

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR



Mémoire de Magister

Spécialité « Sciences et Génie des matériaux »

Option : Physique et mécanique des matériaux

Présenté par :

ALLAB Karima

SUJET

Approche numérique et étude de la rupture
dans les matériaux orthotropes présentant des nœuds.

Devant le Jury Composé de :

Mr BEZZAZI B.	Professeur	UMBB	Président
Mr ZERIZER A.	M.C.	UMBB	Rapporteur
Mr BOUAFIA Y.	Professeur	UMMTO	Examineur
Mr AIT TAHAR K.	M.C.	UMMTO	Examineur
Mr MEDDAHI A.	M.C.	UMBB	Examineur

Soutenu le : 04/07/2005

REMERCIEMENT

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire des matériaux minéraux et composites du département sciences et Génie des matériaux, université de M'hamed BOUGUERA Université de Boumerdes est dirigé par Monsieur ZERIZER maître de conférence qu'il soit qu'il soit sincèrement remercié pour son assistance qu'il ma prodigué tout au long de mon travail.

J'exprime mes plus vifs remerciements à toutes les personnes du CNERIB qui m'ont permis de réaliser mes essais au sein de leur laboratoire, en particulier, j'adresse mes remerciements les plus sincères à Monsieur KROUBI qui sans son aide je n'aurais pas été au bout de mon travail.

Je remercie également tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

AVANT PROPOS

Suite aux importants efforts fournis par la direction générale des forêts et portant sur la valorisation des espèces forestières, le ministère de l'agriculture en a fait l'une de ses priorités et a conduit les pouvoirs publics chargés de son exploitation d'avoir une importance particulière à son égard.

L'intérêt économique du matériau bois apparaît comme une évidence. La principale espèce résineuse algérienne : le Pin d'Alep, couvrant une superficie de pas moins de 800.000 ha, peut faire l'objet d'une exploitation technologique rationnelle, pour en constituer un débouché valorisant qui doit cependant reposer sur une connaissance approfondie des caractéristiques mécaniques de cette essence.

Cette nécessité de mieux connaître le pin d'Alep s'applique évidemment, à toute essence, qui doit être considérée comme un produit nouveau.

Parmi les diverses utilisations que peut avoir le bois, son emploi dans la construction est celle qui a retenue notre attention, que ce soit dans la charpente, les maisons à ossature bois ou encore dans l'industrie du lamellé-collé. Une meilleure connaissance des caractéristiques mécaniques du Pin d'Alep est nécessaire pour que le bois confirme sa vocation de matériau économiquement performant.

L'un des problèmes le plus important qui se posent dans la construction en bois est celui de la tenue à court terme et à long terme des édifices lorsqu'ils sont chargés, notamment lorsque le bois est composé de singularités tels que les nœuds. Les coefficients de sécurité demeurent cependant larges pour ce matériau, par méconnaissance des mécanismes de rupture et des effets réels sur la ruine des défauts (nœuds, fissures) qu'il contient.

Dans ce travail, nous cherchons à étudier le comportement mécanique en flexion de ce matériau (avec et sans nœuds) en essayant d'apporter des éléments de réponse relatifs aux concentrations de contrainte, par une démarche aussi bien expérimentale que numérique.

Résumé

Depuis de nombreuses années, le bois a pris une place importante dans l'industrie. Les recherches visent essentiellement à maîtriser ce matériau complexe.

Une meilleure connaissance du comportement mécanique du bois est indispensable pour son emploi adéquat.

L'objectif de notre étude est d'arriver à situer le comportement mécanique du bois de pin d'Alep qui représente une part non négligeable de notre richesse forestière nationale. Pour atteindre notre objectif nous avons suivi (02)

démarches :

- **Expérimentale** : relative aux essais mécanique notamment l'essais de flexion statique sur trois séries d'éprouvettes (avec et sans défauts) au niveau du CNERIB de Souidania .
- **Simulation numérique** : sur la base des données expérimentales notamment les problèmes de concentrations de contraintes autour des nœuds (simulés à des trous bouchonnés).

La confrontation des deux démarches présente des conclusions satisfaisantes sur la base des résultats obtenus. D'autre part on a démontré que les nœuds du bois mettent en évidence des concentrations des contraintes importantes dont la nécessité de les tenir en compte dans la construction .

Mots clés

Pin d'Alep, Flexion, Nœud, Concentration de contrainte, Simulation numérique

ملخص

منذ عدة سنين، احتل الخشب منصبا مهما في الصناعة. المباحث التي أجريت في الميدان، ركزت خصوصا على هذه المادة المعقدة التركيب. إن معرفة السلوك الميكانيكي للخشب مهمة جدا لاستعماله. إن هدف دراستنا هو الوصول إلى تعيين سلوك الصنوبر الحلبي الذي يمثل كمية معتبرة من الثروة الغابية الوطنية. للوصول إلى هدفنا اتخذنا طريقتين: - **طريقة تجريبية:** نسبة للامتحان الميكانيكي بما فيه امتحان الإنحاء السناتيكي ثلاث إصطفافات من الامتحانات (بدون و مع غيب) وضعت في التجربة التي أجريت في المخبر الوطني للدراسات و الأبحاث في صناعة البناء (CNERIB) بالسويدانية. - **طريقة رقمية:** يتشبه على أساس المعطيات التجريبية وأيضا مشاكل التركيز حول عقد الخشب (التي شبهناها بفتحات مسددة). المجابهة أو المقارنة بين الطريقتين أعطت نتائج مرضية ومن ناحية أخرى برهنا أن العقد في الخشب تعمل على وجود تراكيز مهمة حولها مما يؤدي إلى ضرورة أخذها بعين الاعتبار في الصناعة.

كلمات مفتاحية

الصنوبر الحلبي - الإنحاء - العقد - تركيز القوى - تشبه رقمي

ABSTRACT

Since many years, wood took a significant place in industry.

