



Classification du Mélèze d'Europe

Norme et structure en bois

Rapport final

Opération n°97/14497 00

Centre technique du bois et de l'ameublement

Allée de Boutaut
BP 227
33028 BORDEAUX (France)
Tél. 33-05-56-43-63-00
Fax 33-05-56-43-64-80
Site Internet : www.ctba.fr

Avril 2000

Classification du Mélèze d'Europe

Norme et structure en bois

Rapport final

Opération n°97/14497 00

Recherche financée par :

- Le centre Technique du Bois et de l'Ameublement,
- L'union européenne,
- La région Provence-Alpes-Côte-d'Azur,
- Le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche,

Programme réalisé par :

- Le centre Technique du Bois et de l'Ameublement,

En collaboration avec :

- L'Office National des Forêts,
- Le Centre Régional de la Propriété Forestière de PACA,
- FIBOIS 05,
- IFN.

Remerciements

Nous remercions l'ensemble des partenaires ayant collaboré dans l'organisation de cette étude et plus particulièrement :

- FIBOIS 05 (interprofession de la filière bois des Hautes-Alpes),
qui est à l'initiative de cette étude.

- l'ONF des Alpes de Haute Provence, des Hautes-Alpes et des Alpes-Maritimes,
- LE CRPF de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur,
pour leur participation à l'échantillonnage.

- La scierie Guirand de Villars-Colmars (Alpes de Haute-Provence),
- Les ateliers de l'APAJH à Saint Seurin (Gironde),
- Les transports : Marchesseau (Gironde) et SCETA (Oise)
pour le sciage, le rabotage et le transport des échantillons.

- L'inventaire forestier national,
pour les informations provenant de sa base de données nationale.

- L'équipe de Scanwood System,
Pour l'adaptation de la machine de vision LCSX au Mélèze afin d'en caractériser les avivés.

- L'équipe du CTBA,
 - Frédéric Rouger
 - Didier Reuling
 - Jean-Denis Lanvin
 - Patrick Joyet
 - Jean-luc Guillot
 - Joël Godard
 - Remy Cholat
 - Romuald Chatelu
 - Hervé Bakirdjian*pour la réalisation de l'étude.*

Table des matières

Liste des abréviations	5
1 L'essentiel sur le Mélèze d'Europe	6
1.1 Importance du massif français de Mélèze d'Europe.....	6
1.1.1 La ressource nationale	6
1.1.2 Le Mélèze d'Europe en Provence-Alpes-Côte-d'Azur	9
1.2 Caractéristiques de l'échantillon et représentativité de la ressource	9
1.2.1 Critères de sélection de l'échantillon	9
1.2.2 Représentativité de la ressource	10
1.3 Vue d'ensemble des essais	11
1.3.1 Propriétés anatomiques et morphologiques des arbres prélevés	11
1.3.2 Propriétés physiques et mécaniques	11
1.3.3 Classement optimal après destruction des avivés.....	12
1.3.4 Simulation du classement "structure" des avivés	12
2 Contexte des études sur les bois français.....	14
3 Contexte de la normalisation.....	16
3.1 Les normes de calcul	16
3.2 Les normes produits.....	16
3.2.1 La norme EN 338.....	16
3.2.2 La norme EN 518.....	16
3.2.3 La norme EN 519.....	16
3.2.4 La norme EN 1912	16
3.2.5 La norme NF B 52-001	17
4 Objectifs et méthodologie de l'étude.....	18
4.1 Objectifs.....	18
4.2 Méthodologie	18
5 Le Mélèze d'Europe : essence, échantillon et sylviculture.....	20
5.1 Présentation générale de l'essence.....	20
5.1.1 Dénomination	20
5.1.2 Description de l'arbre	20
5.1.3 Aspect du bois	21
5.1.4 Aire de répartition.....	21
5.1.5 Durabilité	21
5.2 Principe d'échantillonnage.....	21
5.2.1 Cadre de l'échantillonnage.....	21
5.2.2 Mise en œuvre du plan d'échantillonnage	21
5.2.3 Critères de sélection placette et arbres	22
5.3 Caractéristiques de l'échantillon.....	25
5.3.1 Les conditions de croissance	25
5.3.2 Les caractéristiques sylvicoles des parcelles échantillonnées.....	26
5.3.3 Les caractéristiques des arbres échantillonnés.....	26
5.3.4 Quelques données dendrométriques	27
5.4 La transformation	29

6 Données expérimentales.....	30
6.1 Type de mesures réalisées	30
6.1.1 Caractéristiques morphologiques et anatomiques.....	30
6.1.2 Caractéristiques physiques et mécaniques	30
6.2 Caractéristiques morphologiques et anatomiques.....	31
6.2.1 Les caractéristiques globales	31
6.2.2 Les variations suivant l'âge	32
6.3 Essais sur pièces en dimensions commerciales.....	34
6.3.1 Echantillonnage	34
6.3.2 Résultats d'essais	34
6.3.3 Corrélation entre les différents résultats obtenus	40
6.4 Essais sur éprouvettes sans défauts (éprouvettes de qualification)	41
7 Sylviculture et propriétés mécaniques	42
7.1 Caractéristiques physiques moyennes des placettes	42
7.2 Corrélation entre propriétés mécaniques et arbres sur pied	42
8 Les classements	45
8.1 Le classement visuel (norme française NF B 52-001).....	45
8.2 Le classement structure par machine (norme européenne EN 519).....	47
8.3 Interaction classement optimal, visuel et machine	48
Conclusion.....	50
Lexique.....	51
Bibliographie.....	53
Annexe 1 : Le classement structure des bois résineux.....	54
Annexe 2 : Variations des propriétés mécaniques	61
Annexe 3 : Comparatif des principales propriétés de quelques résineux	63
Annexe 4 : Machine de classement Bing	64
Annexe 5 : Machine de classement Stress grader	68
Annexe 6 : Description du densimètre à rayons X.....	70

Table des illustrations

Tableau 1 : Structure de la propriété forestière pour le Mélèze d'Europe (source IFN 1999)...	6
Tableau 2 : Répartition nationale en surface et volume du Mélèze d'Europe (source IFN).....	6
Tableau 3 : Les 7 régions forestières Mélèze d'Europe en région PACA (source IFN 1999) ..	9
Tableau 4 : Prélèvements par régions forestières	10
Tableau 5 : Propriétés anatomiques et morphologiques de l'échantillon	11
Tableau 6 : Résumé de l'échantillonnage.....	11
Tableau 7 : Les valeurs moyennes mécaniques :.....	11
Tableau 8 : Classement optimal	12
Tableau 9 : Classement visuel proposé pour le Mélèze.....	13
Tableau 10 : Répartition des placettes échantillonnées dans les 7 régions forestières	22
Tableau 11 : Répartition des âges en fonction des diamètres à 1,30 m	24
Tableau 12 : Les conditions édaphiques	25
Tableau 13 : Les conditions d'humidité.....	25
Tableau 14 : Les caractéristiques sylvicoles des parcelles échantillonnées	26
Tableau 15 : Principales caractéristiques des placettes de sondage.....	26
Tableau 16 : Caractéristiques anatomiques mesurées sur les rondelles	31
Tableau 17 : Dénombrement des éprouvettes en dimensions commerciales	34
Tableau 18 : Répartition des avivés par hauteur de prélèvement dans l'arbre.....	34
Tableau 19 : Principales propriétés physiques et mécaniques relevées sur les éprouvettes	36
Tableau 20 : Les classes de résistances définies dans la norme EN 338	36
Tableau 21 : Les causes de la rupture des avivés.....	37
Tableau 22 : Les classes structure (norme NF B 52-001) pour le Sapin, Epicéa, Douglas	38
Tableau 23 : Matrice de corrélation entre les propriétés mécaniques et physiques.....	40
Tableau 24 : Résultats d'essai sur petites éprouvettes.....	41
Tableau 25 : Caractéristiques physiques moyennes des placettes échantillonnées	42
Tableau 26 : Matrice de corrélation propriétés mécaniques arbres sur pied.....	43
Tableau 27 : Prédiction des propriétés mécaniques en fonction de données sylvicoles :	44
Tableau 28 : Classement visuel NF B 52-001 (Sapin, Epicéa) et propriétés mécaniques.....	45
Tableau 29 : Interactions classement optimal et visuel NF B 52-001 (Sapin, Epicéa)	46
Tableau 30 : Adaptation des classes structure (norme NF B 52-001) dans le cas du Mélèze	46
Tableau 31 : Classement visuel NF B 52-001 (Mélèze) et propriétés mécaniques classes ST4	46
Tableau 32 : Rappel des rendements du classement optimal	47
Tableau 33 : Rendements du classement machine "Stress grader"	47
Tableau 34 : Rendements du classement machine "Bing" module Timoshenko.....	47
Tableau 35 : Rendements du classement machine "rayon X"	48
Graphique 1 : Courbe de fertilité et répartition des 18 placettes.....	24
Graphique 2 : Statut et branchaison des arbres	27
Graphique 3 : Statut et forme des arbres	27
Graphique 4 : Tarif de cubage des arbres échantillonnés	27
Graphique 5 : Influence de la classe de fertilité sur l'accroissement moyen	28
Graphique 6 : Répartition des circonférences à 1,30 m des arbres échantillonnés	28
Graphique 7 : Répartition des classes de diamètres des billons sciés.....	29
Graphique 8 : Répartition des classes des largeurs de cernes mesurées sur avivés	31
Graphique 9 : Variation de la texture moyenne en fonction de l'âge de formation du bois....	32
Graphique 10 : Evolution de la largeur de cernes en fonction de l'âge de formation du bois	33
Graphique 11 : Variations des propriétés mécaniques en fonction des paramètres sylvicoles	44
Graphique 12 : Rendement classement optimal, visuel proposé et classements machines .	48
Graphique 13 : Rendement des classements sur deux classes (C24-ST II ; C18-ST III).....	49
Figure 1 : Présence du Mélèze d'Europe en France (d'après données IFN).....	8
Figure 2 : Localisation des 18 placettes de l'échantillonnage Mélèze d'Europe	23

Liste des abréviations

Eprouvettes en dimensions commerciales	Abréviations	Unités
longueur	L	mm
hauteur	H	mm
épaisseur	E	mm
largeur de cerne	Acc	mm
humidité	H %	%
Masse	m	kg
masse volumique à 12% d'humidité	MV	kg/m ³
projection de nœuds sur la face	Face	%
projection de nœuds sur la rive	Rive	%
projection de nœuds sur la section (Knot Area Ratio)	KAR	%

Essais en dimensions commerciales	Abréviations	Unités
module d'élasticité local en flexion	MOEL	GPa
module d'élasticité global en flexion	MOEG	GPa
contrainte à la rupture en flexion	MOR	MPa

1 L'essentiel sur le Mélèze d'Europe

1.1 Importance du massif français de Mélèze d'Europe

1.1.1 La ressource nationale

La ressource nationale de Mélèze d'Europe (*Larix decidua* Miller) en France est estimée à 101 294 ha pour un volume approximatif de 16,5M de m³ soit 2% des résineux. Cette ressource est répartie par type de propriété de la manière suivante :

Tableau 1 : Structure de la propriété forestière pour le Mélèze d'Europe (source IFN 1999)

Structure	Surface (%)	Volume (%)
Terrains domaniaux	15%	15%
Terrains communaux	45%	50%
Terrains privés	40%	35%
Total	100%	100%

Ainsi, contrairement à l'ensemble de la forêt française, nous pouvons constater que la forêt de Mélèze d'Europe est en majorité une forêt du domaine public.

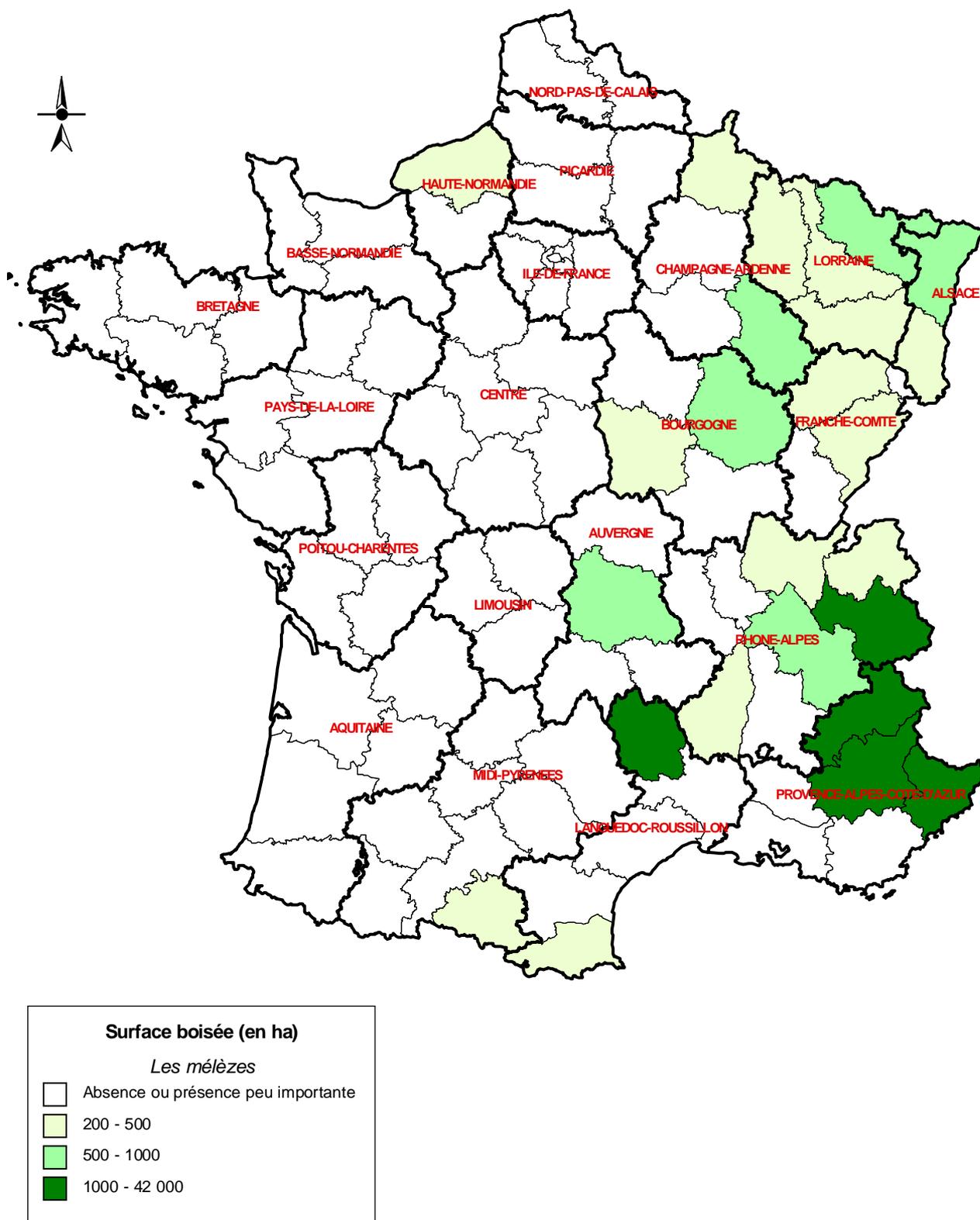
Attention, ces chiffres sont basés sur des données de l'IFN provenant de résultats départementaux relevés à des périodes différentes.

Si le Mélèze d'Europe est représenté dans 49 départements français, une seule région concentre 82% de la surface totale et les trois quarts de la production, il s'agit de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur.

Tableau 2 : Répartition nationale en surface et volume du Mélèze d'Europe (source IFN)

Les régions	Surface boisée		Volume sur pied	
	en ha	%	en m ³	%
Provence-Alpes-Côte-d'Azur	82 776	81,7%	12 440 875	75,2%
Rhône Alpes	7 054	7,0%	1 295 340	7,8%
Languedoc Roussillon	1 779	1,8%	224 948	1,4%
Lorraine	1 761	1,7%	384 386	2,3%
Alsace	1 087	1,1%	349 764	2,1%
Champagne Ardennes	1 375	1,4%	102 256	0,6%
Franche Comté	1 161	1,1%	89 612	0,5%
Bourgogne	1 579	1,6%	131 055	0,8%
Auvergne	887	0,9%	269 853	1,6%
Midi-Pyrénées	667	0,7%	100 878	0,6%
Haute Normandie	455	0,4%	109 790	0,7%
Autres	713	0,7%	1 052 033	6,4%
Total	101 294	100,0%	16 550 790	100,0%

Figure 1 : Présence du Mélèze d'Europe en France (d'après données IFN)



1.1.2 Le Mélèze d'Europe en Provence-Alpes-Côte-d'Azur

En Provence-Alpes-Côte-d'Azur, le Mélèze d'Europe est situé principalement en altitude, à partir de 1200 mètres jusqu'à la limite de la végétation forestière vers 2400 mètres. Il se répartit principalement sur les 7 régions forestières suivantes :

Tableau 3 : Les 7 régions forestières Mélèze d'Europe en région PACA (source IFN 1999)

Les régions forestières	Surface boisée (ha)	% de surface	Volume sur pied (m³)	% du volume	Accroissement courant (m³/an)	Accroissement courant (m³/ha/an)
Région IFN n°041, "Ubaye":	9 779	15 %	1 243 550	12 %	27 941	2.9
Région IFN n°042, " Haut Verdon et Haute Bléone"	8 596	13 %	1 311 750	13 %	29 163	3.4
Région IFN n°051, "Briançonnais":	11 839	19 %	1 712 077	17 %	35 434	3.0
Région IFN n°052, "Queyras" :	10 037	16 %	1 659 612	17 %	36 452	3.6
Région IFN n°053, "Embrunais" :	10 614	17 %	1 994 916	20 %	42 837	4.0
Région IFN n°054, "Champsaur" :	4 667	7 %.	769 129	8 %	19 766	4.2
Région IFN n°061, "Haute Tinée" :	8 230	13 %	1 308 883	13 %	28 759	3.5
Total sur la région PACA	63 762	100 %	9 999 917	100 %	220 352	3.5

1.2 Caractéristiques de l'échantillon et représentativité de la ressource

18 placettes ont été sélectionnées et 160 arbres échantillonnés dans les différentes régions forestières définies par l'IFN.

1.2.1 Critères de sélection de l'échantillon

L'échantillonnage est de type "arbre" : l'origine exacte des éprouvettes est connue.

Le plan d'échantillonnage est stratifié selon :

- Les diamètres : de 35 à 50 cm de diamètre à 1.30m
- Les classes de fertilité : 2 classes adaptées à la région et à l'essence
- La répartition géographique : prélèvement au sein de sept régions forestières (de la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur) où le Mélèze d'Europe est le plus représenté :
 - ✓ Le Briançonnais
 - ✓ L'embrunais
 - ✓ Le Queyras
 - ✓ L'Ubaye
 - ✓ Le Haut Verdon et haute Bléone
 - ✓ La Haute Tinée
 - ✓ Le Champsaur

1.2.2 Représentativité de la ressource

- Les prélèvements en volume sur pied par région se répartissent de la manière suivante :

Tableau 4 : Prélèvements par régions forestières

Les régions	Volume sur pied échantillonné (m ³)	% du volume échantillonné par région	% du volume réel par région
Région IFN n°041, "Ubaye"	19	9 %	12 %
Région IFN n°042, " Haut Verdon et Haute Bléone"	35	17 %	13 %
Région IFN n°051, "Briançonnais"	39	18 %	17 %
Région IFN n°052, "Queyras"	26	12 %	17 %
Région IFN n°053, "Embrunais"	43	20 %	20 %
Région IFN n°054, "Champsaur"	14	7 %	8 %
Région IFN n°061, "Haute Tinée"	36	17 %	13 %
Total sur la région PACA	212	100 %	100 %

On peut constater que la proportionnalité par région forestière a été respectée.

↳ Altitude des placettes : de 1400 à 2100 m

L'aire naturelle de répartition du mélèze d'Europe en France est située de 1000 à 2300 m d'altitude. Donc les altitudes des placettes de prélèvement représentent bien la gamme d'altitude du mélèze d'Europe.

↳ Densité du peuplement au moment du prélèvement : de 160 à 700 tiges/ha

L'IFN établit à 382 tiges/ha la densité moyenne des peuplements de Mélèze d'Europe sur la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur.

↳ Age des peuplements au moment du prélèvement : de 73 à 245 ans pour les classes de diamètre à 1.30m de 35 à 50 cm

L'échantillonnage réalisé ne respecte pas la répartition des classes d'âge ni celles des classes de diamètre de la ressource globale mesurée par l'IFN mais elle respecte la répartition des volumes sur pied présentant des diamètres sciabiles.

1.3 Vue d'ensemble des essais

1.3.1 Propriétés anatomiques et morphologiques des arbres prélevés

La ressource adulte de Mélèze d'Europe a des cernes d'accroissement très faible liés au milieu montagnard où il croit. Sa texture est forte en comparaison des autres essences résineuses tels que l'Epicéa et le Sapin, ce qui lui confère des propriétés mécaniques très bonnes (notamment la résistance à la rupture).

