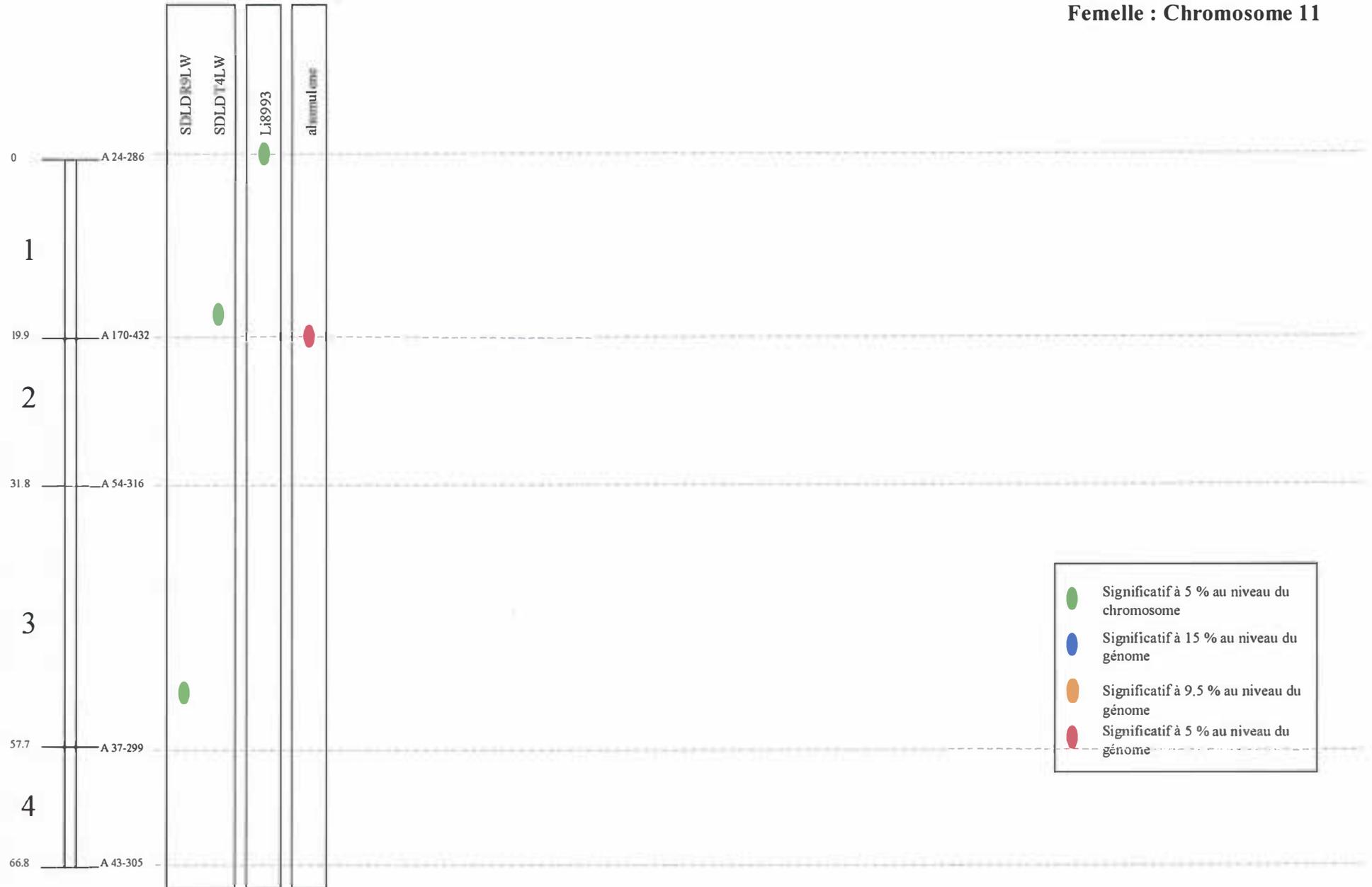
Femelle : Chromosome 10



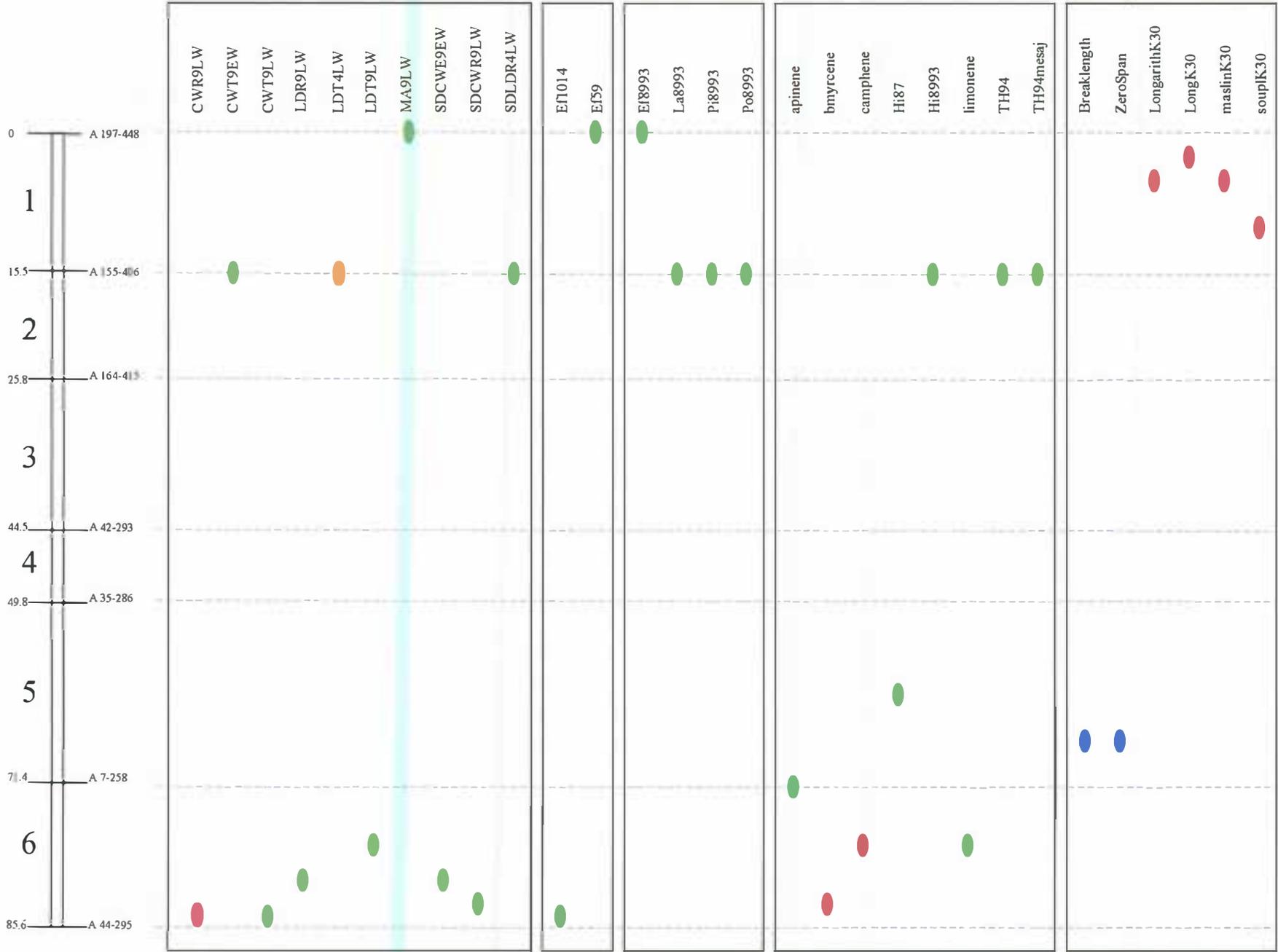
Mâle : Chromosome 11



Femelle : Chromosome 11



Mâle : Chromosome 12



Femelle : Chromosome 12