Research primarily aims at controlling this complex material.

A better knowledge of the mechanical behaviour of wood is essential for its adequate employment.

The objective of our study is to manage to locate the mechanical behaviour of the wood of pin of Alep which represents a considerable share of our national forest richness.

To achieve our goal we followed (02) steps:

- **Experimental** : Relating to the tests mechanics in particular tests of flexion static on three series of test-tubes (with and without defects) on the level of the CNERIB of SOUIDANIA.
- **Numerical simulation** : On the basis of the experimental data in particular problems of stress concentration around the nodes (simulated with plagued holes).

The confrontation of the two steps report satisfactory on the basis of result obtained.

In addition, it was shown that the nodes of wood highlight concentrations of the significant constraints for of which need for holding them in account in the construction industry.

Key words

Pin of Alep, Flexion, Nodes, Stress concentration, Numerical simulation .

NOTATIONS

R	Direction radiale dans le bois
T	Direction tangentielle dans le bois
L	Direction longitudinale dans le bois
e	Déformation
S	Complaisance élastique
S_r	Contrainte de rupture
E	Module de Young
G	Module de cisaillement
S_{RC}	Contrainte de rupture en compression
S_{ec}	Contrainte Elastique en compression
S_{et}	Contrainte élastique en traction
S_{RT}	Contrainte de rupture en traction
e_{ec}	Déformation élastique en compression
e_{eT}	Déformation élastique en traction
e_{RT}	Déformation de rupture en traction
τ	Contrainte max. de cisaillement
S_n	Contrainte normale
S_{rr}	Contrainte radiale
S_{θθ}	Contrainte circonférentielle
S_{rθ}	Contrainte de cisaillement
S_{u,L}^t	Contrainte ultime longitudinale en traction
S_{u,R}^t	Contrainte ultime radiale en traction
S_{u,T}^t	Contrainte ultime tangentielle en traction
K_t	Coefficient de concentration de contrainte
P	Charge (KN)
Y	flèche (mm)
PST	Pin sans trou
PT5	Pin trou Ø 5
PT8	Pin trou Ø 8
PT11	Pin trou Ø 11
PTB	Pin trou bouchonné
M_m	Masse du mélange (colle + sciure)
M_{vm}	Masse volumique du mélange (colle + sciure)
V_m	Volume du mélange (colle + sciure)

LISTE DES FIGURES

Désignations	Titres	Page
Figure I.1.	Exemple d'un plan ligneux de résineux (pin sylvestre)	04
Figure I.2.	Structure générale du tronc.	04
Figure I.3.	Structure du tronc dans l'arbre. Exemple du chêne, essence à aubier différencié	05
Figure I.4.	Couches annuelles ou cerne	07
Figure I.5.	Courbes d'équilibre hygrosopique des bois	11
Figure I.6.	Isotherme de sorption	12
Figure I.7.	Détermination d'un profil de densité par irradiation aux rayons X	13
Figure I.8.	Profil micro densimétrique obtenu sur un bois adulte de Douglas Fir	15
Figure I.9.	Variabilité inter-spécifique de la propriété de retrait	16
Figure I.10.	Courbes de variations dimensionnelles en fonction du taux d'humidité	22
Figure II.1.	Relations contraintes – déformation pour le bois	23
Figure II.2.	Directions naturelles du matériau bois	26
Figure II.3.	Relation entre module d'élasticité et la masse volumique pour différents matériaux	27
Figure II.4.	Relation entre module d'élasticité du bois et sa masse volumique à 12% d'humidité	27
Figure II.5.	Relation entre la contrainte de rupture du Pin d'Alep et sa masse volumique à 12% d'humidité	28
Figure II.6.	Influence du taux d'humidité sur les caractéristiques du bois	30
Figure II.7.	Exemple de concentration de contraintes dans un nœud et dans son voisinage dans le cas d'une planche de Pin soumise à la traction	31
Figure II.8.	Exemple de défaut naturel : cas d'un nœud non adhérent	32
Figure II.9.	Diagramme de compression axiale du Sapin	33
Figure II.10.	Réponse en déformation d'un matériau viscoélastique à un	34

	échelon de contrainte (fluage)	
Figure II.11.	Réponse en déformation d'un matériau Viscoélastique à un créneau de contrainte (fluage + recouvrance)	34
Figure II.12.	Eprouvettes de traction pour des essais où la charge est appliquée selon la direction longitudinale	35
Figure II.13.	Eprouvettes de traction pour des essais où la charge est appliquée selon la direction radiale ou tangentielle	35
Figure II.14.	Essai de compression	37
Figure II.15.	Diagramme charge déplacement pour un essai de compression comparaison avec le diagramme obtenu en traction	38
Figure II.16.	Effet de la densité sur les propriétés mécaniques sur l'ensemble des essences	38
Figure II.16.	Hypothèse d'une distribution de contraintes trapézoïdales dans la flexion d'une poutre en bois	39
Figure II.17.	Hypothèse d'une distribution de contraintes paraboliques dans la flexion d'une poutre en bois	40
Figure II.18.	Influence de l'humidité sur les propriétés mécanique du bois	41
Figure II.19.	Morphologie des faciès de rupture en compression	42
Figure II.20.	Morphologie des faciès de rupture en traction	42
Figure II.21.	Morphologie des faciès de rupture en flexion	43
Figure III.1.	Essai de flexion statique	47
Figure III.2.	Déformée statique en flexion 3 points	48
Figure III.3.	Plan de découpe des éprouvettes normalisées	49
Figure III.4.	Photo de quelques types d'éprouvettes	50
Figure III.5.	Banc d'essai de flexion [CNERIB]	50
Figure III.6.	Allure de la charge / déplacement au centre de la charge (machine Instron CNERIB)	51
Figure III.7.	Influence de la taille du défaut sur la charge appliquée	54
Figure III.8.	Influence de la masse volumique sur la contrainte de rupture (pour l'ensemble des éprouvettes sollicitées)	57
Figure III.9.	Influence du module d'élasticité sur la contrainte de rupture	59