Tableau 5 : Propriétés anatomiques et morphologiques de l'échantillon

158 arbres	Moyenne	Ecart type	CV	Min	Max
Age à la souche (ans)	160	48	30%	76	276
Circonférence à 1,30m (cm)	118	16	14%	88	168
Texture (%)	37	11	30%	7	77
Largeur de cernes (mm)	1,4	0,5	36%	0,7	3,2

1.3.2 Propriétés physiques et mécaniques

- Echantillons tirés de 160 arbres issus de 18 placettes.
- 1 section sciée
- 1820 résultats de flexion.
- 34 résultats d'éprouvettes de qualification (éprouvettes sans défauts)

Tableau 6 : Résumé de l'échantillonnage

Nombre d'arbres	Arbres sains	Nombre de billons	Nombre d'avivés
160	158	667	1982

Tableau 7 : Les valeurs moyennes mécaniques :

Variables	Moyenne	écart type	Min	Max	Nb de pièces
MV à 12% (kg/m ³)	591	50	449	765	1576
Face (%)	40	18	0	97	1441
Rive (%)	39	28	0	100	1441
KAR (%)	36	17	0	95	1441
Acc (mm)	1,3	0,6	0,5	4,9	1820
MOEG 12 % (GPa)	10,1	1,9	4,6	16,5	1576
MOEL 12 % (GPa)	10,9	2,3	4,3	21,3	1576
MOR (MPa)	50,0	17,5	13,5	112,8	1576

Ce qu'il faut en retenir :

- Largeur des cernes faible : aucune pièce > 5 mm
- Module d'élasticité (MOEL à 12%) : 30 % des pièces > 12 GPa
- Contrainte à la rupture (MOR) : 87 % des pièces > 30 MPa
- Masse volumique à 12% (MV) : 100 % des pièces > 380 kg/m³
- Projection de nœuds sur les faces : 55% des pièces > 50 mm
- Projection de nœuds sur les rives : 9% des pièces > 40 mm

Les propriétés mécaniques du Mélèze d'Europe sont très intéressantes, seul le module d'élasticité peut être un critère discriminant dans le choix des pièces en fonction des différentes utilisations dans la construction. L'aspect des avivés Mélèze est fortement nouveau ce qui implique une faible corrélation entre les nœuds et les propriétés mécaniques.

1.3.3 Classement optimal après destruction des avivés

Après destruction des avivés, le potentiel mécanique de chaque pièce est connu. D'après ce potentiel, si les pièces de Mélèze d'Europe étaient classées suivant les critères mécaniques définis dans la norme EN 338, les rendements seraient les suivants :

Tableau 8 : Classement optimal

Les classes	MOR <i>(fractile à 5%)</i>	MOEL <i>(moyenne)</i>	MV <i>(fractile à 5%)</i>	Nombre de pièces	Les rendements
C 30	32	12,0	527	961	61%
C 18	22	9,0	504	552	35%
Rejet	17	6,7	505	63	4%
Total (*)				1576	100%

() Seuls les résultats des pièces ayant cassé dans le tiers central ont été pris en compte, les résultats s'entendent à une humidité normalisée de 12%*

1.3.4 Simulation du classement "structure" des avivés

(selon la norme NF B 52-001 de 1998)

Si les pièces de Mélèze d'Europe étaient classées suivant la norme NF B 52-001 sur la base des critères visuels proposés pour cette essence, les rendements seraient les suivants :

Tableau 9 : Classement visuel proposé pour le Mélèze

Les classes	MOR <i>(fractile à 5%)</i>	MOEL <i>(moyenne)</i>	MV <i>(fractile à 5%)</i>	Nombre De pièces	Les Rendements
ST-I	30 <i>(admis 30)</i>	12,2 <i>(admis 12)</i>	517 <i>(admis 380)</i>	178	13%
ST-II	26 <i>(admis 24)</i>	11,0 <i>(admis 11)</i>	521 <i>(admis 350)</i>	709	49%
ST-III	24 <i>(admis 18)</i>	10,6 <i>(admis 9)</i>	502 <i>(admis 320)</i>	237	16%
Rejet	23	9,9	504	315	22%
Total				1439	100%

2 Contexte des études sur les bois français

La forêt française, en croissance depuis la fin du XIX^{ème} siècle, connaît une forte expansion depuis 1950. Aujourd'hui, l'accroissement annuel moyen sur écorce est de 69,5 millions de m³ (source IFN, juin 1992) dont 31,4 millions de m³ pour les conifères, soit un taux d'accroissement de 4,5% contre 3,5% pour les feuillus. La récolte des bois commercialisés représente environ 35 millions de m³ pour 50 consommés.

L'utilisation en structure (charpente traditionnelle, fermette, lamellé-collé et ossature) constitue l'un des débouchés les plus valorisants pour la plupart des essences résineuses. Le poids de ce secteur de marché s'élève à environ à 1,3 milliards de francs et représente en volume près de 30 % de la consommation totale annuelle de bois en France. Vendre pour une utilisation en structure un sciage destiné antérieurement à la trituration permet de le commercialiser à un prix supérieur de 30 à 50 %.

C'est pourquoi le CTBA a développé depuis 1984 une politique d'envergure nationale sur le potentiel des bois français en vue de leur valorisation en structure. Cette valorisation passe par une connaissance précise des caractéristiques technologiques et notamment mécaniques du matériau.

Cette nécessité de mieux connaître les caractéristiques technologiques, et notamment mécaniques des bois français, s'applique non seulement aux essences traditionnellement utilisées (Pin sylvestre, Sapin, Epicéa, Pin maritime, Peuplier,...) mais aussi à des essences considérées comme nouvelles pour le marché de la structure (Douglas, Pin laricio, Pin noir, Epicéa de Sitka, Mélèze d'Europe).

Un premier niveau de connaissances sur les caractéristiques du peuplier ainsi que sur celles du sapin, de l'épicéa, du pin maritime et du pin sylvestre a permis de proposer en 1984 un classement "structure" avec des caractéristiques mécaniques associées permettant de connaître les valeurs de résistance des bois de la ressource française et ainsi les positionner par rapport aux bois d'importation (cahiers CTBA 123, 124 et 128)

Les objectifs de la caractérisation mécanique des bois français sont multiples, puisqu'il s'agit à la fois :

- de conseiller utilement les politiques de boisement et les sylvicultures à développer,
- de renseigner les concepteurs d'ouvrages sur les performances du matériau,
- de proposer des systèmes "classement - résistance" garantissant la sécurité d'emploi des ouvrages, tout en assurant la valorisation optimale du potentiel forestier actuel et futur.

Par ailleurs, les architectes, les concepteurs et les bureaux d'études s'appuient, pour le dimensionnement et la mise en œuvre des ouvrages, sur des valeurs de modules à la rupture qui sont fixées par des règles normatives. La révision de ces textes devenue

impérative avec l'avènement du marché unique européen a abouti en mai 1992 à une nouvelle version (la précédente datait de 1946) de la norme NF B 52-001 ajustée sur les textes de normalisation européenne (Cf. Chapitre II, "Contexte de la normalisation").

A l'aide des derniers résultats de la recherche sur la qualification des bois, de nouvelles règles de classements visuels ont été validées en 1998 pour simplifier leurs applications par le classeur et pour mieux valoriser les essences en structure.

3 Contexte de la normalisation

L'avènement de l'Union Européenne est accompagné d'un ensemble de normes complexes.

Ce chapitre a pour objectif de situer la problématique du classement des bois pour un emploi en structure dans cet environnement.

On distingue deux types de normes :

3.1 Les normes de calcul

Actuellement, l'usage des règles CB 71 est obligatoire pour les marchés publics. Dans ce document, il existe un chapitre sur les règles de classement des bois mais celui-ci a été invalidé et remplacé par des règles professionnelles intitulées "Contraintes admissibles et propriétés associées au système de classement visuel défini par la norme NF B 52-001 - Bois massif et bois lamellé - collé".

En alternative, l'Eurocode 5 assorti de son DAN (Document d'Application Nationale) a un statut de norme expérimentale.

Il est important de souligner que l'Eurocode 5 ne spécifie aucune règle de classement. Il spécifie uniquement que les bois utilisés en structure soient classés, quelle que soit la méthode (machine ou visuelle), pour connaître leurs performances mécaniques. Contrairement aux idées reçues, l'Eurocode 5 est donc plus souple que les règles CB 71, en ce qui concerne le classement des bois.

3.2 Les normes produits

Celles-ci traitent de la performance des produits. Le classement des bois entre donc dans cette catégorie.

3.2.1 La norme EN 338

Celle-ci donne des classes de résistances, définissant un ensemble de grandeurs mécaniques à utiliser dans le calcul. Par contre, elle ne spécifie pas la méthode de classement permettant d'obtenir ces valeurs. L'objectif de cette norme est de faciliter le travail du calculateur, qui peut utiliser une classe de résistance sans avoir à se préoccuper de la façon dont elle a été produite. De ce point de vue, le bois est maintenant comparable à l'acier.

3.2.2 La norme EN 518

Il s'agit d'une norme définissant les critères sur lesquels une norme de classement visuel doit statuer : nœuds, cernes... En annexe, sont citées des normes nationales de classement dont la norme française NF B 52-001.

3.2.3 La norme EN 519

Celle-ci traite des machines de classement et des procédures qualité du bois classé par machine.

3.2.4 La norme EN 1912

Celle-ci définit les correspondances entre les catégories de bois classés visuellement (ST-I, ST-II et ST-III pour la norme NF B 52-001 version 1998) et les classes de résistances de l'EN 338 (Cf. § 2.2.1). Cette norme est donc essentielle puisqu'elle se situe à la charnière des normes de classement et des normes de calcul.

3.2.5 La norme NF B 52-001

Celle-ci est nationale. Elle a été créée en 1946, révisée entre 1987 et 1992. Cette norme dont le titre est "règles d'utilisation du bois dans les constructions" était constituée jusqu'alors de 5 parties :

- Partie 1 : niveaux de résistance des pièces de bois (1987),
- Partie 2 : méthodes d'essai (1987),
- Partie 3 : échantillonnage et interprétation des résultats d'essais sur pièces en dimensions d'emploi (1989),
- Partie 4 : classement visuel pour l'emploi en structure des principales essences résineuses et feuillues (1992),
- Partie 5 : caractéristiques mécaniques conventionnelles associées au classement visuel des principales essences résineuses et feuillues utilisées en structure (1992).

Cette norme a été révisée en 1998 pour une version simplifiée, compte - tenu des normes européennes existantes :

- Partie 1 : remplacée par l'EN 338
(1995 : *Bois de structure, Classes de résistances*)
- Partie 2 : remplacée par l'EN 408
(1995 : *Bois massif et bois lamellé-collé Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques*)
- Partie 3 : remplacée par l'EN 384
(1995 : *Bois de structure Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*)
- Partie 4 : révisée, constituant maintenant la NF B 52-001
(1998)
- Partie 5 : remplacée par un extrait de l'EN 1912 et par la future norme NF p 21-400
(*Classes de résistances et contraintes admissibles associées*).

Dans la norme NF B 52-001 sont classées les principales essences résineuses (pins, Douglas, sapin et épicéa) et feuillus (peuplier, chêne) utilisées en structure. Leur prise en compte repose sur des campagnes de caractérisations mécaniques portant sur plusieurs milliers d'échantillons en dimensions d'emploi.

4 Objectifs et méthodologie de l'étude

4.1 Objectifs

La valorisation d'une essence passe par une connaissance précise des caractéristiques, notamment mécaniques, du matériau. Pour pallier le manque d'informations, le CTBA a engagé en 1998 une étude sur le Mélèze d'Europe au niveau national.

Une seule région a été retenue pour l'échantillonnage : la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur. En effet, cette région concentre à elle seule les trois quarts du volume de mélèze d'Europe français et 82% des surfaces. Ainsi l'échantillonnage réalisé par le CTBA se limite à cette région, mais aura une valeur nationale en terme d'interpolation des résultats.

La révision de la norme NF B 52-001 sur l'utilisation des bois dans la construction en 2001 est l'occasion d'affirmer l'existence commerciale du Mélèze d'Europe en structure en proposant des règles de classement.

Enfin, une des questions posées porte sur l'amélioration possible du rendement de pièces utilisables en structure grâce à l'utilisation de machines de classement.

4.2 Méthodologie

L'étude des caractéristiques mécaniques d'une essence se déroule en 4 phases principales :

☞ *La première phase de l'étude consiste à définir une méthodologie d'échantillonnage,*

Les placettes forestières proposées par l'ONF et le CRPF sont sélectionnées par le CTBA selon des critères pertinents éprouvés dans les précédentes études menées : La provenance (identifiée par la région forestière telle que définie par l'Inventaire forestier national, la classe de fertilité et la classe de diamètre à 1,30 m. Le nombre d'arbres prélevé est fonction de la quantité minimale d'avivés permettant d'élaborer un classement fiable (jugé à 1500 avivés environ par section).

☞ *La deuxième phase est l'étape de transformation des arbres en avivés destinés aux essais,*

Les arbres sont billonnés puis sciés pour obtenir des avivés de dimensions commerciales. Une section, le 0,05 * 0,15 m (à 12 % d'humidité) a été retenue puisque celle-ci sert de référentiel dans les calculs de structure.

Chaque pièce est référencée, son origine précise et ses caractéristiques sont identifiées au moyen d'un numéro qui décrit :

- la placette forestière (données sylvicoles, lieu de provenance),
- l'arbre (place de l'arbre au sein de la placette),
- le billon (hauteur de prélèvement dans l'arbre),

- l'avivé (localisation par rapport à la moelle de l'arbre).

☞ *La troisième phase consiste à tester des éprouvettes en dimensions commerciales,*

L'ensemble des éprouvettes subit une série de tests non destructifs permettant de déterminer le module d'élasticité, la masse volumique, la largeur de cerne, la nodosité. Les essais non destructifs, outre les données fondamentales énumérées précédemment, ont permis de simuler des classements obtenus par machine. Ces pièces sont ensuite testées en flexion où l'on obtient des valeurs de module d'élasticité et de contrainte à la rupture.

☞ *La quatrième et dernière phase consiste à classer l'essence étudiée :*

Les avivés sont classés suivant les critères de la norme française NF B 52-001 (version 1998) qui définit les classes de résistances et leurs caractéristiques mécaniques associées. Le principe de la norme repose sur la recherche du meilleur compromis entre les critères de classement, la proportion de pièces acceptées et la simplicité de mise en œuvre de la méthode.



Placette retenue pour l'échantillonnage Mélèze d'Europe

5 Le Mélèze d'Europe : essence, échantillon et sylviculture

5.1 Présentation générale de l'essence

5.1.1 Dénomination

Le Mélèze d'Europe fait partie de la famille des Pinacées. Son nom botanique en latin est *Larix decidua* Miller. Il présente la particularité, rare chez les conifères, d'avoir des aiguilles caduques.

5.1.2 Description de l'arbre

C'est un arbre qui peut atteindre 30 à 35 m de haut, à tronc droit et élancé. Ses branches sont horizontales ou plongeantes à ramifications diffuses et à feuilles disposées en bouquets d'un vert brillant. L'écorce écailleuse ressemble à celle des Pins ; brun grisâtre chez les vieux arbres et très épaisse.



Le Mélèze d'Europe : un tronc droit et élancé

5.1.3 Aspect du bois

Le cœur est assez coloré d'un rouge saumon. L'aubier est très mince et de couleur blanc jaunâtre. Les cernes sont très marqués avec un bois final très foncé se détachant nettement du bois initial. Ils sont en général très étroits de 1 à 7 mm. Le bois offre des caractéristiques générales très bonnes, ainsi il peut être aussi bien utilisé en construction (charpente, bardages extérieurs) qu'en menuiserie ou en ameublement.

5.1.4 Aire de répartition

Son aire naturelle est morcelée dans les montagnes de l'Europe centrale, depuis les Alpes occidentales jusqu'aux Carpates et en Alpes de Transylvanie. On le rencontre également dans les collines de Pologne.

En France, il se trouve dans l'étage subalpin des Alpes. C'est une essence de grande lumière qui demande une atmosphère sèche, peu de brouillard, mais un minimum de pluie. Les peuplements qu'ils constituent sont très clairs avec un sol en général garni de gazon dense leur donnant souvent l'allure de pré-bois.

5.1.5 Durabilité

La résistance du duramen de Mélèze d'Europe aux agents biologiques est bonne et si l'aubier est sensible aux insectes et champignons du bois, il est généralement possible de l'imprégner.

5.2 Principe d'échantillonnage

L'échantillonnage a été organisé par le CTBA en s'appuyant sur une méthodologie de sélection des arbres sur pied décrite dans le chapitre « objectifs et méthodologie ».

5.2.1 Cadre de l'échantillonnage

L'objectif de l'étude est d'évaluer les caractéristiques mécaniques du Mélèze d'Europe au niveau national. La région Provence-Alpes-Côte-d'Azur représentant 82% des surfaces boisées françaises et 75% des volumes sur pied, il a été décidé d'échantillonner uniquement dans cette région pour représenter le potentiel actuel sur pied d'arbres sciabls au niveau national.

5.2.2 Mise en œuvre du plan d'échantillonnage

A partir de placettes proposées par l'ONF et le CRPF, le CTBA a visité 39 placettes en 1998 pour procéder à la sélection définitive de 18 placettes. Au sein de chaque placette retenue, le CTBA a sélectionné les arbres représentatifs du peuplement sciabls. Les arbres présentant des défauts susceptibles de compromettre la production de sciages testables (pourriture par exemple) sont exclus.

Les arbres identifiés des placettes retenues (au nombre de 160) ont été exploités puis expédiés à la scierie.

5.2.3 Critères de sélection placette et arbres

① La provenance (identifiée par la région)

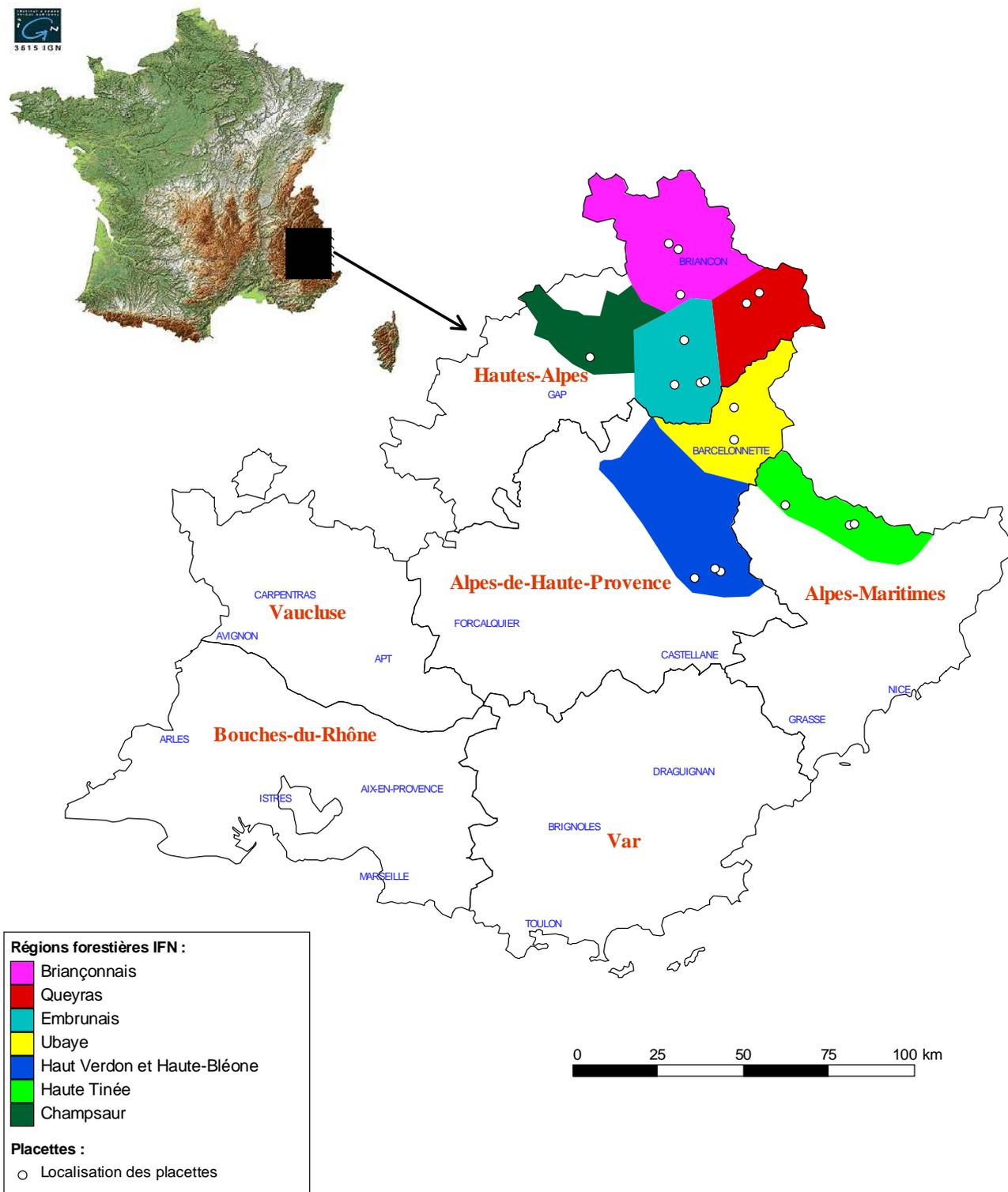
L'inventaire Forestier National (IFN) définit la région forestière comme étant « *l'unité territoriale où règne en moyenne des conditions similaires ou équivalentes du point de vue forestier et qui présente des types de forêts ou des types de paysages comparables* ».