Figure IV.1.	Facteur de concentration de contrainte	63
Figure IV.2.	Distribution des contraintes globales réelles et nominales au bord d'un trou dans une planche	64
Figure IV.3.	Evolution de la contrainte globale critique avec la taille de défaut normalisée	65
Figure IV.4.	Influence de la position du nœud sur le facteur de concentration de contrainte	66
Figure IV.5.	Plaque trouée soumise à un essai de traction	67
Figure IV.6.	Modélisation du quart de la plaque	67
Figure IV.7.	Résultats de la simulation numérique sur RDM6	69
Figure IV.8.	Distribution des contraintes au bord d'un trou circulaire	70
Figure IV.9.	Eprouvette expérimentale	73
Figure IV.10.	Evolution de la contrainte σ_{xx} le long du contour du trou.	76
Figure IV.11.	Evolution de la contrainte σ_{yy} le long du contour du trou	77
Figure IV.12.	Evolution de la contrainte σ_{xy} le long du contour du trou	78
Figure IV.13.	Facteurs de concentration de contrainte dans une éprouvette trouée en flexion	78
Figure A.1.	Mesurage des nœuds	-
Figure A.2.	Exemple de mesurage des nœuds	-
Figure A.3.	Description des différents choix	-

LISTE DES TABLEAUX

Désignations	Titre	Page
Tableau I.1	Exemple de valeurs de densité anhydre	14
Tableau I.2	Qualification du bois suivant la valeur de la densité	14
Tableau I.3	Qualification du bois selon les valeurs de rétractabilité totale	16
Tableau I.4	Propriétés physiques de quelques essences	18
Tableau I.5	Caractéristiques mécaniques de quelques essences résineuses de bois	19
Tableau II.1	Constantes élastiques pour le cas des feuillus et résineux	25
Tableau II.2	Exemple de valeurs des contraintes ultimes en traction cas du pin sylvestre et le wana kouali	36
Tableau III.1	Charges enregistrées (pour l'ensemble des éprouvettes sollicitées).	53
Tableau III.2	Relevé de la flèche	55
Tableau III.3	Calcul des contraintes de rupture	56
Tableau III.4	Calcul des modules d'élasticité	58
Tableau IV.1.	Classement des bois selon la norme NF B 52.001	66
Tableau IV.2.	Rappel des résultats expérimentaux (Réf. chapitre3).	71
Tableau IV.3.	Valeurs utilisées dans le calcul	75
Tableau A.1. utilisées	Valeurs forfaitaires de contraintes couramment	
Tableau A.2.	- Contraintes forfaitaires affectées des coefficients de sécurité de réduction à l'humidité	

Tableau A.3. Caractéristiques mécaniques pour les différents classements

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
-----------------------------	----

Chapitre I Présentation du bois

INTRODUCTION	03
1. PRESENTATION DU MATERIAU BOIS.....	03
1.1. Anatomie et microstructure du bois	03
1.1.1. Fil du bois	04
1.1.2. L'écorce	05
1.1.3. La moelle	05
1.1.4. Les parenchymes ligneux.....	05
1.1.5. Les trachéides	06
1.1.6. L'aubier, le cambium ou l'assise cambiale	06
1.1.7. Le cœur, le duramen ou le bois parfait	07
1.2. PROPRIETES CHIMIQUES DU BOIS	08
1.2.1. Cellulose	08
1.2.2. Hémicellulose.....	09
1.2.3. Composes pectiques.....	09
1.2.4. Lignine.....	09
1.2.5. Corps divers.....	09
1.2.6. Autres corps:	10
1.3. PROPRIETES PHYSIQUES	10
1.3.1. Eau dans le bois	10
1.3.2. DENSITE DU BOIS.....	12
1.3.3. Retrait et gonflement du bois.....	15
1.4. PROPRIETES MECANQUES	19
CONCLUSION	20

Chapitre II Comportement mécanique du bois

INTRODUCTION	21
1. ELASTICITE	21
2. ANISOTROPIE A SYMETRIE CYLINDRIQUE.....	22
3. PARAMETRES D'INFLUENCE DES MODULES ELASTIQUES	25

3.1. Densité	26
3.2. Humidité	28
3.3. Température	28
3.4. Nœuds et entailles.....	29
4. INFLUENCE DES DEFAUTS SUR LA RESISTANCE A LA RUPTURE DU BOIS.	30
5. PLASTICITE, FATIGUE ET FLUAGE.....	33
6. SOLLICITATIONS MECANIQUES A LA RUPTURE	34
6.1. SOLLICITATION EN TRACTION	35
6.1.1. Influence de divers paramètres physiques sur la résistance à la traction dans les directions naturelles du bois	36
6.2. Sollicitation en compression selon la direction naturelle du bois	36
6.3. Sollicitation et contraintes ultimes en flexion.....	39
6.4. Hypothèse d'une distribution trapézoïdale des contraintes.....	39
6.5 Hypothèse d'une distribution parabolique des contraintes	40
7. MODES DE RUPTURES DANS LE BOIS	41
7.1. Rupture par compression	41
7.2. Rupture par traction	42
7.3. Rupture par flexion	43
CONCLUSION	43

Chapitre III Partie expérimentale

INTRODUCTION	45
1. ETAT DES CONNAISSANCES	45
2. PRINCIPE DE LA FLEXION STATIQUE	47
3. MATERIEL ET METHODES.....	48
3.1. Eprouvettes.....	48
3.2. Principe de l'essai.....	50
3.3. Machine d'essai.....	50
3.4. Enregistrement des résultats	51
3.5. Enregistrement des charges appliquées	53
3.6. Relevé de la flèche pour les trois types d'éprouvettes.....	55
3.7. Calcul des contraintes de rupture	56