Les placettes ont été réparties en tenant compte de l'importance des surfaces boisées en Mélèze d'Europe dans les sept régions forestières identifiées. Ainsi les placettes retenues se répartissent de la façon suivante dans ces régions :

Tableau 10 : Répartition des placettes échantillonnées dans les 7 régions forestières

Les régions	Surface boisée en Mélèze (ha)	% de surface Mélèze	Nombre de placettes CTBA	Nombre d'arbres sélectionnés
Briançonnais (N°IFN 051)	11839	19%	3	25
Embrunais (N°IFN 053)	10614	17%	4	35
Queyras (N°IFN 052)	10037	16%	2	20
Ubaye (N°IFN 041)	9779	15%	2	20
Haut Verdon et Haute Bléone (N°IFN 042)	8596	13%	3	25
Haute Tinée (N°IFN 061)	8230	13%	3	25
Champsaur (N°IFN 054)	4667	7%	1	10
Total sur la région PACA	63762	100%	18	160

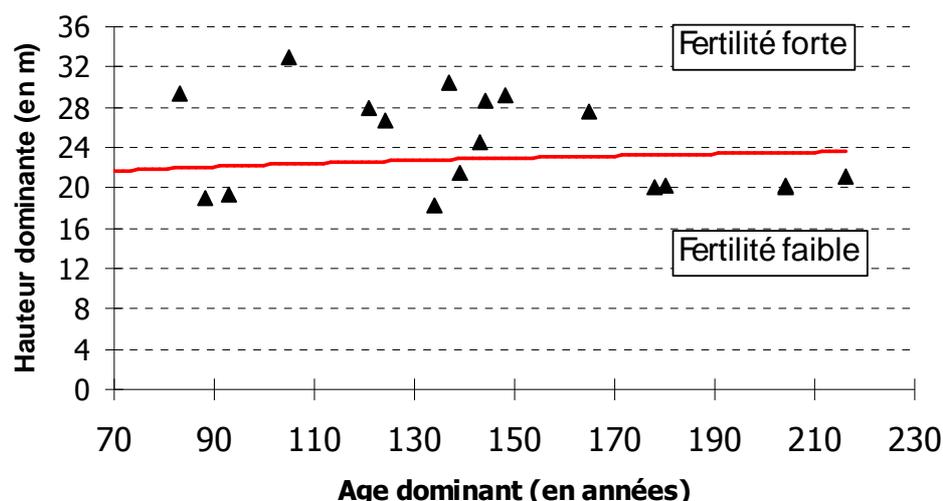
Figure 2 : Localisation des 18 placettes de l'échantillonnage Mélèze d'Europe



② La classe de fertilité

Les données IFN nous ont donné la répartition des différents peuplements de Mélèze par âge et hauteur dominante, nous avons séparé cette population en deux afin d'obtenir deux classes de hauteur pour un même âge. Ces deux classes distinguent la fertilité de la station où pousse l'arbre. La classe des hauteurs dominantes les plus hautes représentant les stations de forte fertilité. Les **18 placettes** retenues couvrent bien l'étendue des différents âges des peuplements de Mélèze d'Europe capable de donner des sciages et se répartissent pour **9** d'entre elles dans la gamme de **forte fertilité** et pour **9** dans la gamme de **faible fertilité**.

Graphique 1 : Courbe de fertilité et répartition des 18 placettes



③ La classe de diamètre

Les diamètres représentatifs en nombre de tiges des placettes choisies ont été retenus en tenant compte de la limite inférieure de sciabilité et du nombre de pièces souhaitées fixées au départ (environ 1500). Ainsi deux groupes de classes de diamètres ont été retenues, les groupes [30-40] et [45-50] cm.

Le diamètre minimum de 30 cm sur écorce à 1,30 m de haut correspond à la limite inférieure, compte tenu du taux d'écorce et de la section sciée. Au-delà des nécessités techniques, la limite supérieure de l'échantillon à la classe 50 permet de couvrir le potentiel de mélèze d'Europe compte tenu du faible pourcentage de mélèze d'Europe de plus de 50 cm de diamètre de moyenne. Ainsi l'échantillon retenu comprend **140 arbres** dans le groupe [30-40] et **20 arbres** dans le groupe [45-50] cm.

Tableau 11 : Répartition des âges en fonction des diamètres à 1,30 m

Groupes	Age			Nb arbres
	Moyenne	Min.	Max.	
[30-40]	156	77	277	140
[45-50]	196	127	240	20

5.3 Caractéristiques de l'échantillon

5.3.1 Les conditions de croissance

Le Mélèze d'Europe essence pionnière à port rectiligne et à croissance soutenue pour un arbre de montagne présente une grande plasticité :

Vis à vis du climat, on trouvera des mélèzes aussi bien dans des zones variant de 700 à 1300 mm de pluie en moyenne par an. La gamme des températures acceptées est également très large (de 4 à 9° de moyenne par an) avec parfois des nombres de jours de gelées dépassant les 100 jours. L'altitude des parcelles d'où proviennent les échantillons s'étalent de 1400 à 2100 m.

Les conditions édaphiques acceptées par le Mélèze d'Europe sont aussi très diverses. Il peut prospérer valablement depuis les stations les plus calcicoles jusqu'à des substrats assez acides à condition toutefois que ses exigences en eau soient satisfaites comme nous le montre la répartition des placettes échantillonnées dans les deux tableaux suivants :

Tableau 12 : Les conditions édaphiques

Acidité du sol	Nombre de placettes	%	Circonférence à 1,30 m (cm)	Age
Acide	8	44%	115	143
Calcaire	7	39%	118	174
Neutre	3	17%	121	168
Total	18	100%	118	160

Tableau 13 : Les conditions d'humidité

Humidité	Nombre de placettes	%	Circonférence à 1,30 m (cm)	Age
Humide	4	22%	129	169
Moyennement humide	11	61%	112	160
Sec	3	17%	123	153
Total	18	100%	118	160

Même s'il est capable de subsister sur des sols rocailleux et superficiels, le Mélèze d'Europe préfère évidemment des sols aérés à bonne porosité avec une bonne profondeur ainsi 55% des parcelles échantillonnées se situent sur des sols de 20 à 60 cm de profondeur.

En résumé, il s'agit d'une essence robuste et tolérante dans ses conditions de croissance, dont l'écorce épaisse (jusqu'à 20% de volume) protège bien le bois et dont les facteurs limitants sont une exigence en espace et en lumière donc réclamant une sylviculture particulièrement dynamique.

5.3.2 Les caractéristiques sylvicoles des parcelles échantillonnées

Les arbres échantillonnés font partie de peuplement dont les caractéristiques sylvicoles figurent dans le tableau suivant :

Tableau 14 : Les caractéristiques sylvicoles des parcelles échantillonnées

Peuplement					
Type	Origine	Traitement sylvicole	Nombre	Pourcentage	
Pur	Régénération naturelle	Futaie irrégulière	11	62%	
		Futaie régulière	5	28%	
Mélangé (avec cembro)	Pin	Régénération naturelle	Futaie irrégulière	1	5%
		Plantation	Futaie régulière	1	5%
Total			18	100%	

La majorité des peuplements échantillonnés correspond à des peuplements purs issus de régénération naturelle et traités en futaie irrégulière. Il est à préciser que le terme de futaie irrégulière est employé pour une parcelle dont les arbres sont de différents âges soient pied à pied soient par bouquets. Cette majorité échantillonnée correspond bien à ce que l'on peut observer en majorité sur le Mélèze de Provence-Alpes-Côte-d'Azur.

Afin de situer d'une manière globale les parcelles retenues pour l'échantillonnage les caractéristiques moyennes sont données dans le tableau suivant :

Tableau 15 : Principales caractéristiques des placettes de sondage

Sur les 18 placettes	Moyenne	Ecart-type	CV	Min	Max
Age (ans)	160	48	30%	76	276
Hauteur de l'arbre (m)	23	4	18%	18	30
Densité peuplement (tiges/ha)	335	133	40%	160	700
Circonférence à 1,30 m (cm)	109	12	11%	82	130
Altitude (m)	1765	183	10%	1400	2100

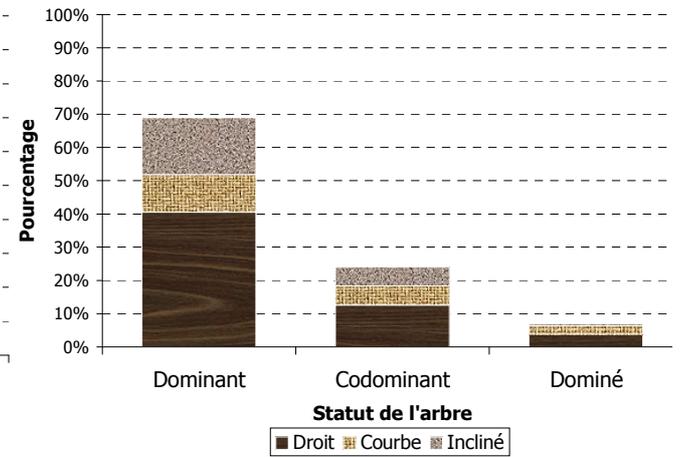
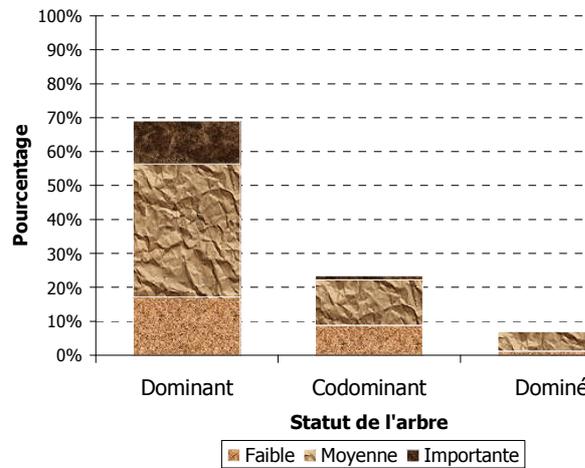
5.3.3 Les caractéristiques des arbres échantillonnés

Les arbres échantillonnés ont été sélectionnés parmi la classe dominante à 70%, il y a très peu de dominés (moins de 10%) ce qui correspond bien au tempérament de lumière de cette essence. Dans cette classe de dominance, le nombre d'arbres courbes ou inclinés n'est pas négligeable (28% de la classe). Cette inclinaison ou courbure basale est souvent liée au phénomène de pente et de déformation de la neige dans le jeune âge. Les arbres dominants sont le plus souvent moyennement branchus, les branches ne sont pas nombreuses mais de forts diamètres. Aucun élagage n'a été constaté sur l'échantillon récolté.

Les deux graphiques ci-dessous résument les caractéristiques des arbres sur pied.

Graphique 2 : Statut et branchaison des arbres

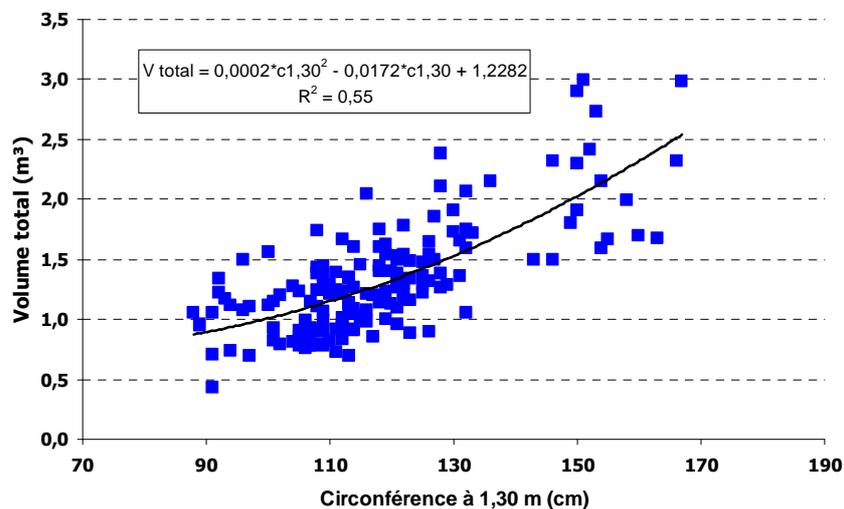
Graphique 3 : Statut et forme des arbres



5.3.4 Quelques données dendrométriques

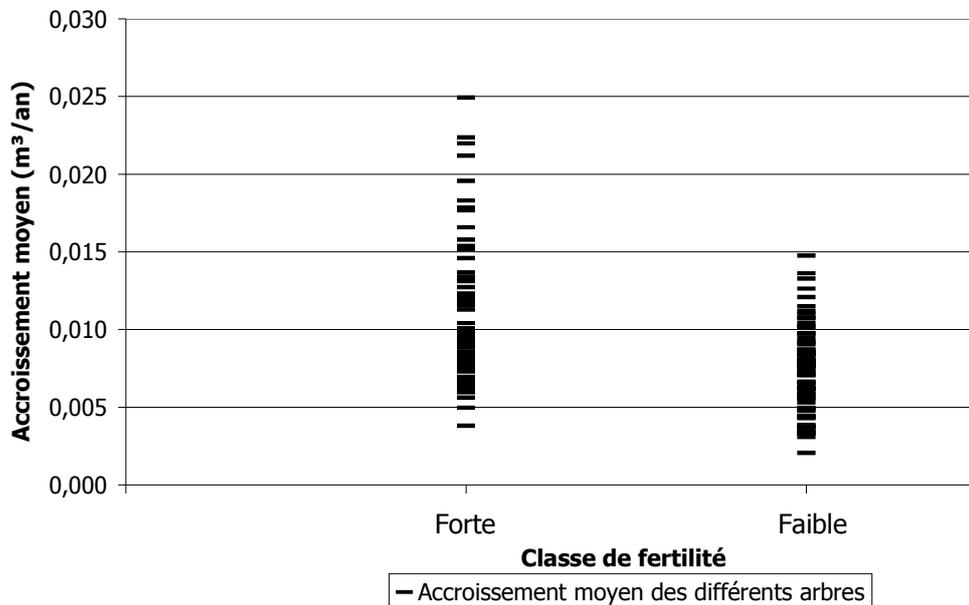
Les arbres échantillonnés ont tous été cubés en totalité une fois abattus, le graphique suivant présente un tarif de cubage à une entrée (circonférence à 1,30 m) établi d'après les résultats obtenus. Ce tarif exprime le volume total de l'arbre en fonction de la circonférence à 1,30 m de l'arbre.

Graphique 4 : Tarif de cubage des arbres échantillonnés



Une disparité de volume assez importante apparaît pour les arbres de même circonférence qui est due à la différence d'accroissement moyen dans les deux classes de fertilité définies pour l'échantillonnage comme nous le montre le graphique suivant :

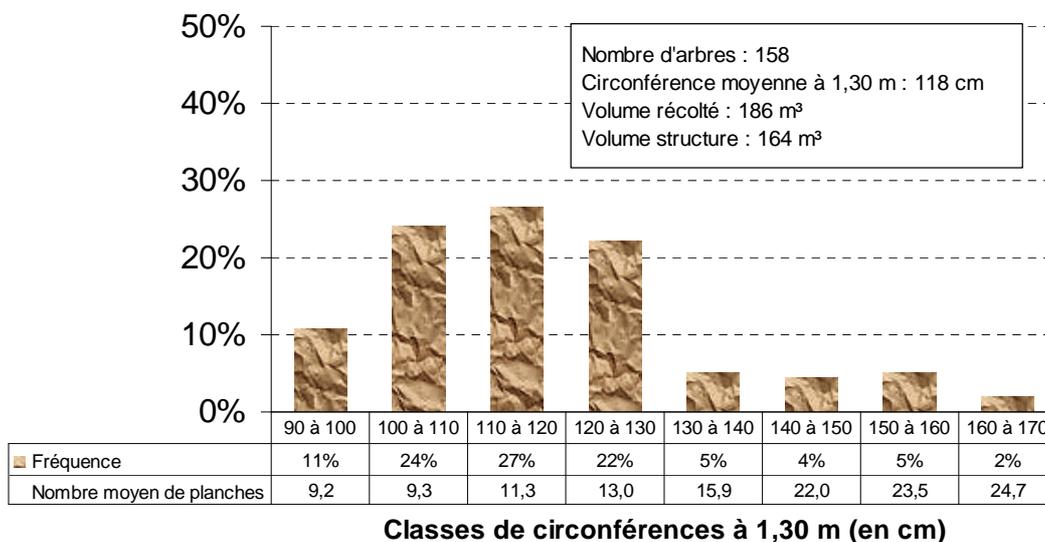
Graphique 5 : Influence de la classe de fertilité sur l'accroissement moyen



Les facteurs influençant les différences d'accroissement sont multiples et difficilement séparables. On peut cependant estimer que les principaux facteurs de variation sont l'altitude, le type de sol, le climat et l'exposition.

La répartition des circonférences à 1,30 m des arbres échantillonnés figure sur le graphique suivant avec le nombre moyen de planches obtenues dans chaque classe de circonférence. Cela montre le potentiel d'avivés possible sur un arbre d'une classe de circonférence donnée (si l'arbre est destiné à une utilisation en structure de son pied jusqu'à la découpe 20 cm de diamètre).

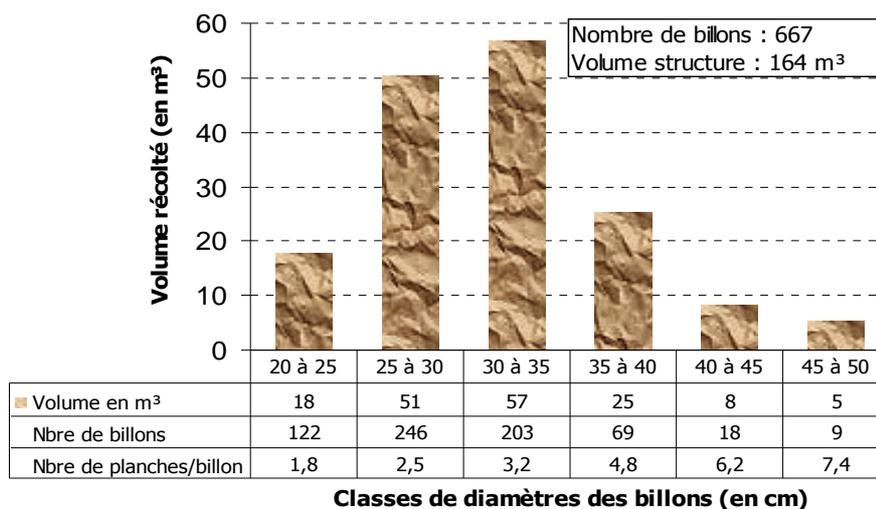
Graphique 6 : Répartition des circonférences à 1,30 m des arbres échantillonnés



5.4 La transformation

Sur les 160 arbres prélevés, 2 ont été éliminés après exploitation pour cause de pourriture, le reste était sain. Les **158 arbres** sains ont été façonnés en **667** billons de 3,30 m de long et sciés en avivés de **0,06*0,16*3,3 m**. L'ensemble des billons a été livré à la scierie Guirand de Villars-Colmars (Alpes de Haute-Provence) pour y être sciés puis séchés à air chaud climatisé. Le graphique ci-après représente la répartition par classe de diamètres des 667 billons sciés et destinés aux essais physiques et mécaniques.

Graphique 7 : Répartition des classes de diamètres des billons sciés



La scierie a réalisé **1982 avivés** sur ces 667 billons (soit **3 avivés** par billon en moyenne). Ces avivés ont été ensuite transportés en Gironde à Saint Seurin sur l'Isle aux ateliers de l'APAJH pour y être rabotés (dimension finale de 0,05*0,15*3 m) et permettre une meilleure détection des singularités sur les phases ultérieures des essais non destructifs.

Chaque billon et chaque avivé ont été listés et référencés afin de garder la traçabilité de l'arbre et position dans l'arbre jusqu'aux propriétés mécaniques.



Avivés référencés après passage à la scie

6 Données expérimentales

6.1 Type de mesures réalisées

Les propriétés technologiques du bois sont appréciées à partir des caractéristiques :

- morphologiques et anatomiques,
- physiques et mécaniques.

6.1.1 Caractéristiques morphologiques et anatomiques

Deux rondelles d'environ 10 cm d'épaisseur sont prélevées sur chaque arbre échantillonné, une au pied de l'arbre et l'autre au sommet du premier billon (hauteur/sol : environ 3,5 m). Les caractéristiques mesurées sont la largeur des cernes, la texture, le diamètre et l'âge. Le bois de réaction est identifié visuellement.

6.1.2 Caractéristiques physiques et mécaniques

Pour les essais sur pièces en dimensions commerciales la section retenue est une section référentielle dans les calculs de structure :

- $50 * 150 * 3\ 000\ \text{mm}^3$,

Ces dimensions correspondent à un avivé séché à 12 % et raboté sur ses quatre faces.

En complément des essais mécaniques, les mesures physiques suivantes sont réalisées :

- largeur de cerne,
- nodosité dans la partie médiane de la pièce.

Les temps à la rupture et le type de rupture sont saisis lors des essais mécaniques pour permettre de sélectionner le sous-lot à partir duquel sont effectuées les analyses. En effet, lors de chaque essai, certaines pièces ne cassent pas dans la partie médiane (norme EN 408) et sont donc écartées des analyses de façon à ne pas augmenter la dispersion réelle des résultats.

6.2 Caractéristiques morphologiques et anatomiques

6.2.1 Les caractéristiques globales

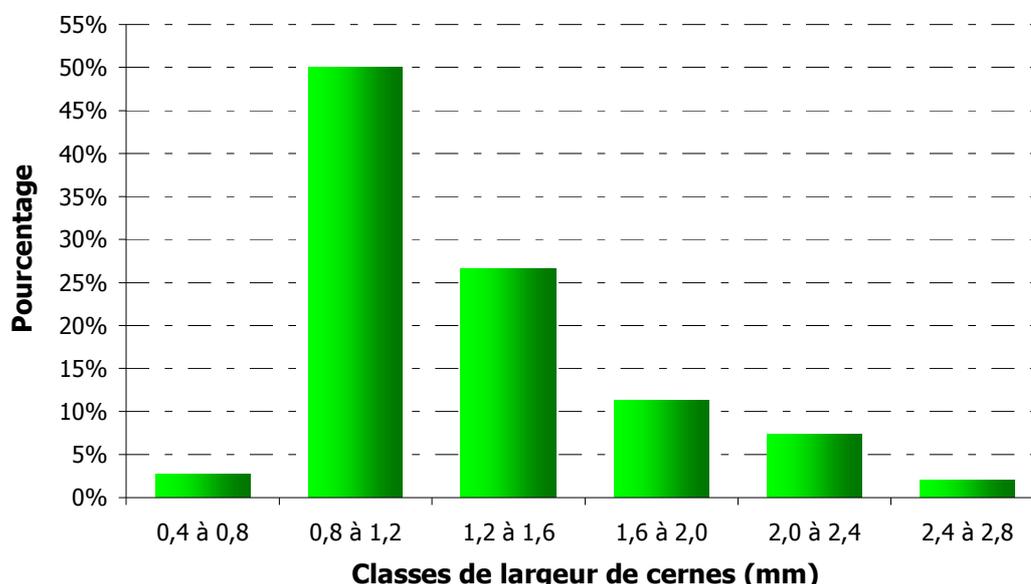
L'analyse des rondelles de pied permet de déterminer avec une bonne précision l'âge de l'arbre et ses conditions de croissance (largeur de cernes). L'âge déterminé sur la rondelle prélevée au pied a été comparé à l'âge estimé par le forestier au moment de la coupe, la différence est de 4% en moyenne. Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques anatomiques globales mesurées sur les rondelles :

Tableau 16 : Caractéristiques anatomiques mesurées sur les rondelles

158 arbres	Moyenne	Ecart type	CV	Min	Max
Age à la souche (ans)	160	48	30%	76	276
Circonférence à 1,30m (cm)	118	16	14%	88	168
Texture (%)	37	11	30%	7	77
Largeur de cernes (mm)	1,4	0,5	36%	0,7	3,2

La croissance en diamètre des arbres prélevés est très lente avec une largeur de cernes de 1,4 mm en moyenne sur le rayon. Cette moyenne est légèrement supérieure à la majorité des arbres qui se situe plutôt dans une gamme de largeur de cernes comprise entre 0,8 à 1,2 mm comme le montre le graphique ci-dessous.

Graphique 8 : Répartition des classes des largeurs de cernes mesurées sur avivés



Une révolution de 150 à 200 ans en moyenne permet d'obtenir des produits de dimensions suffisantes pour être commercialisés en bois de construction. Cette croissance très lente est bien sûr liée aux conditions de montagne avec une saison de végétation courte.

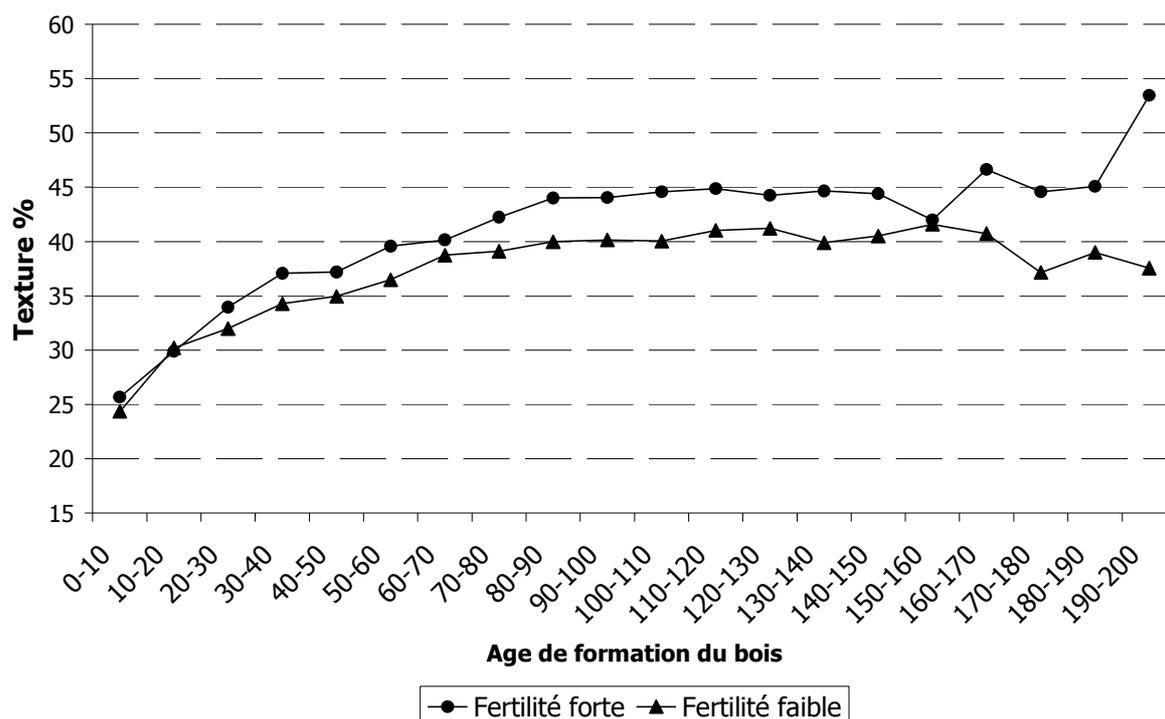
La texture du Mélèze d'Europe est assez forte avec une moyenne de 37%. (L'Epicéa à une texture de 15% et le Sapin de 23% en moyenne). L'âge des arbres ne permet pas

d'expliquer toute la variabilité de la texture, celle-ci a donc été analysée en fonction de l'âge de formation du bois, par groupe de 10 cernes sur la rondelle prélevée à 3,30 m.

6.2.2 Les variations suivant l'âge

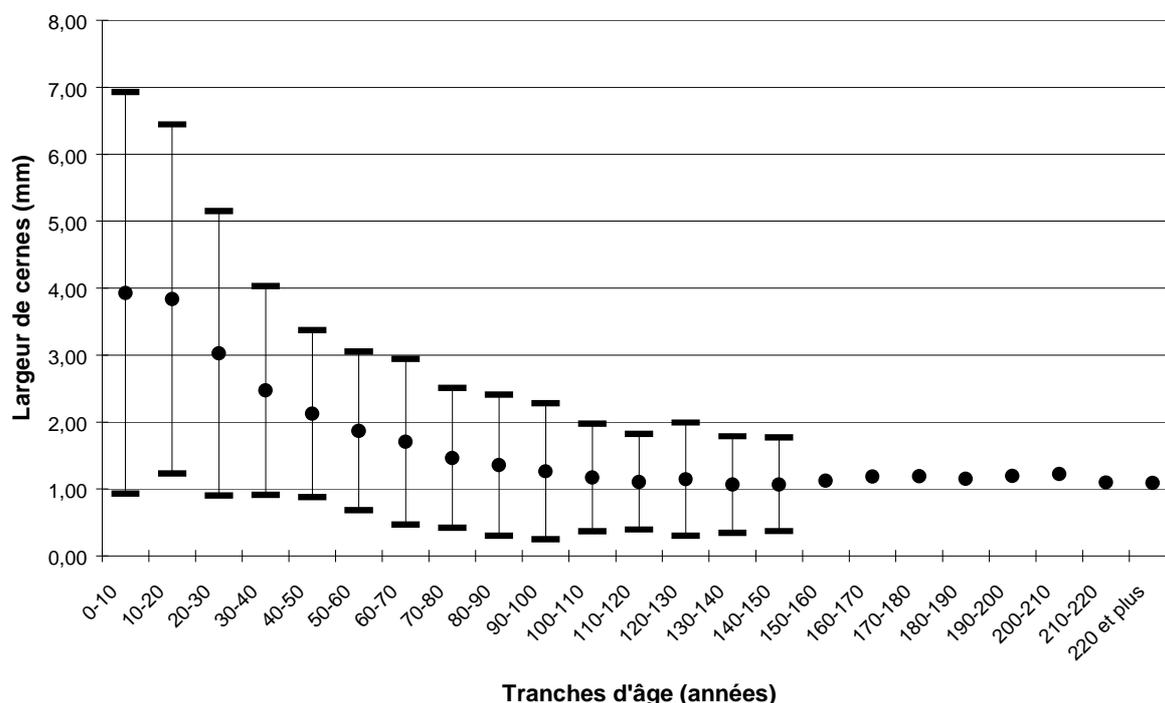
La texture augmente avec l'âge de formation du bois de façon significative durant les 80 premières années de la vie de l'arbre pour se stabiliser à 40 – 45% à partir d'une centaine d'années suivant sa station de fertilité.

Graphique 9 : Variation de la texture moyenne en fonction de l'âge de formation du bois



A l'inverse de la texture, la largeur de cernes décroît rapidement avec l'âge de formation du bois durant les 80 premières années pour se stabiliser après. On peut remarquer aussi sur le graphique suivant, que la variation de largeur de cernes est très forte dans le jeune âge pour devenir moins importante (de l'ordre d'1 mm) dès que l'on atteint 80 ans.

Graphique 10 : Evolution de la largeur de cernes en fonction de l'âge de formation du bois



Ainsi nous pouvons en conclure que la largeur de cernes est bien corrélée à l'âge de l'arbre mais qu'elle varie fortement en fonction des conditions du milieu où pousse l'arbre. Par contre au-delà de 80 ans l'influence du milieu se fait beaucoup moins sentir sur la croissance de l'arbre.

La texture est dans l'ensemble forte pour cette essence ce qui aura une incidence sur sa densité (densité forte). Les causes de sa variation ne sont pas liées à l'âge de l'arbre mais plutôt à l'âge de formation du bois. Dans le jeune âge, l'arbre a une forte croissance avec plutôt du bois de printemps (texture moyenne), très rapidement, la croissance diminue (moins d'accroissement au printemps) au bénéfice d'une texture plus forte.



Détermination des largeurs de cernes et de la texture sur rondelles sur deux rayons

6.3 Essais sur pièces en dimensions commerciales

6.3.1 Echantillonnage

Les 1982 pièces réalisées en scierie ont été triées en trois catégories pour les essais :

- Le type 1 « éprouvettes refusées » a été écarté des essais pour des défauts de forme rédhibitoires en utilisation structurelle comme par exemple la présence importante d'écorce sur l'avivé,
- Le type 2 « éprouvettes de qualification » a été sélectionné parmi les avivés présentant les caractéristiques les plus uniformes (bois de droit fil et sans défaut d'aucune sorte),
- Le type 3 « essais en flexion » représente l'échantillon testé en dimensions commerciales et classées.

Tableau 17 : Dénombrement des éprouvettes en dimensions commerciales

Type	Nombre d'avivés
Eprouvettes refusées	128
Eprouvettes de qualification	34
Essais en flexion	1820
Total	1982

Le tableau ci-dessous présente la répartition des planches testées en flexion par rapport à la position dans l'arbre :

Tableau 18 : Répartition des avivés par hauteur de prélèvement dans l'arbre

Numéro du billon et position dans l'arbre							Nombre de pièces
1 0,2 à 3,5m	2 3,5 à 6,8m	3 6,8 à 10,1m	4 10,1 à 13,4m	5 13,4 à 16,7m	6 16,7 à 20,0m	7 20,0 à 23,3m	
517	490	407	267	109	26	4	1820
28%	27%	22%	15%	6%	1%	1%	100%

6.3.2 Résultats d'essais

Avant la réalisation des essais mécaniques, les principales caractéristiques physiques des pièces sont relevées :

- largeur des cernes aux deux extrémités de l'avivé (selon la norme EN 1310),
- masse volumique (par pesée),
- nodosité locale sur la partie médiane des pièces (45 % de la longueur totale selon la norme EN 1310).

Les essais mécaniques de flexion permettent de mesurer :

- le module d'élasticité longitudinal qui exprime la force nécessaire à déformer une poutre pour une sollicitation dans le plan perpendiculaire aux fibres. Le module peut être local (flèche de l'arc central mesurée sur le tiers central) ou global (flèche de l'arc mesurée sur la totalité de la poutre) *Plus la poutre résiste à la déformation plus le module est élevé.*

- la contrainte de rupture qui traduit la capacité d'une poutre à résister à un effort conduisant à la ruine de la poutre.

NB :

- *Le module d'élasticité local ainsi que la contrainte à la rupture et la masse volumique sont les trois critères retenus pour effectuer le classement structure (EN338)*
- *Le type de flexion utilisé pour les essais est une flexion sur quatre points réalisée suivant la norme EN 408.*
- *Les valeurs du module et de la masse volumique sont ramenées à 12 % d'humidité en application des directives de la norme EN 384. Le module est majoré de 2 % par % d'humidité quand celle-ci est inférieure à 12 %. Il est diminué dans le cas inverse.*
- *Une correction de 0,5 % d'humidité s'applique également pour la masse volumique. Au-delà de 12 %, la masse volumique est majorée et en deçà, elle est diminuée du produit de ce coefficient multiplié par l'écart d'humidité.*



Banc de flexion du CTBA de Bordeaux où les avivés sont sollicités à chant, dans le cas d'une utilisation structurelle, afin de déterminer la contrainte à la rupture et le module d'élasticité

Dans le cas de l'essai de flexion, les pièces n'ayant pas cassé dans leur partie médiane sont éliminées. Ainsi, sur les 1820 avivés testés en flexion, 1576 ont cassé dans leur partie médiane. Le tableau suivant en présente les résultats :

Tableau 19 : Principales propriétés physiques et mécaniques relevées sur les éprouvettes

Variables	Moyenne	Ecart type	Min	Max	Nb de pièces
MV12 (kg/m ³)	591	50	449	765	1576
Face (%)	40	18	0	97	1441
Rive (%)	39	28	0	100	1441
KAR (%)	36	17	0	95	1441
Acc (mm)	1,3	0,6	0,5	4,9	1820
MOEG 12 % (GPa)	10,1	1,9	4,6	16,5	1576
MOEL 12 % (GPa)	10,9	2,3	4,3	21,3	1576
MOR (MPa)	50,0	17,5	13,5	112,8	1576

Propriétés mécaniques des avivés :

Une fois les propriétés mécaniques déterminées, il est intéressant de les comparer à une référence donnant des propriétés mécaniques différentes découpées en classes de qualité pour une utilisation structurelle. Ainsi, chaque propriété mécanique va être comparée à la norme EN 338 sur trois classes de résistances définies et couramment utilisées pour les bois résineux et peupliers en utilisation structurelle. Elles sont présentées dans le tableau ci-après de la meilleure classe à celle la plus basse.

Tableau 20 : Les classes de résistances définies dans la norme EN 338

Classes	MOR en flexion à 5% d'exclusion (MPa)	MOEL moyen à 12% en flexion (GPa)	MV à 12% à 5% d'exclusion (kg/m ³)
C 30	30	12	380
C 24	24	11	350
C 18	18	9	320

↳ La masse volumique est forte

- La masse volumique moyenne est de 591 kg/m³
- 100 % des pièces ont une masse volumique supérieure à 380 Kg/m³.
Ainsi, la totalité des avivés est admissible en C30 au regard de ce critère

↳ Le module d'élasticité local est plutôt faible

- 30 % des avivés ont un module d'élasticité supérieur à 12 GPa,
Ainsi, le quart des avivés est admissible en C30 au regard de ce critère.

- 46 % des avivés ont un module d'élasticité supérieur à 11 GPa,
La moitié des avivés est admissible en C24 pour ce critère.
- 79 % des avivés ont un module supérieur à 9 GPa,
Les trois quarts des avivés sont admissibles en classe C18 pour ce critère.

↳ **La contrainte à la rupture (MOR) est forte**

- 87 % des pièces ont une contrainte de rupture en flexion supérieure à 30 MPa,
Donc, 87 % des avivés sont admissibles en C30 au regard de ce seul critère.
- 95 % des pièces ont une contrainte de rupture en flexion supérieure à 24 MPa,
La plupart des avivés sont admissibles en classe C24 au regard de ce seul critère.
- 99 % des pièces ont une contrainte de rupture en flexion supérieure à 18 MPa,
La quasi-totalité des avivés est admissible en classe C18 au regard de ce seul critère.

Quelles sont les causes de la rupture des avivés ?

Comme nous pouvons le voir sur le tableau qui suit, 81% des pièces ont cassé à cause d'un groupe de nœuds ou d'un nœud simple. Si les nœuds sont prépondérants dans la rupture des pièces, les valeurs des contraintes de ces pièces restent cependant encore élevées (44 MPa en moyenne).

Tableau 21 : Les causes de la rupture des avivés

Cause de la rupture	Pourcentage de pièces	Projection nœuds sur face	Projection nœuds sur rive	MOR	MOE
Groupe de nœuds	62%	43%	42%	44	10,5
Nœud seul	19%	39%	40%	51	11,1
Capacité du bois	13%	33%	28%	69	12,0
Roulure	2%	33%	36%	57	11,1
Autres causes (pourriture, résine, bois comprimé)	4%	NS	NS	NS	NS

Propriétés physiques des avivés :

Une fois les propriétés physiques déterminées, il est intéressant de les comparer à une référence donnant une correspondance entre les critères visuels (largeur de cernes et nodosité) et les propriétés mécaniques découpées en classes de qualité pour une utilisation structurelle. Ainsi, chaque propriété physique va être comparée à la norme NF B 52-001 sur trois classes visuelles définies et couramment utilisées pour les bois résineux (Sapin, Epicéa, Douglas) en utilisation structurelle. Elles sont résumées dans le tableau ci-après de la meilleure classe à celle la plus basse (voir annexe 1 pour le détail de la norme NF B 52-001).

Tableau 22 : Les classes structure (norme NF B 52-001) pour le Sapin, Epicéa, Douglas

Classes	Correspondance Classes de résistance	Largeur de cernes (mm)	Diamètre des nœuds maxi toléré sur face (mm)	Diamètre des nœuds maxi toléré sur rive (mm)
ST I	C 30	≤ 6 ou 8(*)	≤ 1/6 de la largeur et ≤ 30 mm	≤ 2/3 de l'épaisseur et ≤ 40 mm
ST II	C 24	≤ 8 ou 10(*)	≤ 1/2 de la largeur et ≤ 50 mm	
ST III	C 18	≤ 10 ou 12(*)	≤ 3/4 de la largeur et ≤ 100 mm	

(*) Pour le Douglas

↳ La largeur des cernes est faible

- Tous les avivés ont une largeur de cernes < 5 mm
Ainsi, la totalité des avivés est admissible en ST I au regard de ce critère

↳ La nodosité sur les faces est forte

- 7 % des pièces ont des diamètres de nœuds maxi ≤ 1/6 de la largeur de la pièce et ≤ 30 mm
Donc, 7 % des avivés sont admissibles en ST I au regard de ce seul critère.
- 43 % des pièces ont des diamètres de nœuds maxi ≤ 1/2 de la largeur et ≤ 50 mm.
Donc, 43 % des avivés sont admissibles en ST II au regard de ce seul critère.
- 91 % des pièces ont des diamètres de nœuds maxi ≤ 3/4 de la largeur et ≤ 100 mm.
Donc, 91 % des avivés sont admissibles en ST III au regard de ce seul critère.

↳ La nodosité sur les rives est forte

- 84 % des pièces ont des diamètres de nœuds maxi ≤ 2/3 de l'épaisseur et ≤ 40 mm.
Donc, 84 % des avivés sont admissibles en ST I, ST II, ST III au regard de ce seul critère.

↳ Présence importante de poches de résine

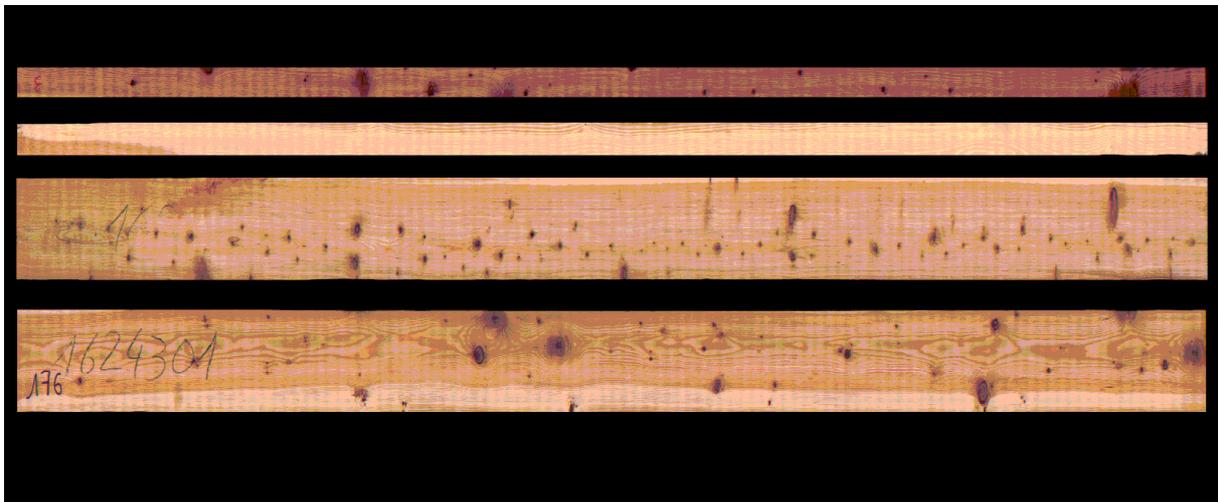
- Plus de 70% des pièces contiennent des poches de résines (les dimensions moyennes sont de 3 à 10 cm de long pour une largeur de 1 mm et le nombre varie de 1 à 10 sur la planche).
Cette présence n'a pas d'incidence sur une utilisation structurelle mais est pénalisante dans le cas d'une valorisation en menuiserie ébénisterie.