3.8. Calcul des modules d'élasticité	58
CONCLUSION	60

Chapitre IV Approche numérique

PROBLEMATIQUE POSEE	61
INTRODUCTION	62
1. INFLUENCE DES DEFAUTS SUR LA RESISTANCE A LA RUPTURE DU BOIS	63
1.1. Concentration de contrainte au voisinage des nœuds	65
1.2. Problème de la plaque trouée	67
1.2.1. GEOMETRIE ET PROPRIETES DU MATERIAU.....	67
1.2.2. Conditions aux limites et chargements	68
1.2.3. Solution de référence du problème	68
2. CAS D'APPLICATION A L'EXPERIMENTATION DE FLEXION	70
INTRODUCTION	70
2.1. Cas de la poutre en flexion percée d'un trou circulaire	73
2.1.1. Calcul de l'évolution des contraintes le long du contour du trou	75
2.1.2. Facteur de concentration de contrainte autour d'un trou	78
2.2 Influence de la position du nœud dans une planche de bois.....	79
3. SOLUTION ANALYTIQUE.....	80
CONCLUSION	82
CONCLUSION GENERALE.....	83
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXES	

INTRODUCTION GENERALE

L'intérêt économique du matériau bois apparaît comme une évidence : La forêt algérienne dont le Pin d'Alep, principale espèce résineuse, tend à avoir la place qui lui échoit.

Utilisé et subissant des transformations, l'arbre donne naissance à divers bois. Aussi l'emploi en structure (charpente et ossature), des essences résineuses (pin d'Alep dans notre cas) peut constituer des avantages, entre autre un débouché valorisant. Une éventuelle valorisation doit systématiquement reposer sur une connaissance approfondie des caractéristiques mécaniques de cette essence.

Une meilleure connaissance du comportement mécanique du bois, devient indispensable à un emploi adéquat et représente, un intérêt certain pour la promotion de ce matériau.

Cette nécessité de mieux connaître le pin d'Alep s'applique évidemment à cette essence qui doit être prise comme un produit nouveau, ceci nous a conduit à une étude multiple car il s'agit à la fois de :

- Renseigner sur les performances du matériau sur la base.
- Analyser les contraintes obtenues, par rapport au classement établi permettant de garantir la sécurité de l'emploi.

Dans cette étude, nous sommes confrontés au problème tels que les nœuds dont l'impact est néfaste sur la résistance mécanique.

Ce qui nous a conduit à mieux connaître l'influence de ces nœuds sur le comportement mécanique du matériau et d'arriver à quantifier le facteur de concentration de contrainte aux abords du défaut.

En plus des différents inconvénients énumérés, nous y ajoutons l'effet de l'hétérogénéité du matériau qui accentue la difficulté du problème.

A l'issue de la réflexion posée, nous sommes orientés vers (02) approches :

- 1- Démarche expérimentale.
- 2- Simulation numérique, qui doit aboutir à des résultats mettant en évidence le facteur de concentration de contrainte pour bois sollicité en flexion notamment aux poutres nettes de défauts ainsi qu'à d'autres pourvues volontairement de nœuds artificiels (trous percés simulés à des nœuds non adhérent, trous percés et colmatés par mélange (Colle + Poussière), se rapprochant d'un nœud adhérent).

La confrontation des différentes approches sera discutée dans le mémoire.

Pour atteindre notre objectif, l'ensemble de nos investigations ont été réalisées :

- Au CNERIB de Soudania, pour les essais de flexion auquel a été soumis le matériel végétal.
- Au LMMC de l'université M'hamed Bouguera de Boumerdes, pour la simulation numérique.

Le présent mémoire est articulé comme suit :

Dans le premier chapitre, on présente une analyse se rapportant à la prise de connaissance du matériau bois.

Dans le deuxième, on y retrouve des notions théoriques au comportement mécanique et élastique du bois.

Dans le troisième chapitre, la démarche expérimentale relative aux essais mécaniques à travers notamment l'essai de flexion statique sur une machine instrumentée de type Instron

Le dernier chapitre abordera la question de la simulation numérique, notamment les problèmes de localisation des concentrations de contraintes.

Chapitre I

Présentation du bois

INTRODUCTION

L'Algérie possède une ressource forestière peu importante et sous-exploitée à cause des problèmes liés à l'infrastructure de la filière et du paysage macro-économique des produits concernés. Il faut cependant noter que le sciage (essentiellement de résineux) y occupe une place très importante, traditionnellement partenaire de la construction.

Dans une perspective à moyen et long terme, il est évident que le matériau bois destiné à la construction va se développer, et que sa qualité et ses performances seront mieux définies.

1. PRESENTATION DU MATERIAU BOIS

Le bois est un matériau qui possède de nombreux atouts environnementaux et il permet d'agir pour le développement durable qui consiste à "satisfaire les besoins présents sans compromettre l'aptitude des générations futures à couvrir leurs propres besoins"[Bre'81], [Ben'00], .

Les principales qualités du bois en terme d'environnement sont les suivantes :

- il fixe le carbone et donc lutte contre l'accroissement de l'effet de serre.
- il est le seul matériau renouvelable dans le cadre de forêts gérées durablement
- il consomme peu d'énergie pour sa production et sa transformation, ce qui participe à diminuer l'utilisation d'énergie fossile productrice de dioxyde de carbone
- il possède des atouts à chaque étape de son cycle de vie.

1.1. Anatomie et microstructure du bois

Le bois est la matière ligneuse et compacte qui compose les branches, le tronc et les racines des arbres et des arbrisseaux. C'est un ensemble de tissus composés de fibres, de vaisseaux, de parenchymes et de trachéides. Les fibres sont des cellules résistantes, disposées dans le sens axial, et qui constituent l'ossature de l'arbre. Pour le cas des vaisseaux (cellules creuses), leur rôle est de conduire la sève destinée à la vie et à la croissance de l'arbre. L'ensemble des vaisseaux forme le tissu vasculaire.