↳ **Présence de gauchissement ou flèche de rive sur plusieurs pièces**

- Environ 15% des pièces présentent des défauts de forme liés à sa forte texture et aux conditions de séchage. Cette essence semble demander de nombreuses précautions pour être séchée (temps de séchage, palier de température...) afin d'éviter ces déformations. L'étude ne prenant pas en compte l'aspect séchage, les conditions de séchage des pièces testées n'ont pas été optimisées.

En conclusion, suivant les trois critères pour établir les classes de résistance (masse volumique, module d'élasticité et contrainte à la rupture) et compte tenu des résultats des tests, 96% des avivés de Mélèze d'Europe peuvent être utilisés en construction. Le critère le plus discriminant au niveau qualité est le module d'élasticité puisqu'il décline 70% des pièces de la meilleure classe C30 aux classes inférieures. Cela révèle un fort potentiel d'utilisation du Mélèze d'Europe en structure. Cependant, si ces résultats permettent d'élaborer un classement optimal (à posteriori, après rupture des pièces) il ne doit pas être confondu avec le classement visuel qui cherche à associer des critères visuels (largeur de cernes, nodosité principalement) à des classes de résistances et dont le rendement est différent comme le montre les résultats précédents.

Ainsi, suivant les trois critères visuels de l'Epicéa et du Sapin (projection de nœuds sur la face et la rive et la largeur des cernes d'accroissement) 78% des avivés de Mélèze d'Europe peuvent être utilisés en construction.



Vue des deux rives et des deux faces d'un même avivé de Mélèze (présence importante de nœuds)

6.3.3 Corrélation entre les différents résultats obtenus

La contrainte à la rupture est l'élément le plus déterminant dans la connaissance des propriétés mécaniques d'un avivé. Cependant celui-ci nécessite de détruire la pièce pour le connaître. Les autres paramètres influençant les propriétés mécaniques tels que le module d'élasticité, la masse volumique, la largeur de cernes, le KAR et les projections de nœuds peuvent être mesurés manuellement ou par machine. Ainsi, il est intéressant d'établir les relations entre la contrainte à la rupture et ces éléments non destructifs qui permettront de prédire au mieux la contrainte à la rupture. Une matrice de corrélation a été établie entre ces éléments, en voici les résultats :

Tableau 23 : Matrice de corrélation entre les propriétés mécaniques et physiques.

Matrice de corrélation avec toutes les pièces (significatif à partir de 0,15)							
	Acc	MOR	MOEL12	MOEG12	MV12	Face	Rive
Acc							
MOR	- 0,16						
MOEL12	- 0,12	0,68					
MOEG12	- 0,14	0,74	0,91				
MV12	- 0,20	0,32	0,37	0,40			
Face	- 0,07	- 0,26	- 0,26	- 0,27	- 0,07		
Rive	- 0,03	- 0,26	- 0,26	- 0,27	- 0,17		

L'analyse de la matrice des corrélations permet de tirer les conclusions suivantes :

↳ **Les meilleurs prédicateurs de la contrainte de rupture sont :**

- le module d'élasticité global ($r = 0.74$),
- le module d'élasticité local ($r = 0.68$),
- dans une moindre mesure les nœuds (en face ou en rive) et la masse volumique.

6.4 Essais sur éprouvettes sans défauts (éprouvettes de qualification)

L'ensemble des résultats des mesures et essais est condensé dans le tableau 24.

Tableau 24 : Résultats d'essai sur petites éprouvettes

Variables	Moyenne	Ecart type	Min	Max	Nombre
Masse volumique à H% (kg/m ³)	640	67	508	789	78
Humidité H (%)	23	7	13	46	
Masse volumique à 12% (kg/m ³)	613	58	482	745	
Masse volumique anhydre (kg/m ³)	552	50	431	685	
Masse volumique basale (kg/m ³)	482	39	402	570	
Retrait volumique (%)	12,6	2,4	6,3	19,0	
Coefficient de retrait volumique	0,4	0,1	0,2	0,6	

Nous pouvons constater un retrait volumique moyen équivalent à celui obtenu sur les essences Sapin et Epicéa (retrait volumique de 12,7% pour l'Epicéa et 11,4% pour le Sapin). Ce retrait lié à la texture forte de cette essence aura une importance sur les conditions de séchage à mettre en place pour obtenir des sciages sans trop de fentes de retrait.

7 Sylviculture et propriétés mécaniques

Ce paragraphe a pour but de donner au sylviculteur des indications quant aux critères à prendre en compte pour évaluer les propriétés mécaniques de leurs peuplements et de déterminer les meilleurs bois à proposer pour une utilisation structurelle.

7.1 Caractéristiques physiques moyennes des placettes

A titre indicatif, nous donnons ici les principaux caractères relevés par placette échantillonnée. S'agissant d'un échantillon, on ne peut assimiler les moyennes annoncées à l'ensemble d'une commune ou d'une région forestière. Sur les régions forestières possédant plusieurs échantillons aucune relation entre le milieu et les propriétés mécaniques n'a été mise en évidence.

Tableau 25 : Caractéristiques physiques moyennes des placettes échantillonnées

Les régions forestières	Communes	Fertilité	Age moyen (ans)	C1,30 Moyen (cm)	ACC moyen (mm)	MOR	MOE	Avivés (nbre)
Briançonnais	Villard Saint Pancrace	1	187	118	1,0	48	11	72
	Puy Saint Pierre	2	226	161	1,0	43	9	40
	L'Argentière Bessée	2	167	122	1,2	48	11	92
Champsaur	Saint Jean saint Nicolas	1	80	104	2,4	43	10	104
Embrunais	Baratier	1	162	98	1,1	50	11	93
	Crevoux	2	216	110	0,8	46	10	29
	Crevoux	2	226	153	1,0	38	9	65
	Réotier	2	160	119	1,1	52	11	108
Haute Tinée	Isola	2	143	116	1,3	53	12	79
	Saint Etienne de Tinée	1	132	156	1,6	52	11	94
	Isola	1	116	122	1,7	57	13	128
Haut Verdon et Haute Bléone	Thorame Haute	2	87	114	2,2	42	9	55
	Villars Colmars	1	218	145	0,9	61	12	56
	Villars Colmars	1	153	118	1,3	57	13	115
Queyras	Chateau Ville Vieille	2	184	122	1,0	55	12	83
	Aiguilles	1	219	112	0,9	53	11	87
Ubaye	Jausiers	1	106	114	1,6	40	9	77
	Saint Paul sur Ubaye	2	204	109	0,8	55	11	61
Total			158	122	1,3	50	11	1438

7.2 Corrélation entre propriétés mécaniques et arbres sur pied

Trois types de critères ont été pris en compte pour établir des relations entre l'arbre et les propriétés mécaniques du bois, il s'agit :

- des conditions de croissance dans lesquelles l'arbre a poussé (*indice de fertilité, altitude*),
- des caractéristiques propres à l'arbre (*circonférence à 1,30 m, âge, forme, statut et branchaison*)
- des caractéristiques de l'avivé (*avivé sur quartier, faux quartier ou dosse et hauteur de prélèvement*).

Chaque critère caractérisant l'arbre a été pris individuellement et comparé aux propriétés mécaniques (contrainte à la rupture, module d'élasticité et masse volumique) pour en établir des relations. En voici les résultats :

Tableau 26 : Matrice de corrélation propriétés mécaniques arbres sur pied

Matrice de corrélation avec toutes les pièces (significatif à partir de 0.15)							
	MOR	MOEL12	MOEG12	MV12	Age	c130	Altitude
MOR							
MOEL12	0.68						
MOEG12	0.74	0.91					
MV12	0.32	0.37	0.41				
Age	0.05	- 0.01	- 0.02	0.19			
c130	- 0.03	- 0.07	- 0.10	0.10	0.29		
Altitude	- 0.03	- 0.07	- 0.09	0.06	0.03	-0.02	

L'analyse de la matrice des corrélations permet de dire que la circonférence à 1,30 m et l'âge de l'arbre pris individuellement n'ont aucune influence sur les propriétés mécaniques du bois (il s'entend dans la gamme de l'échantillonnage d'arbres de circonférence supérieure à 110 cm).

Les variations liées à la fertilité, à la hauteur de prélèvement, au type de débit, à la forme, au statut, à la branchaison sont présentées dans les graphiques figurant en annexe 2. Chaque graphique fait ressortir pour chaque critère étudié l'effectif, la moyenne et la répartition de l'échantillon (pour 66% et 95% de la population) du module d'élasticité local ou de la contrainte à la rupture.

Il en ressort :

La hauteur de prélèvement de l'avivé dans l'arbre influence fortement la contrainte à la rupture et le module d'élasticité local. Un avivé du pied de l'arbre a de meilleures propriétés mécaniques qu'à son sommet.

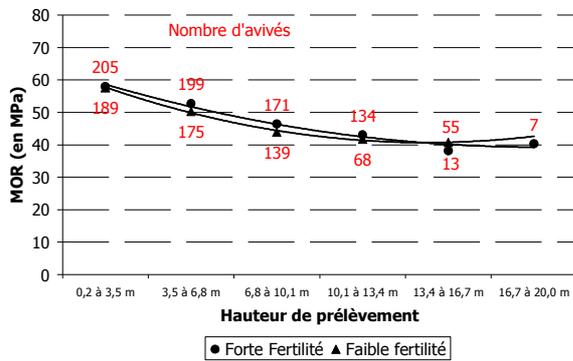
En revanche, La fertilité de la station n'a pas d'incidence significative sur les propriétés mécaniques du bois.

Sur les critères directement liés à l'arbre, la branchaison, le statut et la forme de l'arbre caractérisés avant exploitation ne font pas ressortir de différences significatives sur la contrainte à la rupture et le module d'élasticité.

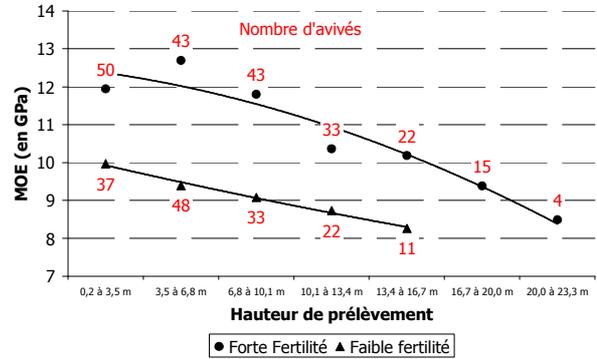
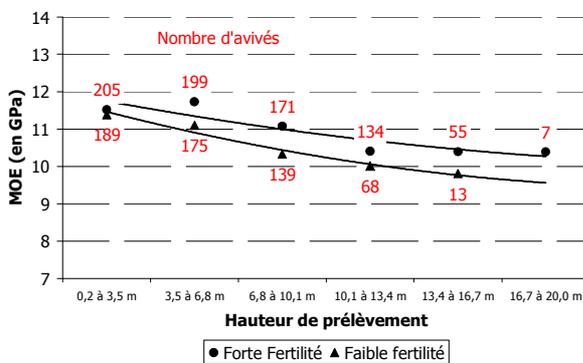
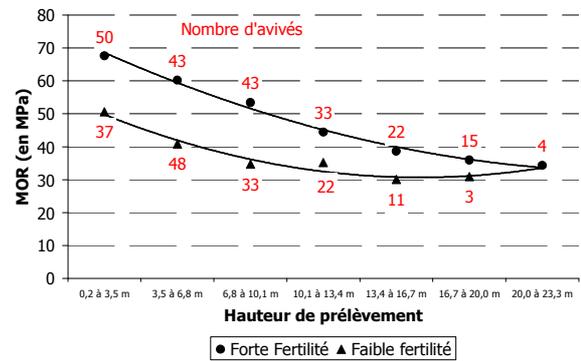
En conclusion, la hauteur de prélèvement est le seul critère physique qui influence significativement les propriétés mécaniques des avivés de Mélèze d'Europe. Ce seul critère pris individuellement n'étant pas satisfaisant pour prédire les propriétés mécaniques du bois, nous avons combiné les facteurs les plus pertinents pour prédire ces propriétés. Ainsi, nous avons constaté qu'en combinant la fertilité de la station (voir Graphique 1 : Courbe de fertilité et répartition des 18 placettes), le diamètre de l'arbre à 1,30 m et la hauteur de prélèvement des avivés, nous avons en moyenne une très bonne corrélation avec les caractéristiques mécaniques de la planche (la contrainte à la rupture et le module d'élasticité local).

Graphique 11 : Variations des propriétés mécaniques en fonction des paramètres sylvicoles

Classe de diamètre à 1,30 m : [30 à 40 cm]



Classe de diamètre à 1,30 m : [45 à 50 cm]



D'après ces quatre graphiques, nous pouvons dire que les arbres destinés à donner des avivés pour la construction se trouvent dans la plupart des peuplements de Mélèze d'Europe adulte, jusqu'à une hauteur de prélèvement de 10 m. Pour obtenir les caractéristiques mécaniques les plus favorables, les arbres seront pris dans les stations de forte fertilité d'un diamètre à 1,30 m supérieure à 45 cm et les billons seront pris jusqu'à une hauteur de 10 m. Le tableau suivant résume les différents cas de figure.

Tableau 27 : Prédiction des propriétés mécaniques en fonction de données sylvicoles :

Fertilité	Classe de diamètre à 1,30 m	Hauteur de prélèvement (en m)	MOR moyen prédit	MOE moyen Prédit	Prédiction des propriétés mécaniques
Forte	[30,40]	0 à 7	55	12	Très favorable
		7 à 10	46	11	Favorable
		10 à 20	41	10	Moyen
Faible	[30,40]	0 à 7	54	11	Favorable
		7 à 10	44	10	Moyen
		10 à 20	41	10	Moyen
Forte	[45,50]	0 à 7	64	12	Très favorable
		7 à 10	53	12	Très favorable
		10 à 20	40	10	Moyen
Faible	[45,50]	0 à 7	46	10	Moyen
		7 à 10	35	9	Défavorable
		10 à 20	32	9	Défavorable

8 Les classements

A partir des propriétés mécaniques de cette essence décrites précédemment, il importe de savoir dans quelle mesure elle peut être au mieux valorisée pour une utilisation en structure. Deux méthodes de classement structure existent (*voir annexe 1*) qui définissent des classes de plus ou moins grandes performances mécaniques. Ces classes sont destinées aux bureaux d'étude, qui ne se soucient ni de l'essence ni de la méthode de classement quand ils effectuent leurs dimensionnements. Ainsi, le scieur choisira la méthode de classement selon qu'il veuille extraire le maximum de sciages dans les classes de plus grandes performances mécaniques où qu'il réponde aux exigences de ses acheteurs. On abordera ici successivement le classement visuel et le classement par machine qui seront comparés au classement dit optimal correspondant au vrai potentiel mécanique des pièces.

8.1 Le classement visuel (norme française NF B 52-001)

Le Mélèze d'Europe n'étant pas encore pris en compte dans la norme française NF B 52 001, ce chapitre a pour but de proposer l'intégration de cette essence dans la norme et de quantifier les critères à prendre en compte pour séparer les différentes classes.

Le tableau ci-dessous donne le rendement des avivés Mélèze dans les différentes classes de la norme sur la base des critères visuels définies pour le Sapin et l'*Epicéa* (*voir annexe 1*). Ce tableau intègre aussi le calcul des valeurs de contrainte, de masse volumique admissibles et de module de déformation du Mélèze dans les différentes classes pour voir si elles sont respectées.

Tableau 28 : Classement visuel NF B 52-001 (Sapin, Epicéa) et propriétés mécaniques

Les classes	MOR (<i>fractile à 5%</i>)	MOEL (<i>moyenne</i>)	MV (<i>fractile à 5%</i>)	Nombre de pièces	Les rendements
ST-I	31 (<i>admis 30</i>)	12,2 (<i>admis 12</i>)	516 (<i>admis 380</i>)	78	5%
ST-II	26 (<i>admis 24</i>)	11,4 (<i>admis 11</i>)	522 (<i>admis 350</i>)	497	35%
ST-III	25 (<i>admis 18</i>)	10,6 (<i>admis 9</i>)	512 (<i>admis 320</i>)	549	38%
Rejet	23	9,9	504	315	22%
Total				1439	100%

Si les valeurs mécaniques admissibles dans les différentes classes sont respectées, on constate que les rendements sont très médiocres compte tenu du potentiel mécanique de cette essence. Ainsi le classement visuel génère seulement 5% de pièces dans la classe correspondant au plus fort potentiel mécanique (C30) et trouve 78% des pièces utilisables en structure.

Le croisement des informations classement optimal et classement visuel nous montre que les critères visuels utilisés pour le classement peuvent être changés (augmentation de la tolérance au niveau grosseur de nœuds par exemple) sans risquer d'être en dessous des valeurs mécaniques admissibles par classe compte tenu du fort déclassement des pièces C30.

Tableau 29 : Interactions classement optimal et visuel NF B 52-001 (Sapin, Epicéa)

	ST I	ST II	ST III	Rejet	Total
C30	7%	39%	37%	17%	876
C24	0%	0%	0%	0%	492
C18	3%	27%	41%	29%	492
Rejet	1%	24%	37%	38%	71
Total	5%	35%	38%	22%	1439

Ainsi, en vue de rendre la classe ST I économiquement acceptable (rendement >10%) l'intégration de cette essence dans la norme NF B 52-001 pourrait proposer les critères de classement visuel suivant :

Tableau 30 : Adaptation des classes structure (norme NF B 52-001) dans le cas du Mélèze

Classes	Correspondance Classes de résistance	Largeur de cernes (mm)	Diamètre des nœuds maxi toléré sur face (mm)	Diamètre des nœuds maxi toléré sur rive (mm)
ST I	C 30	≤ 6	≤ 1/4 de la largeur et ≤ 35 mm	≤ 2/3 de l'épaisseur et ≤ 40 mm
ST II	C 24	≤ 8	≤ 1/2 de la largeur et ≤ 75 mm	
ST III	C 18	≤ 10	≤ 3/4 de la largeur et ≤ 100 mm	

Les rendements par classe visuelle deviendraient les suivants :

Tableau 31 : Classement visuel NF B 52-001 (Mélèze) et propriétés mécaniques classes ST

Les classes	MOR (fractile à 5%)	MOEL (moyenne)	MV (fractile à 5%)	Nombre De pièces	Les Rendements
ST-I	30 (admis 30)	12,2 (admis 12)	517 (admis 380)	178	13%
ST-II	26 (admis 24)	11,0 (admis 11)	521 (admis 350)	709	49%
ST-III	24 (admis 18)	10,6 (admis 9)	502 (admis 320)	237	16%
Rejet	23	9,9	504	315	22%

Total				1439	100%
--------------	--	--	--	-------------	-------------

Ce dernier tableau est l'optimum au niveau rendement des classes en fonction de critères visuels tout en gardant des valeurs mécaniques admissibles. Si l'on ne réduit pas le rejet, les classes ST I et ST II sont mieux valorisées. L'ensemble de ces deux classes atteint 62%.

8.2 Le classement structure par machine (norme européenne EN 519)

Les tableaux ci-dessous comparent l'efficacité du classement des sciages avec les machines suivantes :

- Stress Grader (*flexion 3 points en continu*)
- Bing (*méthode vibratoire*)
- Rayon X

Le mode de fonctionnement de ces différentes machines est décrit *dans les annexes 4,5 et 6*

Tableau 32 : Rappel des rendements du classement optimal

Classement Optimal	MOR	MOE	MV	Effectif	Rendement
C30	32	12,0	527	961	61%
C18	22	9,0	504	552	35%
Rejet	17	6,7	505	63	4%
Total				1576	100%

Tableau 33 : Rendements du classement machine "Stress grader"

Stress Grader	MOR	MOE	MV	Effectif	Rendement
C30	34	12,3	536	781	49%
C18	22	9,5	502	784	50%
Rejet	21	6,9	505	10	1%
Total				1575	100%

Tableau 34 : Rendements du classement machine "Bing" module Timoshenko

Bing	MOR	MOE	MV	Effectif	Rendement
C30	35	12,3	541	795	51%
C18	22	9,3	501	756	48%
Rejet	18	6,6	504	13	1%
Total				1564	100%

Tableau 35 : Rendements du classement machine "rayon X"

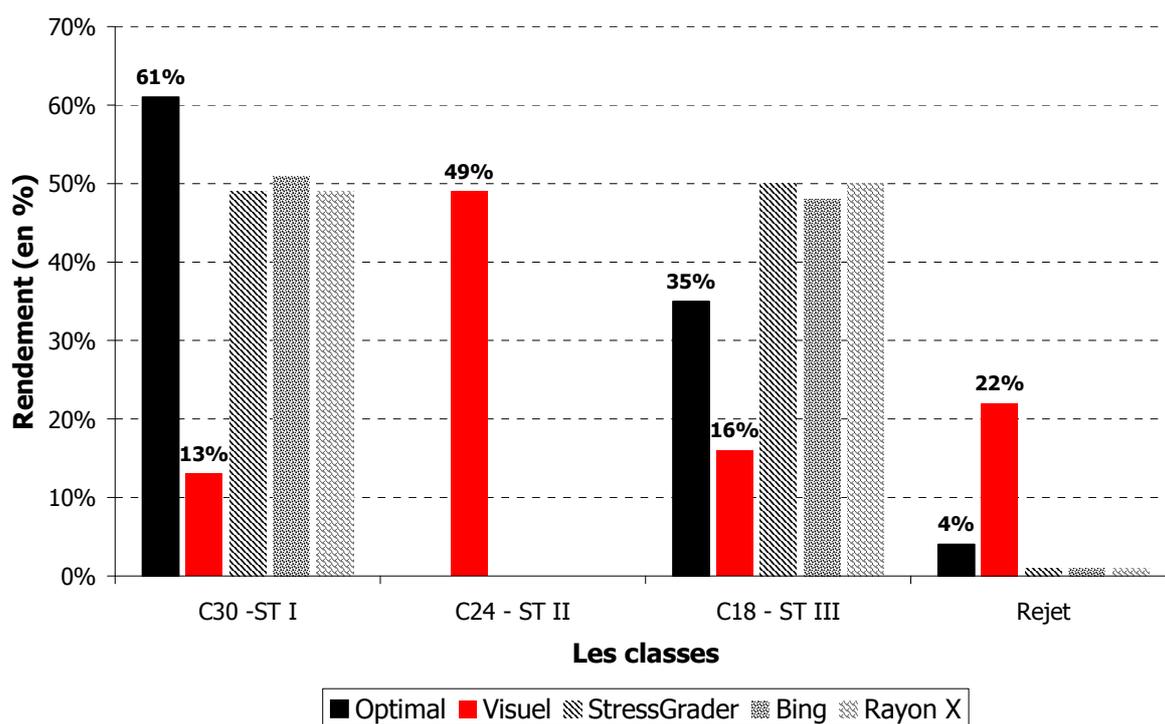
RX	MOR	MOE	MV	Effectif	Rendement
C30	33	12,1	532	770	49%
C18	23	9,8	504	797	50%
Rejet	18	7,6	505	6	1%
Total				1573	100%

Les rendements obtenus avec les différentes machines de classement sont très similaires et très proches des rendements optimaux. Ce type de classement correspond à la meilleure valorisation du potentiel mécanique des avivés de Mélèze.