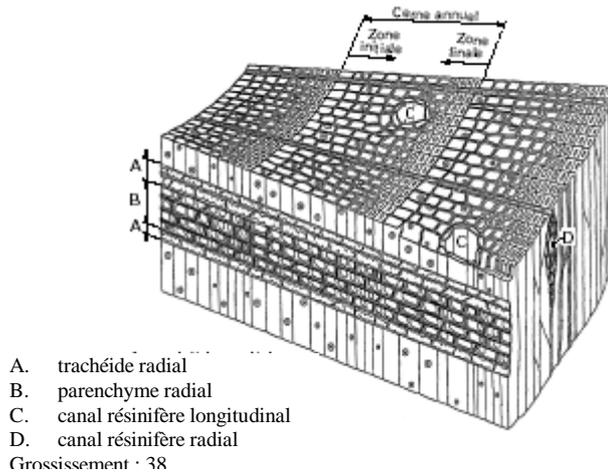


Figure I.1. Exemple d'un plan ligneux de résineux (pin sylvestre) [Tro'01]

Le tronc est constitué de nombreuses couches concentriques visibles à l'œil nu sur une coupe transversale. Celles-ci, appelées "accroissements" ou "cernes annuels" sont le résultat de l'activité de différenciation cellulaire de l'assise génératrice cambiale (ou cambium) située à l'interface entre l'aubier (2) et le liber (4).

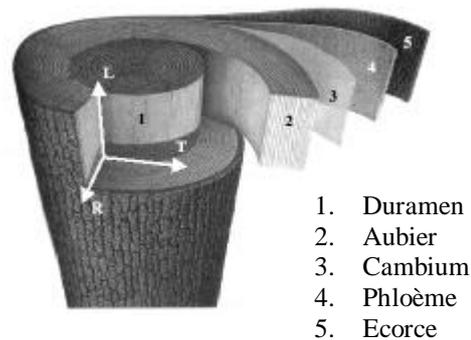


Figure I.2. Structure générale du tronc. [Tro'01]

On définit 3 plans de symétrie caractérisés par leur vecteur orthogonal. L : direction longitudinale (grand axe du tronc), direction radiale (de la moelle vers l'écorce) et T : direction tangentielle (tangente aux accroissements annuels).

1.1.1. Fil du bois

La plus grande partie des cellules est orientée dans le sens du tronc. Le sens des fibres est appelé fil du bois. Un certain nombre de cellules suivent la direction radiale. Elles forment ce que l'on appelle les rayons médullaires. Les bois d'une même essence ont un certain nombre

de caractéristiques communes, en particulier la disposition des tissus ainsi que la forme et la grandeur des cellules.

Le tronc d'arbre comprend plusieurs parties. De l'extérieur vers l'intérieur, on trouve :

1.1.2. L'écorce

C'est un tissu protecteur. Au fur et à mesure que l'arbre croît, l'écorce se distend, éclate et meurt. L'écorce est composée du liber (tissu vivant) et du rhytidome (tissu mort).

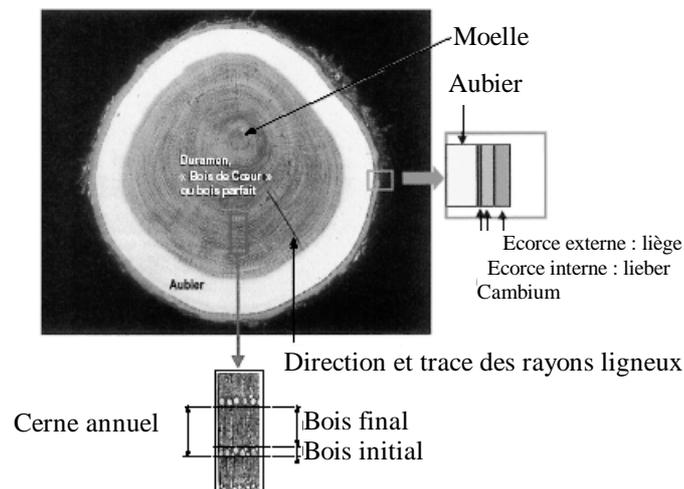


Figure I.3. Structure du tronc dans l'arbre.

Exemple du chêne, essence à aubier différencié [Tro'01]

1.1.3. La moelle

Elle se trouve au centre du tronc. Elle est formée d'un tissu léger et peu résistant. La forme de la moelle est caractéristique de l'espèce. Elle est en triangle dans l'aulne, en quadrilatère dans le frêne, en pentagone dans le peuplier, en étoile dans le chêne.

1.1.4. Les parenchymes ligneux

On les nomme également cellules de réserve. Elles accompagnent le tissu vasculaire. Ces cellules, à parois épaissies et lignifiées, remplissent en particulier la fonction de soutien.

1.1.5. Les trachéides

Elles n'existent que chez les résineux. Elles ont à la fois une fonction de soutien et de conduction de la sève.

A l'échelle de l'accroissement annuel

L'observation permet de constater à l'œil nu qu'il est fortement hétérogène. La nature et l'organisation des cellules qui le composent constituent le "plan ligneux" de l'arbre. Ce caractère, contrôlé génétiquement, diffère d'une espèce à l'autre.

La variabilité de structures que l'on peut observer à ces différentes échelles s'exprime directement dans celle des propriétés du matériau. Celle-ci est due en grande partie à la diversité des essences qui ont chacune leur propre programme génétique pour la formation de leur matière ligneuse, leur propre plan ligneux.