8.3 Interaction classement optimal, visuel et machine

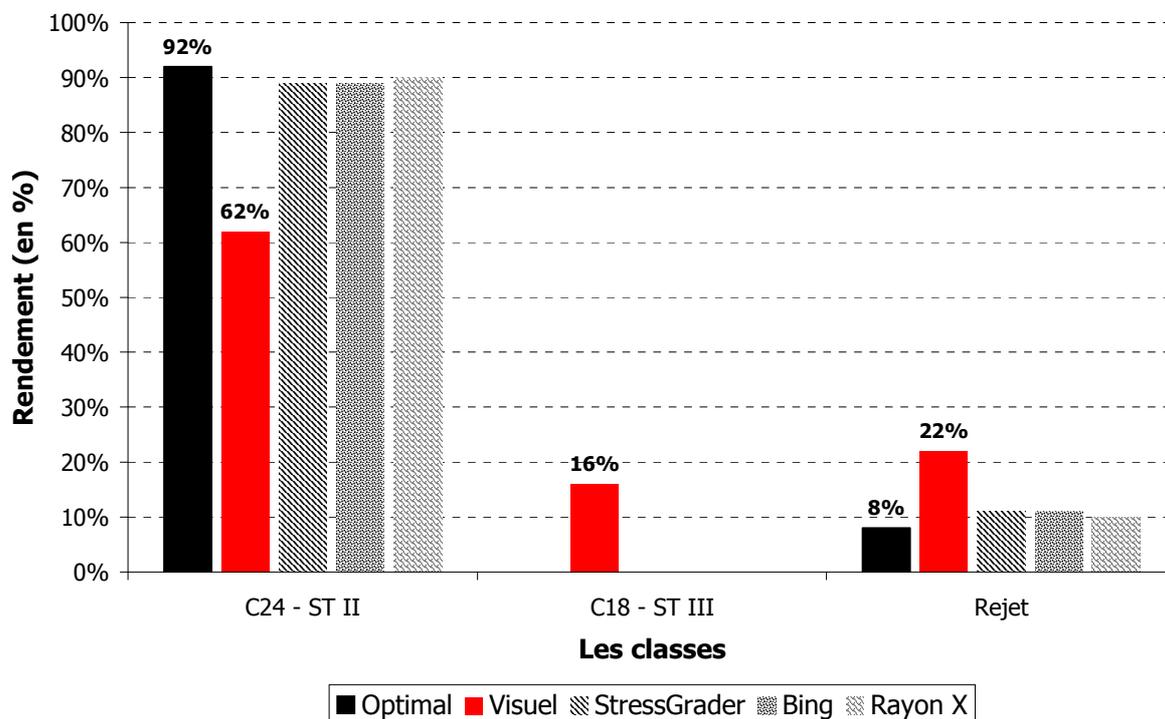
Le graphique ci-dessous compare les rendements pour les différentes machines de classement et les classements optimal et visuel proposés.

Graphique 12 : Rendement classement optimal, visuel proposé et classements machines



- ↪ **Quelle que soit la machine employée, le pourcentage de pièces en rejet est inférieur à 4%,**
- ↪ **Quelle que soit la machine de classement la valorisation des sciages à forts potentiels mécaniques est supérieure au classement visuel.**

Graphique 13 : Rendement des classements sur deux classes (C24-ST II ; C18-ST III)



Si les exigences du marché ne portent que sur les deux classes de résistances les plus basses du classement structure (C24 – ST II ou C18 – ST III) le classement machine reste le plus intéressant en terme de valorisation des produits de sciage. Cependant, le classement visuel peut être intéressant d’un point de vue économique étant donné l’investissement que représente une machine de classement.

Conclusion

Les caractéristiques mécaniques et physiques du Mélèze d'Europe ont été mesurées sur 160 arbres dans la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur sur 7 régions forestières différentes. Ces 160 arbres ont donné 1820 avivés en dimensions commerciales qui ont permis de réaliser les essais physiques et mécaniques afin de déterminer l'aptitude à l'emploi du Mélèze d'Europe en structure.

Les caractéristiques mécaniques et physiques du Mélèze d'Europe

Les trois critères pour établir les classes de résistance (masse volumique, module d'élasticité et contrainte à la rupture) sont élevés, ce qui confèrent à cette essence de très bonnes propriétés mécaniques dans l'ensemble.

Les largeurs de cernes sont les plus faibles de toutes les essences résineuses étudiées jusqu'à présent (1,3 mm en moyenne). Cela s'explique par les conditions de croissance montagnarde avec une saison de végétation courte. Cependant l'accroissement de cette essence est plus important à faible altitude. La nodosité est forte et le bois présente de nombreuses poches de résine souvent de quelques millimètres mais pouvant être assez longues (jusqu'à 15 cm). Les nœuds et les poches de résine ont peu d'incidence sur les propriétés mécaniques.

Les classements

La corrélation entre les critères visuels et les caractéristiques mécaniques est moyenne et n'exprime pas tout le potentiel de l'essence. Ainsi, si l'on se base uniquement sur les critères visuels pour classer les avivés suivant leur performance mécanique, seulement 78% d'entre eux sont susceptibles d'être utilisés dans un emploi en construction alors que l'optimum se situe à 96%. Cette remarque qui se vérifie pour la plupart des essences justifie l'évolution à terme vers un classement machine.

Avec un classement machine, la proportion de pièces utilisables en structure est sensiblement du même ordre que l'optimal et les classes de plus hautes performances mécaniques ont des meilleurs rendements.

Intégration du Mélèze d'Europe à la norme de classement structure NF B 52-001

Toutes les connaissances nécessaires à l'intégration de cette essence dans la norme de classement visuel sont réunies. Cette intégration pourra être présentée lors de la prochaine révision de la norme en 2001.

L'évolution actuelle des normes (à l'échelle européenne) aura pour conséquence de rendre obligatoire le classement (visuel ou machine) des bois utilisés en structure. La garantie de la réalisation effective de cette opération passe ainsi par le marquage des classes sur les bois, opération devenant elle aussi obligatoire. Avec cette étude, le Mélèze d'Europe dispose de sérieux atouts pour effectuer cette opération et se placer sur le marché européen de la construction.

Lexique

- **Aubier** : Partie externe d'un arbre correspondant aux couches les plus récemment formées. Souvent coloration distincte du bois parfait (ou bois de cœur). Comporte des cellules vivantes où circule la sève brute.
- **Accroissement courant** : Il s'agit de l'accroissement périodique annuel moyen du volume sur écorce, calculé sur la période de 5 ans précédant l'année civile du sondage.
- **Avivé** : Bois scié en forme de parallépipède rectangle ne présentant que de vives arêtes, sauf tolérance de flaches prévues par les normes.
- **Bois d'été** : Pour les régions tempérées de l'hémisphère Nord, bois final, généralement constitué par des tissus denses, compacts, de couleur foncée (à l'opposé du bois de printemps).
- **Bois sur dosse** : Se dit d'une pièce de bois débité, dont la face la plus proche du cœur de l'arbre rencontre deux fois un même cerne.
- **Bois sur faux quartier** : Se dit d'une pièce de bois débité, dont la face orientée vers le cœur de l'arbre forme, avec les cernes, un angle inférieur à 45° sur une partie de sa largeur, sans qu'un même cerne apparaisse deux fois sur la face.
- **Bois de printemps** : Pour les régions tempérées de l'hémisphère Nord, bois initial, constitué par des tissus à parois minces et poreux, de couleur claire (à l'opposé du bois d'été).
- **Bois sur quartier** : Se dit d'une pièce de bois débité dont la face orientée vers le cœur de l'arbre forme avec les cernes un angle supérieur à 45°.
- **Calicole** : Qui prospère sur un sol riche en calcaire.
- **Cerne** : En section transversale, couche d'accroissement dans le bois.
- **Contrainte à la rupture en flexion** : Traduit la capacité d'une poutre à résister à un effort dans le plan perpendiculaire aux fibres conduisant à la ruine de la poutre.
- **Eprouvettes de qualification** : bois sans défaut de petites dimensions testées en flexion, traction longitudinale et perpendiculaire, compression axiale, cisaillement et fendage. A ces essais, sont associées des mesures de largeur de cernes, d'humidité, de masse volumique et de retrait. Tous ces éléments, liés aux comportements physiques et mécaniques du matériau exempt de singularité et de défaut, permettent de qualifier intrinsèquement l'essence, indépendamment de l'influence des nœuds notamment.
- **Eprouvettes en dimensions commerciales** : bois façonné en dimensions

commerciales qui subit des tests de flexion en vue de la détermination du module d'élasticité et de la contrainte de rupture. La largeur des cernes, la masse volumique et la nodosité sont mesurées avant de réaliser des tests mécaniques.

- **Eurocode** : Ensemble de normes pour le calcul structural et géotechnique des ouvrages de bâtiment et de génie civil.
- **Eurocode 5** : Norme expérimentale applicable à la conception et au calcul des bâtiments et des ouvrages de génie civil en bois.
- **Facteurs édaphiques** : facteurs externes liés au sol et qui ont une influence profonde sur la répartition des êtres vivants.
- **Fractile à 5%** : Moyenne de 5% des valeurs les plus faibles d'un échantillon (base de classement pour la contrainte à la rupture et la masse volumique de la norme EN 338)
- **Hauteur dominante** : Notion sylvicole importante parce que directement liée à la classe de fertilité de la station, est la hauteur moyenne des 100 plus grosses tiges du peuplement à l'hectare.
- **KAR** : Projection de nœuds sur la section d'une pièce.
- **Module d'élasticité en flexion** : Définit la force nécessaire à déformer une poutre pour une sollicitation dans le plan perpendiculaire aux fibres. Le module peut être local (flèche de l'arc central mesurée sur le tiers central) ou global (flèche de l'arc mesuré sur la totalité de la poutre). *Plus la poutre résiste à la déformation plus le module est élevé. Le module d'élasticité local ainsi que la contrainte à la rupture et la masse volumique sont les trois critères retenus pour effectuer le classement structure (EN338)*
- **Projection de nœuds sur face et rive** : concentration maximale de nœuds ou groupe de nœuds sur les quatre cotés de l'avivé (les cotés larges étant les faces et les cotés plus étroits étant les rives). Soit elle est exprimée en mm et correspond à la largeur de nœuds maximale trouvée sur l'avivé où elle est exprimée en pourcentage et correspond à la largeur de nœuds maximale trouvée et ramenée à la largeur de la pièce.
- **Texture** : Dans les bois hétérogènes, rapport de la largeur de la zone de bois d'été (dit aussi bois final), à la largeur totale de la couche d'accroissement.
***Texture faible** : se dit des bois hétérogènes où la proportion de bois d'été dans la couche annuelle est faible.*
***Texture forte** : se dit des bois hétérogènes où la proportion de bois d'été dans la couche annuelle est grande.*

Bibliographie

Anne Bary-Lenger, Jacques Pierson, Jacques Poncelet

"Transformation utilisation et industries du bois en Europe"
Editions du Perron 1999 (555 p)

C.A.U.E des Hautes-Alpes

« Construire et vivre avec le bois dans les Hautes-Alpes »
Plaquette

Chambre syndicale des Exploitants forestiers et des scieurs des Alpes-de-Haute-Provence et des Hautes-Alpes

"Mélèze des Alpes du Sud, Durable par nature"
Plaquette édité par la Chambre syndicale des Exploitants forestiers et des scieurs des Alpes-de-Haute-Provence et des Hautes-Alpes

Centre Technique du Bois et de l'Ameublement

"Choisir les sciages résineux... C'est simple, c'est facile : suivez la norme européenne"
Plaquette 1999 édité par le CTBA-AQCEN

L. Lanier

"Précis de sylviculture"
Ecole Nationale du Génie rural des eaux et forêts 1986 (468 p)

Ministère de l'Agriculture et de la Forêt

"La Forêt et le bois en Provence-Alpes-Côte-d'Azur"
Document 1990, 48 p.

Patrick Joyet, Rémy Cholat, Frédéric Rouger, Jean-Denis Lanvin

"Etude des caractéristiques mécaniques du Pin sylvestre en France"
Etude CTBA 1999 (36 p)

Rémy Cholat

"Mélèze : Bientôt reconnu pour la construction"
CTBA info n°76 1999 (3 p)

Société forestière de Franche-Comté et des provinces de l'Est

"Vade-mecum du forestier"
Société forestière de Franche-Comté et des provinces de l'Est 1983 (346 p).

Annexe 1 : Le classement structure des bois résineux

Rappel de l'objectif

L'utilisation d'un bois en usage structurel est conditionnée à la connaissance de ses propriétés mécaniques. Ainsi le classement structure a pour but de proposer différentes classes où les bois seront triés en lots homogènes de même résistance en vue d'optimiser leur utilisation en construction. Pour réaliser ce classement, deux méthodes existent :

- La méthode visuelle
- La méthode par machine

Méthode visuelle :

Il s'agit de définir une classe de résistance des sciages destinés à des emplois en structure de façon simple et utilisable sans appareillages spécifiques. Ainsi, des critères visuels basés sur l'aspect du bois, le débit pratiqué, les altérations biologiques et les déformations géométriques des sciages ont été mis en correspondance avec des classes de résistances.

Trois classes visuelles ont été retenues (ST-I, ST-II ou ST-III) et définies dans la norme NF B 52-001 (1998). Chacune de ces classes est associée à une classe de résistance.

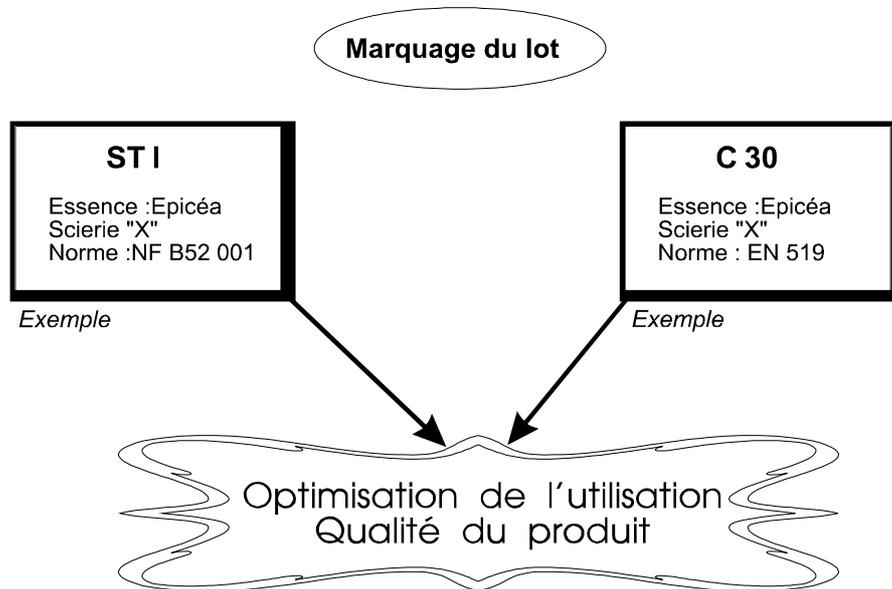
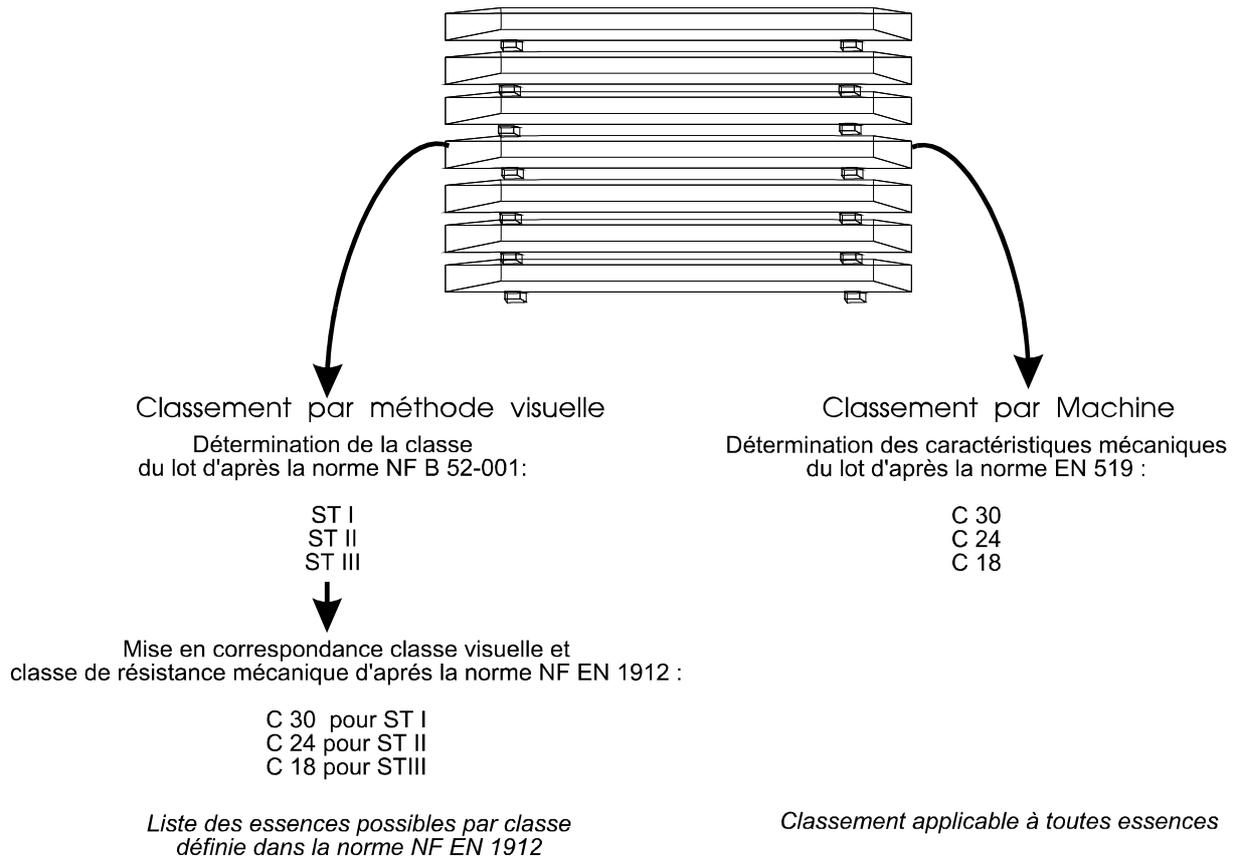
Méthode par machine :

Il s'agit de produire directement les classes de résistances (C 40, C 35, C 30, C 24 et C 18) en mesurant des caractéristiques mécaniques par contrôle non destructifs. Le classement s'en trouve optimisé vers les qualités supérieures. En effet, un sciage déclassé en ST-II suivant des critères visuels de nodosité ne correspond pas forcément à sa véritable valeur en résistance mécanique. Cette approche est étudiée au CTBA, et montre des différences significatives entre les deux classements.

Les avantages et inconvénients des deux méthodes

	Classement en structure	
	<i>Visuel</i>	<i>machine</i>
Rapidité d'exécution	+	++
Optimisation du classement	-	++
Coût du matériel de classement	++	-
Coût du classement	+	+
Homogénéisation des mesures	-	++

Démarche à suivre



1 – Le classement structure des bois par méthode visuelle

(d'après la norme NF B 52-001 de décembre 1998)

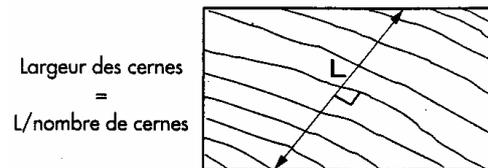
Les mesures du classement visuel

Ce paragraphe rappelle les principales règles pour mesurer les nœuds, la largeur de cernes, la pente de fil et les déformations.

Mesure de la largeur des cernes

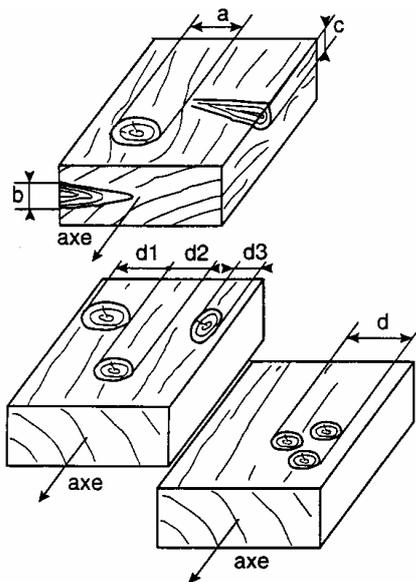
La largeur des cernes est mesurée aux deux extrémités de la pièce. La valeur retenue est la moyenne de ces deux mesures.

La mesure s'effectue selon le schéma suivant :



Mesure des nœuds

Le diamètre des nœuds est mesuré perpendiculairement à l'axe de la pièce.



Nœuds groupés :

Les nœuds sont dits groupés si la distance d'entraxes entre deux ou plusieurs nœuds est inférieure à 15 cm. Dans ce cas, on additionne les diamètres de chacun des nœuds de la même façon, perpendiculairement à l'axe de la pièce et en tenant compte de la pente du fil.

Le tableau suivant reprend les mesures et des critères à prendre en compte pour classer le sciage (*le principe des mesures des critères est décrit dans la norme EN 1310*) :

Classes		ST-I ⁽¹⁾	ST-II	ST-III
Essences	CRITERES			
Largeur des cernes d'accroissement (mm)				
Sapin – Epicéa – Pins		≤ 6	≤ 8	≤ 10
Douglas		≤ 8	≤ 10	≤ 12
Diamètre des nœuds				
Sapin – Epicéa – Douglas	Sur la face ⁽²⁾	∅ ≤ 1/6 de l et ≤ 30 mm	∅ ≤ 1/2 de l et ≤ 50 mm	∅ ≤ 3/4 de l et ≤ 100 mm
	sur la rive	∅ ≤ 2/3 de l'épaisseur de la rive ∅ ≤ 40 mm		
Pins	sur la face ⁽²⁾	∅ ≤ 1/10 de l et ∅ ≤ 15 mm	∅ ≤ 1/3 de l et ∅ ≤ 50 mm	∅ ≤ 2/3 de l et ∅ ≤ 100 mm
	sur la rive ⁽³⁾	∅ ≤ 1/3 de e et ∅ ≤ 15 mm	∅ ≤ 1/2 de e et ∅ ≤ 30 mm	∅ ≤ 1/2 de e et ∅ ≤ 30 mm
Fentes ⁽⁴⁾				
Toutes essences	traversantes	longueur ≤ deux fois la largeur de la pièce		longueur ≤ 600 mm
	non traversantes	longueur ≤ moitié de la longueur de la pièce		non limitée
Toutes essences		non admise	Grosse poche de résine admise si < 80 mm	
Entre- écorce				
Toutes essences		non admise		
Pente de fil (en fraction)				
Toutes essences	locale	1:10	1:4	
	générale	1:14	1:6	
Flaches				
Toutes essences	longueur	non admises	< 1/3 de la longueur de la pièce et < 100 cm	
	largeur		< 1/3 de l'épaisseur de la rive	
Altérations biologiques				
Toutes essences	bleu - traces de gui	Admis		
	piqûres noires	Admises si elles apparaissent sur une seule face		
	échauffure	Non admise		
Déformation maximale en mm pour une longueur de 2 m				
Toutes essences	flèche de face (mm)	< 10		< 20
	flèche de rive (mm)	< 8		< 12
	Gauchissement	1 mm / 25 mm large		2 mm / 25 mm large
	Tuilage	pas de restrictions		

Pour le Douglas uniquement dans les sections inférieures à 50*150 mm, les pièces contenant de la moelle sont exclues et donc déclassées en ST II. Cette mesure tient compte de la relative jeunesse du massif de cette essence, et pourra donc être révisée lorsque des éléments nouveaux le permettront,

l = largeur de la pièce,

e = épaisseur de la rive,

La longueur des fentes est reliée à l'humidité et par conséquent, les limites données au tableau sont seulement applicables au moment du classement.

2 - Le classement structure des bois par méthode machine

(d'après la norme EN 519 de mars 1998)

L'importance grandissante de l'assurance qualité et la demande croissante d'un matériau bois de haute qualité ont conduit à un intérêt accru pour le classement par machine et favorisé le développement de nouvelles machines ayant des précisions de prédiction plus importante.

La plupart des machines de classement en service à ce jour sont aussi appelées machines de flexion. Elles déterminent un module d'élasticité moyen en flexion 3 points sur de faibles portées. La détermination du module d'élasticité est également possible par des méthodes autres que la flexion, telles que les vibrations et les ultrasons.

Dans les techniques optiques, les quatre faces du bois sont examinées simultanément par caméra vidéo. Les nœuds sont détectés via les variations de couleurs et l'analyse de la texture environnante permet de les différencier des autres caractéristiques qui ne sont pas corrélées à la résistance, telles que la saleté ou les tâches. La détermination des proportions en surface des nœuds s'effectue par des techniques d'analyse d'image.

L'utilisation de la technologie des rayons X dans les machines de classement est intéressante car elle présente l'avantage d'augmenter considérablement la vitesse de défilement des bois. Chaque information obtenue correspond à une mesure de masse surfacique qu'il est facile de traduire en masse volumique. Les nœuds peuvent ainsi être déterminés par les techniques de rayonnement dans la mesure où la masse volumique du nœud est en moyenne 2,5 fois supérieure à celle du bois normal.

Naturellement, plus l'efficacité d'une machine de classement est importante, plus son coût est élevé. La comparaison de différentes machines de classement avec le classement visuel doit prendre en compte le coût, le rendement matière, la performance et la vitesse de classement.

3 – Classes de résistances et classes visuelles

Les seules correspondances entre classes mécaniques et visuelles sont assemblées dans le tableau suivant (*EN 1912 de septembre 98*) :

Classe de résistances mécaniques selon l'EN 338	Classe visuelle
C 30	ST –I
C 24	ST –II
C 18	ST –III

Les principales essences résineuses en France ont été affectées dans les trois classes de résistances après description suivant les modalités visuelles (cf tableau). Quelques-unes sont en cours de classement (Epicéa de Sitka, Mélèze d'Europe). Le tableau ci-dessous résume le classement actuel des essences :

Essences	ST –I	ST –II	ST –III
Sapin – Epicéa	X	X	X
Douglas		X	X
Pins ⁽¹⁾		X	X

⁽¹⁾ Pin sylvestre, Pin maritime, Pin noir, Pin laricio

Les caractéristiques mécaniques des classes de résistances (**EN 338 de 1995**)

Les valeurs des contraintes et des modules sont rassemblées dans la norme EN 338. Les valeurs de contraintes admissibles utilisables pour le calcul des structures sont calculées à partir d'un coefficient (2,275) en attendant la future norme NF P 21-400. Les valeurs présentées dans le tableau ci-dessous proviennent du cahier « Règles professionnelles bois lamellé collé » édité par IRABOIS :

Caractéristiques mécaniques ⁽¹⁾	C 30	C 24	C 18
	Contraintes admissibles (MPa ⁽²⁾)		
Flexion parallèle	13,2	11,0	8,0
Compression axiale	10,5	9,0	8,5
Traction axiale	8,0	6,0	5,0
Cisaillement longitudinal	1,3	1,1	0,9
Compression transversale	2,5	2,3	2,1
Traction transversale	0,20	0,20	0,13
	Modules conventionnels de déformation (MPa)		
Cisaillement	750	680	560
Longitudinal, effort tranchant inclus	12 000	11 000	9 000

(1) Les valeurs données correspondent à une humidité de bois de 12% qui est la référence européenne

(2) MPa : 1 MégaPascal \approx 10 kgf/cm²

4 – Les évolutions liées au classement structure des bois

Les obligations liées à la norme NF B 52-001

Chaque pièce de bois structurel classée et devant circuler au sein de l'Europe doit être marquée obligatoirement. Le marquage comportera au minimum les informations suivantes :

La classe visuelle (ST-I, ST-II ou ST-III) ou la classe mécanique (C 40, C 35, C 30, C 24 et C 18) selon l'utilisation de la méthode de classement (visuelle ou machine)

L'essence ou le groupe d'essences,

Le producteur,

La norme de référence du classement effectué (**NF B 52-001, EN 519...**),

Les utilisations possibles du bois en fonction des classes.

Afin d'optimiser l'utilisation des sciages classés, les utilisations possibles en structure des différentes classes sont indiquées dans le tableau ci-après :

CLASSES	ST-I – C 30	ST-II – C 24	ST-III – C 18
	Type de charpente		
Traditionnelle (grosses sections)			X
Industrielle (fermettes)		X	
Lamellé collé	X	X	

Intérêts du classement et les évolutions actuelles et à venir

Le classement visuel ou machine qualifiant la résistance des sciages pour une utilisation en structure présente plusieurs avantages. Ainsi le fait de qualifier et de certifier le produit de la même manière au sein de l'union européenne ouvre une opportunité aux scieries de développer leur marché à l'exportation. Pour les utilisateurs, le choix du produit à acheter est conditionné à l'utilisation qu'ils veulent en faire. De plus, le classement assure un suivi au niveau qualité du produit.

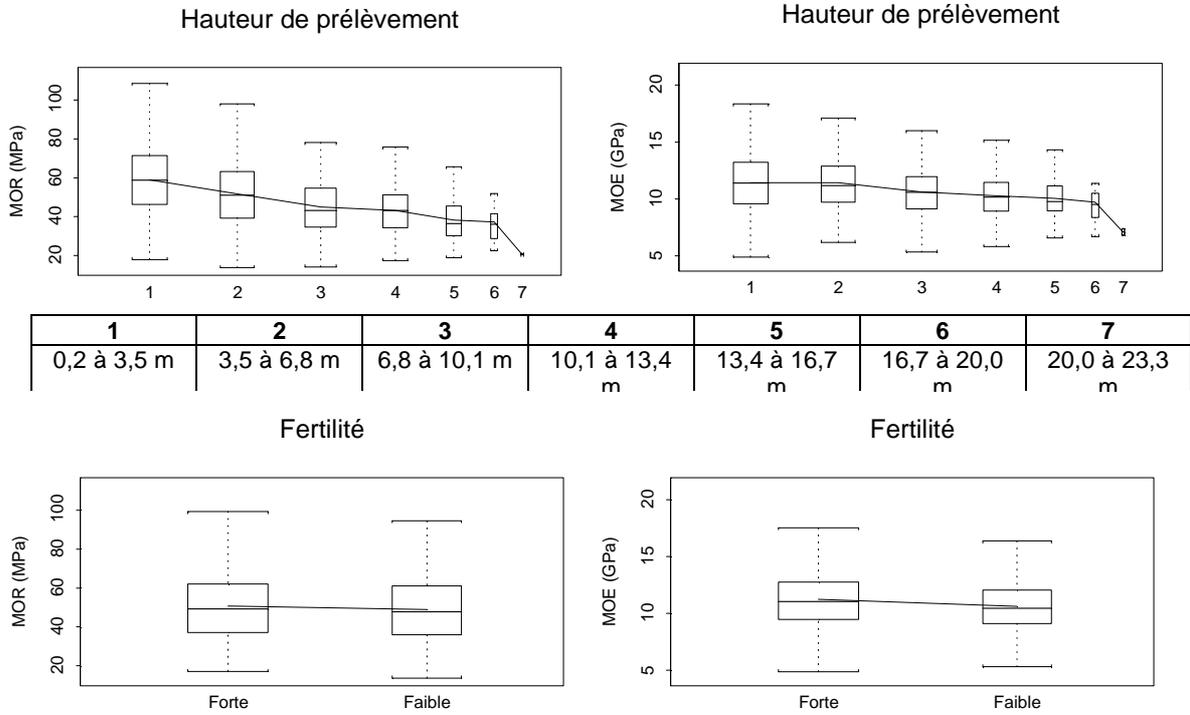
L'évolution majeure qui accompagne l'opération de classement concerne le marquage des pièces. Ainsi chaque pièce destinée à la construction au sein de l'union européenne devra être marquée obligatoirement (comme décrit précédemment).

Les principaux axes d'amélioration de la mise sur le marché des bois destinés à une utilisation en structure pourront concerner dans les années à venir :

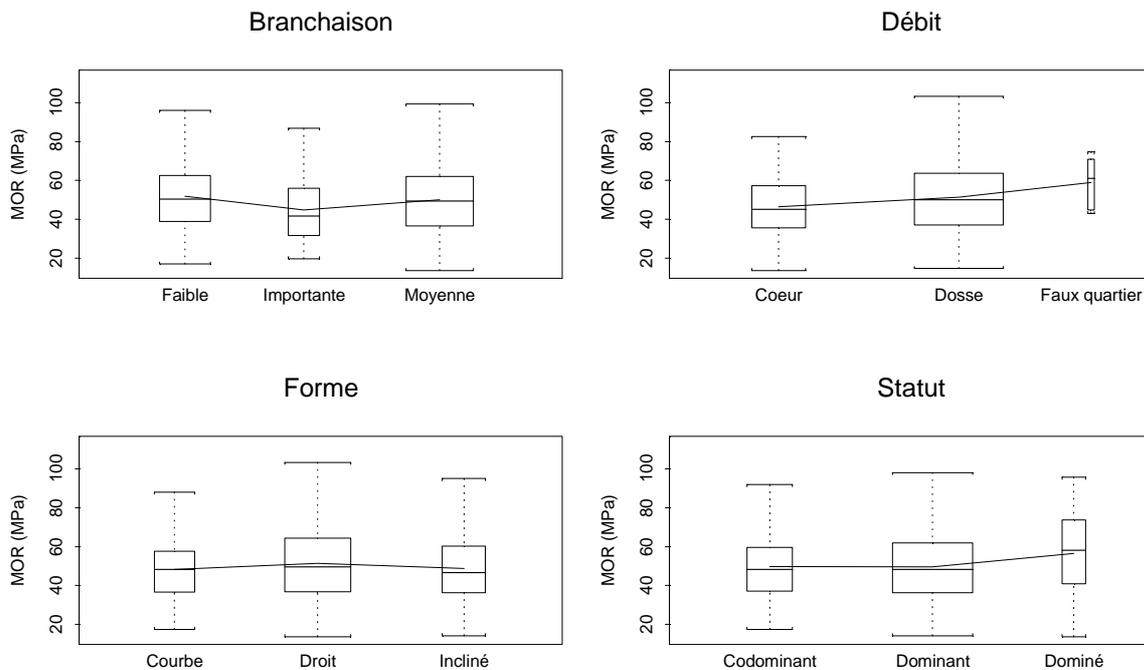
- Le classement visuel et mécanique des essences résineuses ne figurant pas encore dans la norme NF B 52-001 (Mélèze d'Europe)
- L'approche technico-économique du classement machine.

Annexe 2 : Variations des propriétés mécaniques

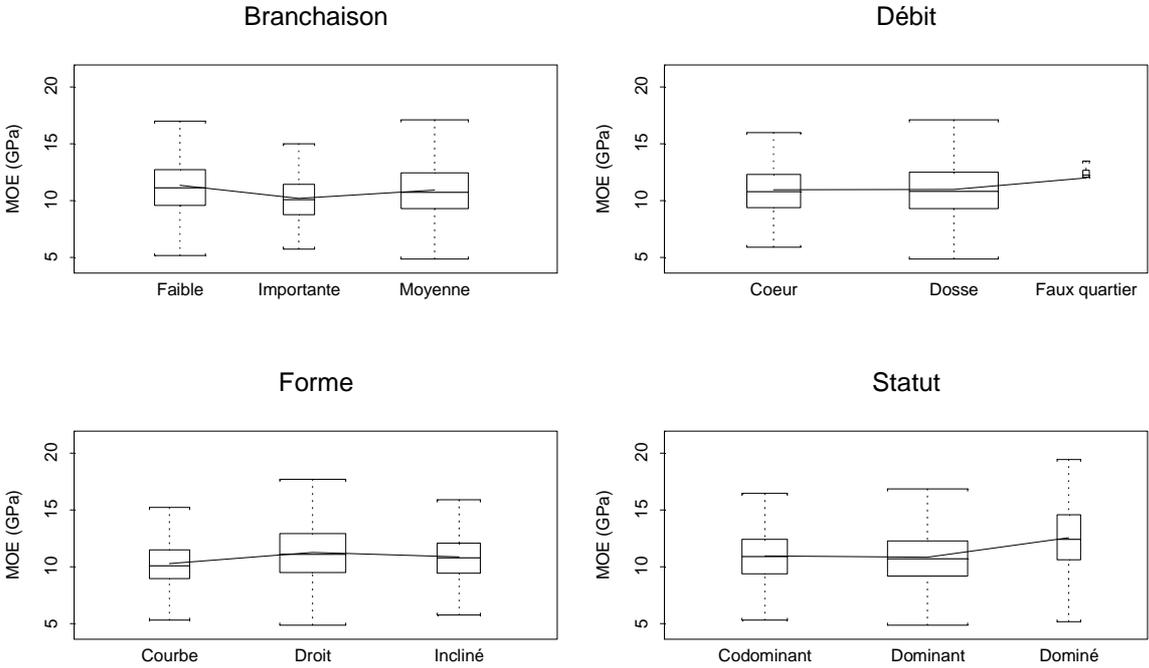
Variations des propriétés mécaniques en fonction de la hauteur de prélèvement dans l'arbre et de la fertilité de la placette



Variations des propriétés mécaniques (MOR) en fonction de la branchaison, du débit, de la forme et du statut de l'arbre



Variations des propriétés mécaniques (MOEL) en fonction de la branchaison, du débit, de la forme et du statut de l'arbre



Annexe 3 : Comparatif des principales propriétés de quelques résineux

Moyenne et écart type	Douglas	Pin laricio de Corse	Pin noir	Pin sylvestre	Sapin et Epicéa	Mélèze
Largeur des cernes (mm)	6,5	2,6	2,7	2,0	2,9	1,3
	1,8	1,3	1,3	0,8	1,3	0,6
Masse volumique à 12 % (Kg/m ³)	502	584	588	557	449	597
	51	78	67	57	38	49
Nodosité (proj. sur la face) (%)	47	35	45	35	33	40
	20	23	20	19	20	18
Nodosité (proj. sur la rive) (%)	49	35	45	40	42	39
	26	28	27	29	29	28
Nodosité (KAR total) (%)	33	23	29	25	21	36
	16	16	13	14	13	17
MOR (MPa)	41	51	42	44	44	50
	16	22	19	20	15	16
MOEL à 12% (GPa)	13,0	12,6	11,1	12,5	11,8	10,8
	4,0	3,9	3,3	3,8	2,7	2,2
MOEG à 12% (GPa)	12,3	12,4	10,9	12,0	11,2	10,0
	2,9	3,8	3,3	3,5	2,4	1,7

Annexe 4 : Machine de classement Bing



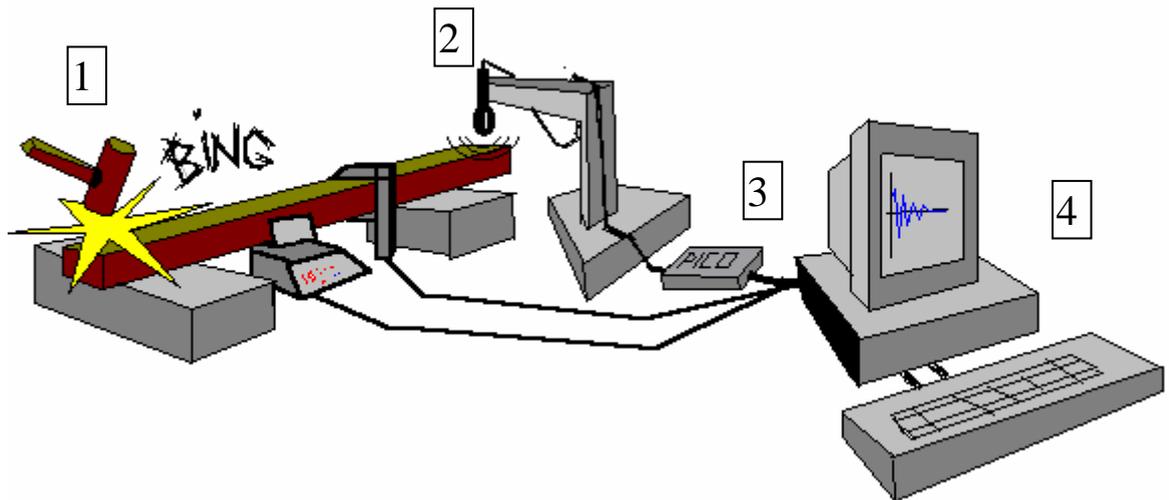
pico[®]
Technology Limited

BING : système de mesure non destructive des caractéristiques mécaniques du bois

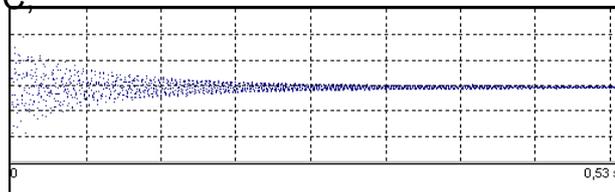
- ☞ Mesure rapide, fiable et sans contact avec la pièce testée des modules d'élasticité par analyse de vibrations,
- ☞ Mesure sur des pièces élancées de section régulière de dimensions quelconques,
- ☞ Simplicité d'installation et d'emploi,
- ☞ Utilisation sur n'importe quel type de PC (portable ou bureau),
- ☞ Alimentation par secteur ou batterie (le système est portable),
- ☞ Faible encombrement,
- ☞ Piloté entièrement par logiciel sous Windows (95 et 98),
- ☞ Permet par l'interfaçage, l'acquisition de données provenant d'une balance électronique et d'un pied à coulisse (mesure de densité),
- ☞ Gestion des données (enregistrement du signal numérisé, génération d'un fichier texte, transfert dynamique des données sous Excel...).