Le bois final est plus dense, plus dur, plus lisse et plus sombre que le bois initial ; ses cellules ont des parois plus épaisses et des cavités plus petites que le bois initial. La quantité de produit de finition qu'il absorbera sera plus faible que celle absorbée par le bois initial à plus fortes cavités.

Chez les résineux, la largeur des bandes de bois final affecte la durabilité du revêtement. Si les bandes de bois final sont suffisamment étroites, la finition restera en place plus longtemps qu'elle ne le ferait sur un bois à zones de bois final plus larges [Rio'72]]. En effet, les variations dimensionnelles induites par l'humidité affaiblissent la finition, particulièrement sur ces zones de bois final larges et denses.

Chez les feuillus, tel le chêne, la durabilité de la finition est plus liée à l'anatomie de l'essence qu'à la distinction entre le bois initial et le bois final. Les feuillus contiennent des vaisseaux (pores) qui leur confèrent un état de surface particulier pouvant conduire à des difficultés de finition.

1.1.6. L'aubier, le cambium ou l'assise cambiale

C'est une couche récente formée de cellules en pleine activité; cette couche conduit la sève brute ou ascendante. Chaque année, l'aubier se transforme en bois de printemps, foncé, et en bois d'été, plus clair. Cette couche est particulièrement vulnérable aux attaques des champignons et aux insectes xylophages.

1.1.7. Le cœur, le duramen ou le bois parfait

C'est la partie la plus intéressante du point de vue du matériau. Les cellules sont plus épaisses que celles du liber et très riches en carbone. Elles sont souvent imprégnées de matières antiseptiques, le cœur est formé d'une série de couches concentriques (couches annuelles ou cernes) permettant de déterminer l'âge du bois.

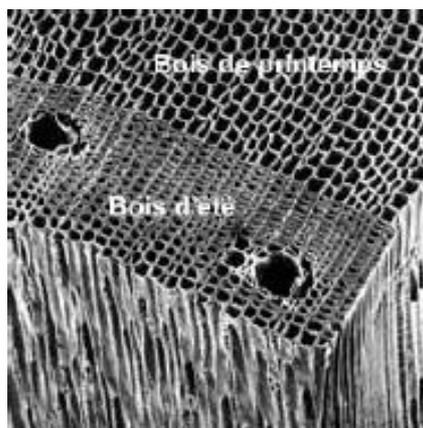


Figure I.4. Couches annuelles ou cerne [Rio'72]

La zone initiale poreuse. C'est le bois de printemps, caractérisé ici par ses gros vaisseaux entourés essentiellement de parenchyme longitudinal. La zone finale (bois d'été). De densité plus forte, elle est composée de plages de fibres, de parenchyme longitudinal et de petits vaisseaux. Les rayons ligneux. Leur forme et leur disposition suivant la direction radiale en font des éléments particuliers du plan ligneux. Constitués de cellules de parenchyme radial (cellules dont le grand axe est orienté suivant la direction radiale), ils peuvent être unisériés ou multisériés ; pouvant alors atteindre plusieurs centaines de micromètres d'épaisseur (dans la direction tangentielle) et plusieurs centimètres dans la direction longitudinale.

La variabilité de structures que l'on peut observer à ces différentes échelles s'exprime directement dans celle des propriétés du matériau [Dil'92]. Celle-ci est due en grande partie à la diversité des essences qui ont chacune leur propre programme génétique pour la formation de leur matière ligneuse, leur propre plan ligneux.

D'après la norme [Nor'93], la texture définit « le rapport de la largeur de bois d'été à la largeur totale de la couche d'accroissement ». D'un point de vue biologique, ce même paramètre est le reflet des conditions de croissance de l'arbre au cours de la saison de

végétation. Ainsi discrétisé, le cerne de croissance est assimilé à un bicouche composite, figurant la stratification en deux couches de bois initial et de bois final.

1.2. PROPRIETES CHIMIQUES DU BOIS

La composition chimique du bois est essentiellement organique, et se répartit par rapport aux corps simples suivants, en pourcentage du poids anhydre [The'04] :

- Carbone « C » 50%
- Oxygène « O » 43%
- Hydrogène « H » 6%
- Azote « N » 1%

A noter la présence de cendres (silice, phosphates, potassium, calcium) pour moins de 1%

Avec ces corps simples sont synthétisés, selon les essences, les trois types de polymères organiques constituant le matériau bois que sont :

- La cellulose 40 – 50 %
- L'hémicellulose 25 – 40 %
- La lignine 20 – 35%
- Composés divers (gomme arabique, térébenthines, la colophane, les tanins...).

1.2.1. Cellulose

C'est le principal constituant du bois, elle représente 40 à 50 % du poids sec. De formule générale $(C_6H_{10}O_5)_n$, la cellulose est un sucre fortement polymérisé. Sa masse moléculaire est très élevée de l'ordre de 40000 (par comparaison, pour l'eau elle est de 18) et sa densité est de 1,58. Elle possède une structure cristalline lui assurant une grande résistance mécanique [The'04].

Il existe plusieurs sortes de celluloses (α , β , γ) différant par le degré de polymérisation des chaînes de sucres simples qui sont à la base de sa constitution.

L'action de différents produits chimiques sur la cellulose a été très étudiée car ils ont une importance industrielle considérable dans son extraction du bois pour la fabrication de la pâte à papier, de textiles artificiels (acétate de cellulose), de vernis, de glucose.

1.2.2. Hemicellulose

Surtout présentes dans la lamelle moyenne et la membrane secondaire des cellules, les hémicelluloses sont des sucres (pentosane et hexosane) beaucoup moins polymérisés que la cellulose. Elle retiennent énormément d'eau dans le bois.

1.2.3. Composes pectiques

Ils se trouvent essentiellement dans la lamelle moyenne des cellules et assurent leur liaison. L'étuvage du bois entraîne un ramollissement de ces produits et assurent une certaine plasticité au bois; il peut ainsi être cintré et façonné plus facilement.

1.2.4. Lignine

Deuxième composé du bois par son importance, 20 à 40 % du poids sec, la lignine incruste et renforce les membranes cellulaires [Fre'79]. De densité 1,40 , elle est de structure très complexe et encore assez mal connue. A l'inverse de la cellulose, elle ne contient pas de sucres. La lignine constitue un résidu des industries chimiques du bois et son élimination ou utilisation est problématique; elle est le plus souvent brûlée.

1.2.5. Corps divers

RESINES

On les trouve surtout chez les conifères (oléorésines) dans les canaux résinifères ou les cellule du parenchyme. Produits accessoires du bois, leur présence est soit un avantage (protection de l'arbre vivant, augmentation de la durabilité des bois mis en oeuvre) soit un inconvénient (présence de poches de résine, encrassement des lames de scie et des couteaux, encollage).

TANINS

Ce sont des composés chimiques complexes, différents suivant la partie de l'arbre étudiée (écorce, bois parfait). Ils augmentent la durabilité du bois [The'04]. L'écorce de Chêne et d'Épicéa, le bois de Châtaignier et du Robinier en contiennent beaucoup. Très utilisés

autrefois pour la fabrication de l'encre (les tannins colorent les sels de fer en noir) ou pour la transformation des peaux en cuir (ils précipitent les matières azotées gélatineuses de la peau et la rendent imputrescible), les tanins, remplacés par des produits de synthèse sont à l'heure actuelle plutôt un gêne, surtout dans la fabrication des pâtes qu'ils colorent.

AUTRES CORPS

Matières de réserve:

Leur présence diminue la durabilité des bois et augmente les risques d'attaques par les insectes et les champignons. L'amidon est la matière de réserve la plus répandue dans l'aubier et les rayons ligneux.

Produits de sécrétion (Gommes, Cires, Huiles):

Leur présence en grande quantité chez certains arbres les font parfois rechercher pour les extraire (latex de l'Hévéa pour la fabrication de caoutchouc par exemple).

1.3. PROPRIETES PHYSIQUES

1.3.1. Eau dans le bois

L'eau joue souvent un rôle dans la durabilité du bois, mais ceci ne signifie pas pour autant que le bois ne doit jamais se mouiller. Au contraire, le bois et l'eau font habituellement bon ménage [Dub'98]. Le bois est un matériau hygroscopique, c'est-à-dire qu'il absorbe et dégage naturellement de l'eau de manière à trouver l'équilibre dans son environnement immédiat. Sans aucun risque, le bois peut absorber de grandes quantités d'eau avant d'atteindre une certaine teneur en humidité (TH, aussi appelée " teneur en eau ") propice à la formation de champignons décomposeurs.

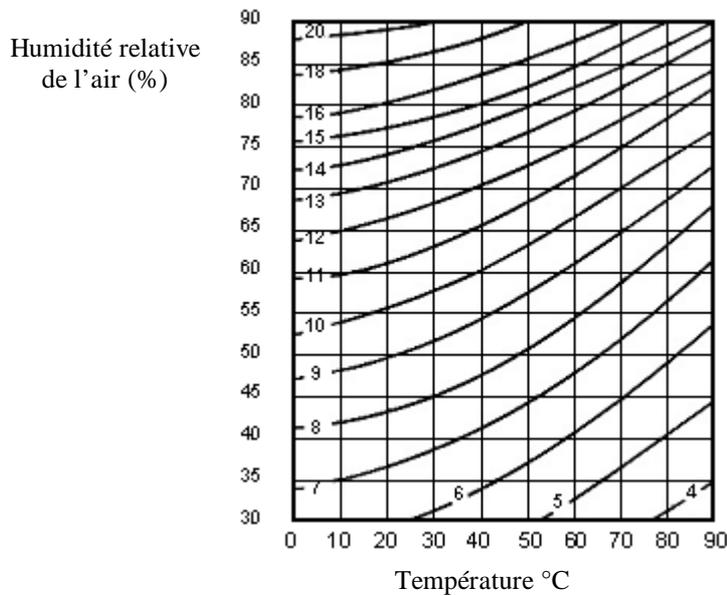


Figure I.5. Courbes d'équilibre hygroscopique des bois [Dub'98]

La saturation de la fibre représente un point de référence important tant pour le retrait que pour la pourriture (La saturation de la fibre survient en moyenne à environ 30 %). Les fibres de bois (les cellules dans le sens longitudinal de l'arbre) ont la forme d'une paille effilée. Lorsque la fibre absorbe l'eau, elle est d'abord retenue dans les parois cellulaires proprement dites. Lorsque les parois cellulaires regorgent d'eau, toute l'eau additionnelle absorbée par le bois vient remplir les cavités de ces cellules tubulaires. La saturation de la fibre est le degré d'humidité où les cellules retiennent autant d'eau qu'elles peuvent. Le point de saturation de la fibre représente aussi la limite de retrait du bois [Dub'98]. Le bois rétrécit ou gonfle selon les changements de sa teneur en humidité, mais seulement à mesure que l'eau dans les parois cellulaires est absorbée ou libérée. Les changements de teneur en humidité dans la cavité cellulaire n'auront pas d'effet sur la dimension du bois. Par conséquent, le bois ne rétrécit ou ne gonfle qu'au moment où la teneur en humidité descend sous le point de saturation de la fibre. Comme d'autres matériaux hygroscopiques, le bois qui se trouve dans un milieu où la température et l'humidité relative sont stables, atteint éventuellement une teneur en humidité qui n'engendre pas une différence de pression de vapeur entre le bois et l'air ambiant. Autrement dit, la teneur en humidité se stabilise à un point appelé la teneur en humidité d'équilibre.