Votre contact :

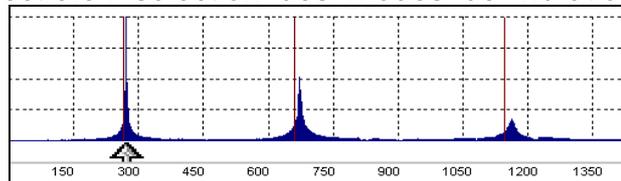
*Henri BAILLERES - CIRAD-Forêt - Programme Bois - Maison de la Technologie
73, rue J.F. BRETON - B.P. 5035 - 34032 MONTPELLIER Cedex 01 - FRANCE
Tel : +33 (0)4 67 61 44 51 - Fax : +33 (0)4 67 61 57 25 - E-mail : henri.bailleres@cirad.fr*



1. Percussion de la pièce en appui sur des supports en mousse (vibrations libres),
2. Acquisition du signal à l'aide d'un microphone,
3. Numérisation du signal par l'intermédiaire d'une carte externe spécifique connectée sur le port parallèle du PC,



4. Traitement des données par le logiciel BING qui effectue la séquence suivante :
 - ☞ Entrée de la masse et des dimensions de la pièce manuellement ou directement par l'interfaçage d'une balance et d'un pied à coulisse (5),
 - ☞ Transformée de Fourier rapide (FFT),
 - ☞ Analyse spectrale : sélection des modes de vibration (f_k est la k ème fréquence propre),



- ☞ Mesure des modules d'élasticité selon les méthodes de BERNOULLI et de TIMOSHENKO. Cette méthode a été étendue par le CIRAD-Forêt afin d'obtenir une mesure rapide et précise du module d'élasticité E et du module de cisaillement G à partir d'une expression linéaire : $y_k = \frac{E}{\rho} - \frac{E}{KG} x_k$ avec x_k, y_k fonction de f_k , de la géométrie et de la masse. ρ est la masse volumique et K le coefficient de forme.

Présentation du logiciel

The screenshot shows the BING software interface with several callout boxes:

- Le démarrage d'une acquisition s'effectue sur un simple click**: Points to the lightning bolt icon in the menu bar.
- Les paramètres de l'acquisition du signal sont tous ajustables.**: Points to the 'Paramètres de l'échantillonnage' section.
- Le traitement du signal et le calcul de la Transformée de Fourier sont réalisés automatiquement après percussion de la pièce étudiée.**: Points to the 'Analyse spectrale' section.
- Les différents paramètres de la pièce (masse, hauteur, largeur, etc. ...) peuvent être modifiés à n'importe quel moment de l'étude.**: Points to the 'Caractéristiques de l'éprouvette' section.

BING :

SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES

PIÈCES TESTÉES

- ➔ Sections constantes (poutres à section circulaire ou rectangulaire)

ACQUISITION

- ➔ Réglage par le logiciel du gain et du filtre anti-repliement,
- ➔ Signal sur une plage de 30 Hz à 20 KHz en 12 ou 16 bits (adaptable par le logiciel),
- ➔ Deux modes d'utilisation :
 - Sollicitation par percussion transverse pour l'obtention des modules d'élasticité et de cisaillement,
 - Sollicitation par percussion longitudinale pour l'obtention du module d'élasticité.

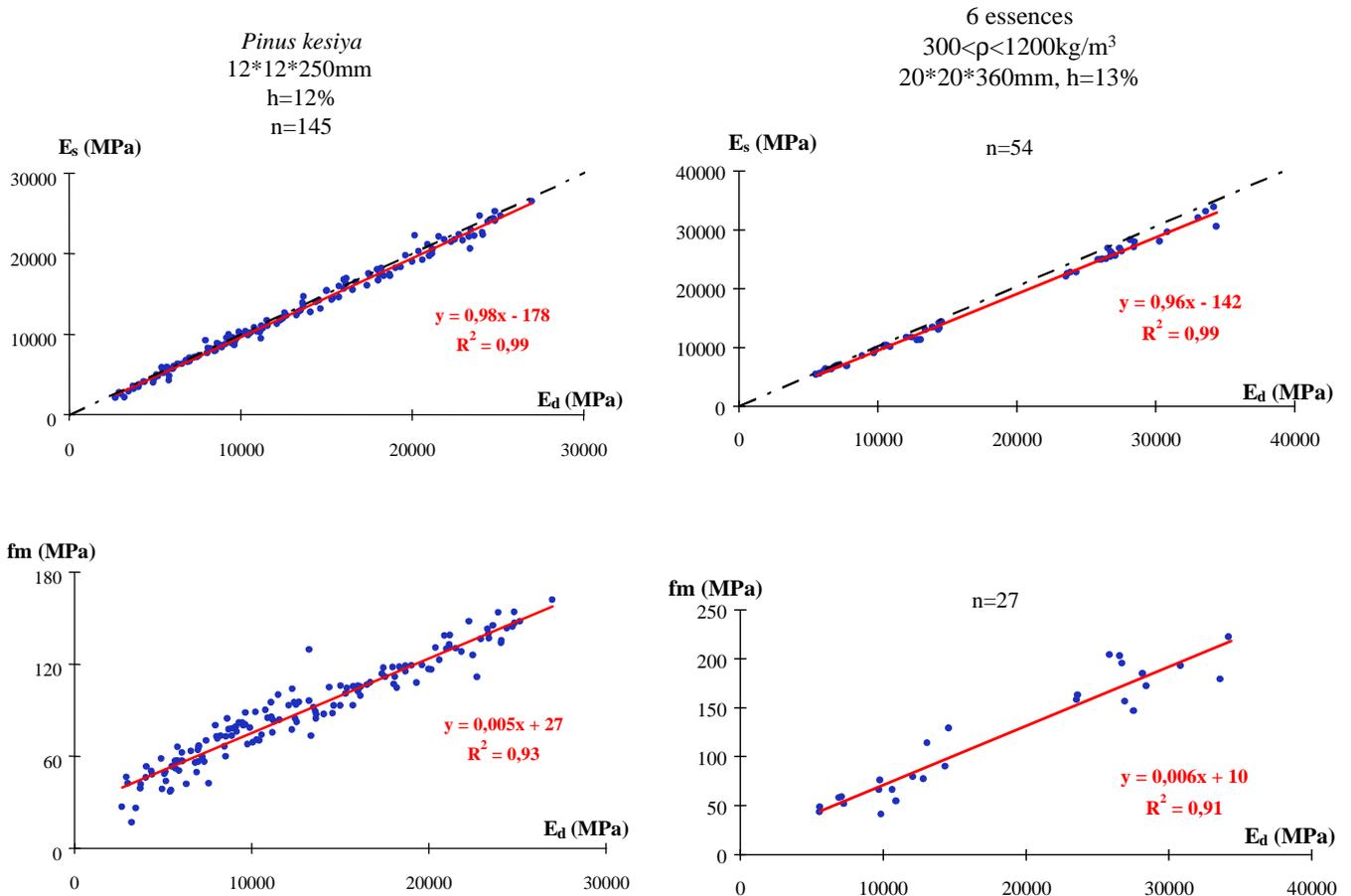
LOGICIEL

- ➔ PC Windows 95, 98 et NT. Configuration minimale requise: PC 486, 8 Mo de RAM,
- ➔ Transfert automatique des données dans Excel ou création de fichiers texte,
- ➔ Logiciel en français.

MODULES D'EXTENSIONS

- ➡ Adaptations possibles (sur demande) à différents types de sections, de matériaux, ou à l'analyse de l'onde élastique (par l'intermédiaire d'un accéléromètre sur une plage de 0.8 Hz à 10 KHz).
- ➡ Recherche automatique des fréquences propres du spectre.
- ➡ Recherche de défauts (Projet Ademe Derf : LAPEYRE).
- ➡ Panneaux.
- ➡ Poteaux (Projet France-Telecom).

***BING** : quelques comparaisons avec la méthode statique normalisée*



E_s est le module d'élasticité statique obtenu par un essai normalisé (norme française ou européenne pour les pièces en dimension d'emploi).

f_m est la résistance à la rupture obtenue par un essai normalisé (norme française ou européenne pour les pièces en dimension d'emploi).

E_d est le module d'élasticité dynamique obtenu par le système BING.

Annexe 5 : Machine de classement Stress grader

La machine stress grader "TECMACH" permet de mesurer la rigidité d'un matériau au défilé en imposant une déformation localisée.

La poutre est convoyée entre une paire de rouleaux motorisés (900 mm de portée). Au milieu de cette dernière, un troisième rouleau mobile en translation permet d'imposer une déformée en fonction de l'épaisseur du matériau testé. En effet, une trop grande déformée provoque une trop grande contrainte et une trop petite contrainte sera trop difficile à mesurer (la déformée imposée est trop petite) et plus particulièrement lorsque la surface du bois est brute de scierie. Un capteur de force (2000daN) monté au milieu mesure l'effort résultant.

Afin de prendre en compte les éventuels voiles, gauchissement et vrillage, la poutre est fléchie dans les deux sens et la mesure de la force est la résultante des deux passages. L'utilisation des deux passages élimine la difficulté de trouver le point bas mesuré sur un seul module par rapport à celui trouvé sur un autre, introduisant de ce fait des imprécisions. La combinaison de l'effort résultant mesuré sur le passage 1 & 2 correspond à la force que nous aurions obtenue avec une planche parfaitement droite.

Les rouleaux motorisés sont fixés sur un seul côté de la machine TECMACH. Ils peuvent être réglés facilement selon des épaisseurs allant de 24 à 75 mm. Les rouleaux codeurs sont fixés à 900 mm. Le rouleau qui impose la flèche, contient un capteur de force et il est fixé au milieu de la portée. Grâce à cette conception, la flèche est constante quelles que soient les variations d'épaisseur d'une poutre, plus particulièrement celles brutes de scierie.

Toutefois, les variations d'épaisseur sont prises en compte par un bras de suspension qui colle la poutre contre les rouleaux codeurs. Le jeu entre les rouleaux n'est pas fixé mais il peut changer à tout moment lorsque l'épaisseur de la poutre change. La pression pneumatique appliquée peut alors être réglée de manière que les poutres à hautes résistances puissent être déformées sans leur imposer une trop grande déformation (dans la limite acceptable) d'une part et une surcharge qui abîmerait la poutre d'autre part. Le concept de la machine exclut la possibilité qu'une poutre soit endommagée dans la machine.

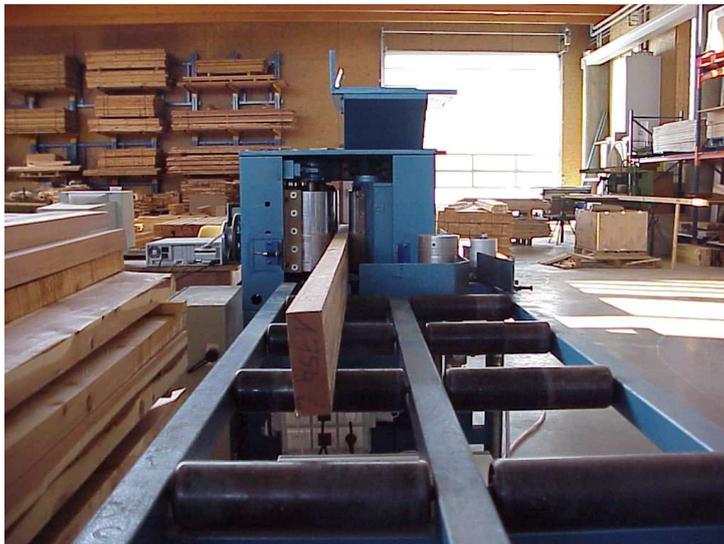
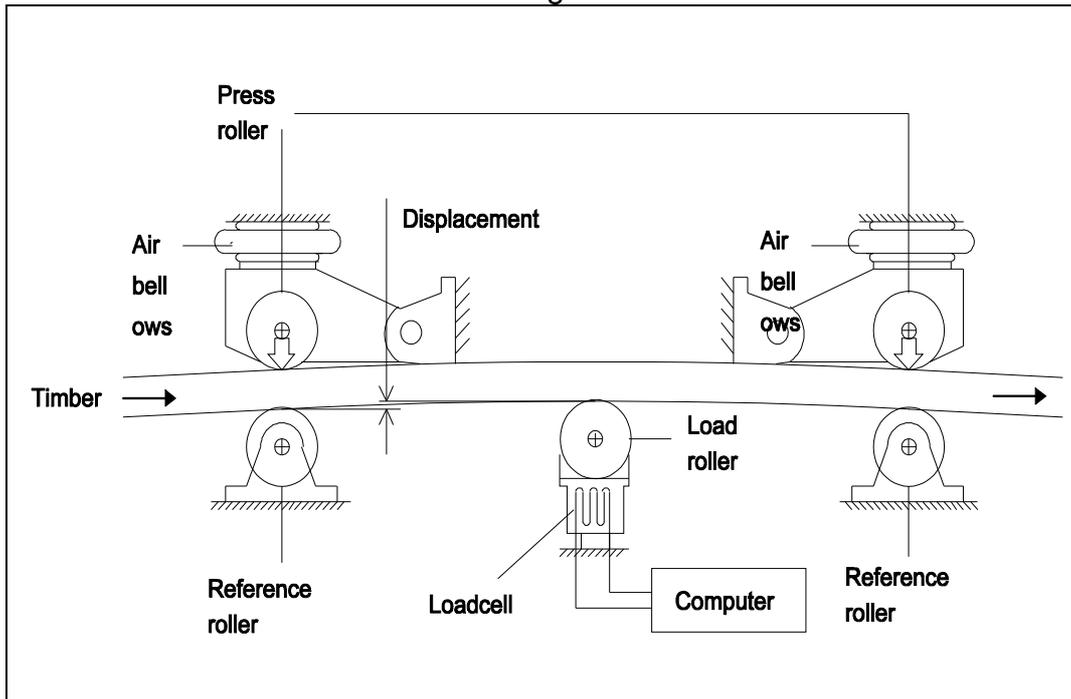


Schéma du stress grader TECMACH



Calcul des paramètres non destructifs de classement :

Avec une portée connue ($L = 900 \text{ mm}$), une flèche (Δ en mm), la force résultante (P en N) et l'inertie ($I = b^3h/12$) d'une éprouvette, nous pouvons calculer la rigidité par la formule suivante (poutre sur simple appui en flexion trois points);

$$E_{\text{Stress Grader}} = \frac{P L^3}{48 I \delta}$$

Avec cette valeur, la poutre peut être classifiée en une classe appropriée. La vitesse d'avance des avivés est de 80 m/min et le réglage de la machine est présenté dans le tableau suivant.

Réglage du stress grader

Dimension (mm)	Flèche (mm)	Pression (bar)
3500*150*50	5.4	2.6
2000*100*40	6.7	2
4000*200*65	3.8	3.6

Annexe 6 : Description du densimètre à rayons X

Cette technique permet d'obtenir ponctuellement la valeur de la masse volumique avec une précision de moins de 2 % pour une vitesse d'avance des pièces de l'ordre de 50 à 250 m/min.

La mesure de densité au moyen d'un rayonnement (X, γ , micro-ondes) consiste à mesurer l'atténuation des photons par un matériau d'épaisseur e (en cm) constante. Cette atténuation s'exprime par la formule suivante :

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\mu \rho e}$$

Avec :

I_0 : nombre d'impact par unité de temps arrivant sur le matériau ; I_0 est connu après une phase d'étalonnage;

I : nombre d'impact traversant le matériau ; I est mesurée au cours de l'essai;

μ : coefficient d'absorption massique ; μ varie en fonction de la nature du matériau et du rayonnement utilisé;

ρ : masse surfacique (g/cm^2) ; ρ est calculée après la mesure à μ constant.

Le fonctionnement des essais au défilement au moyen du densimètre à rayon X est décrit dans la figure suivante. Le détail de la chaîne de mesure est rassemblé dans le tableau suivant.

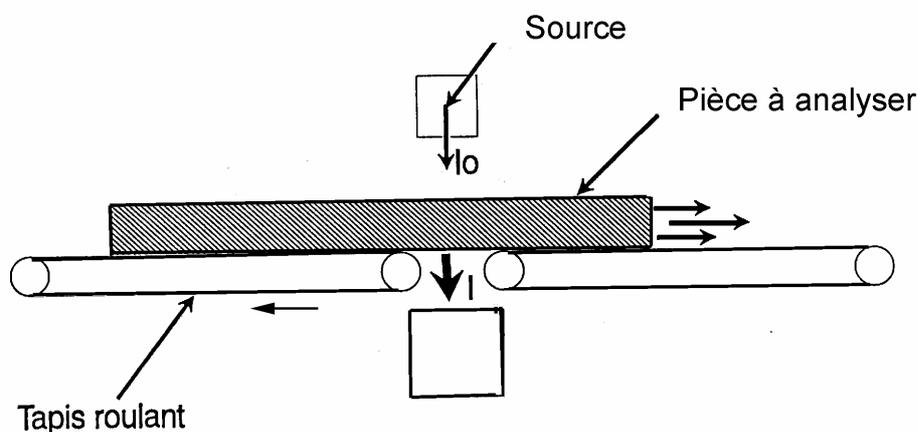


Schéma du densimètre à rayon X disponible au CTBA.

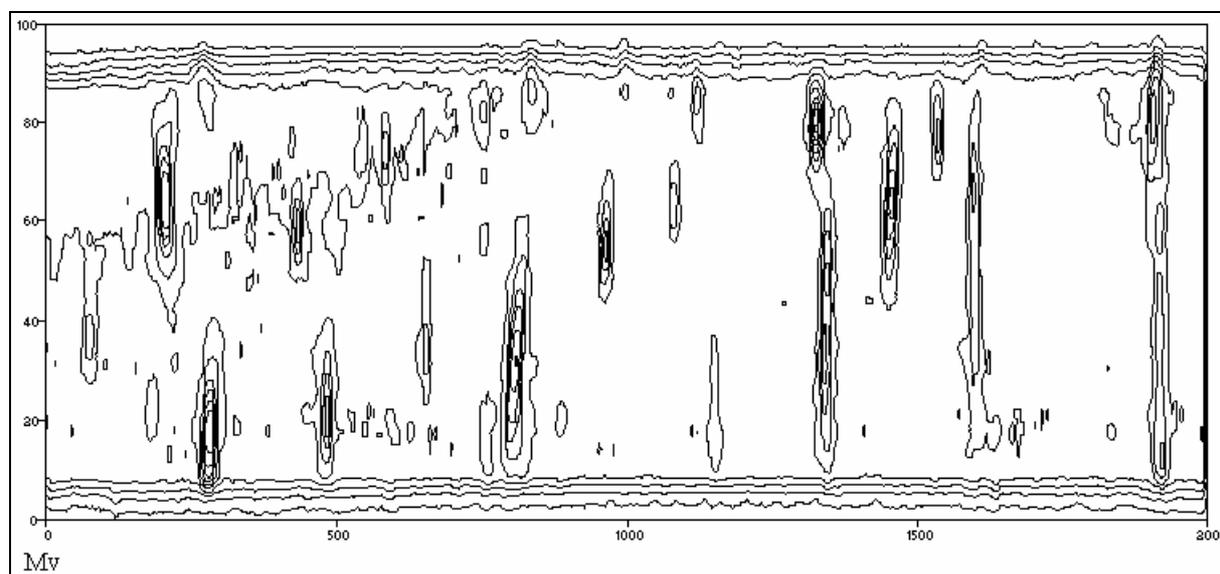
Description de la chaîne de mesure du densimètre à rayon X

Matériels	Description
Générateur RX (cathode W)	0.8 mA ; 25 KV;
24 Détecteurs Nal en arc de cercle ; fenêtre de détection = 230 mm	200000 coups/minute à vide ; 8*11 mm ² de surface de comptage par détecteurs
Amplification/Alimentation	Rack breveté CEA
Carte d'acquisition	24 voies comptages utilisées sur 39
Traitement des informations (étalonnage & acquisitions)	C.E.A.

Un des avantages du générateur X réside dans le fait qu'il nécessite une faible alimentation, limitant de ce fait les contraintes de radioprotection.

Calcul des paramètres non destructifs de classement :

Le logiciel de traitement des informations du C.E.A. délivre un fichier ASCII de 93 colonnes sur 400 lignes. Chaque information correspond à une mesure de masse surfacique qu'il est facile de traduire en masse volumique. Les nœuds peuvent ainsi être déterminés par les techniques de rayonnement dans la mesure où la masse volumique du nœud est en moyenne 2,5 fois supérieure à celle du bois normal.



*Exemple de variation de masse volumique d'une poutre de 40*100*2000 mm.*

A partir de ce fichier, il est possible de déterminer des masses volumiques locales. 86 variables (position & gradients) ont été sélectionnées pour trouver les meilleures corrélations entre les caractéristiques physiques et mécaniques des pièces de bois soumises à un essai de flexion.

Le logiciel de la machine nous fournit la position d'un défaut majeur (cf. EN 338 § 3). Celui-ci devient donc le centre d'essai lors de l'essai destructif de flexion.