Isotherme de sorption – Phénomène d’hystérésis

En fonction de la température et de l’humidité de l’air, le bois se stabilise à une humidité d’équilibre. Sous le climat tempéré français, pendant la période la plus sèche, les conditions atmosphériques sont de l’ordre de 20°C et 70% d’humidité relative de l’air (HR), ce qui correspond à un équilibre hygroscopique du bois d’environ 13%.

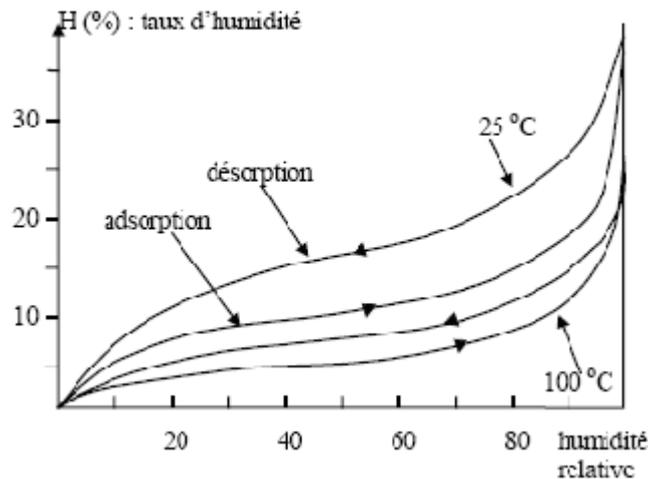


Figure I.6. Isotherme de sorption [PER'01]

Pendant la période la plus humide, les conditions atmosphériques sont de l’ordre de 0 à 5°C et 85% HR, ce qui correspond à un équilibre hygroscopique du bois d’environ 19%. Ainsi, un ouvrage en bois situé à l’extérieur (fenêtres, volets, bardages...) verra son humidité s’équilibrer vers 13% en été et vers 19% en hiver, ces valeurs sont évidemment variables selon les régions. Il s’agit de réduire au maximum les variations dimensionnelles du bois de façon à limiter les sollicitations au niveau du film de finition. Pour cela, il est conseillé, avant l’application de la finition, d’amener le bois à une humidité intermédiaire entre 13 et 19%.

1.3.2. DENSITE DU BOIS

La densité est certainement le critère le plus important de la caractérisation physique du matériau. De plus, cette caractéristique est très liée aux propriétés élastiques, donc mécaniques du bois. La densité de la matière ligneuse, composée de fibres cellulosiques et hémicellulosiques lignifiées est invariablement parmi toutes les essences établie à environ 1,53 (g/cm³). Le bois est donc une matière fortement poreuse, et la densité exprimée sera

toujours une densité apparente, englobant la porosité $p = 1,53/d_0$ (d_0 étant la densité anhydre) [Fer'82].

Il peut être utile de connaître la valeur locale de la densité et plus particulièrement la variation de cette densité selon la direction radiale du bois. Dans ce cas, l'échantillon de bois utilisé se présente sous forme de barrette ou d'un cylindre (carotte de sondage prélevé à la tarière sur un arbre vivant) dont l'axe est dans la direction radiale du bois [Pol'92].

On prend, aux rayons X, une radiographie de cette carotte. Le noircissement de la plaque photographique est d'autant plus faible que la quantité de rayonnement qu'il a reçu est plus faible, que l'absorption est plus grande, donc que la densité du bois est plus élevée. On mesure le noircissement du film à l'aide d'un micro densitomètre; le signal fournit par le densimètre est fonction, pour une humidité donnée, de la densité du bois.

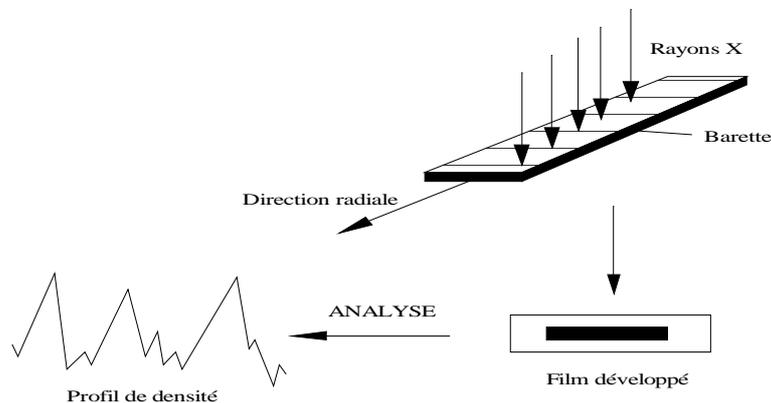


Figure I.7. Détermination d'un profil de densité par irradiation aux rayons X [Tro'01]

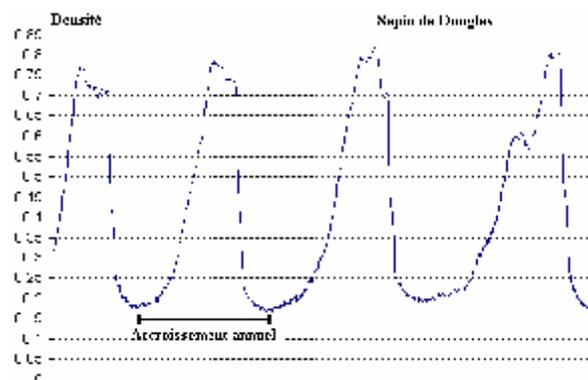


Figure I.8. Profil micro densimétrique obtenu sur un bois adulte de Douglas Fir [Pol'92]

La méthode par rayons X fournit des informations sur:

- Les limites précises des cernes d'accroissement
- La densité locale du bois, donc les densités du bois initial et du bois final permettant de calculer la densité moyenne de l'échantillon.

Une grande partie de l'anisotropie mécanique à l'échelle de la couche d'accroissement est attribuée à la présence de ces deux tissus physiologiquement spécifiques [Pol'92], [Qui'66], [Tro'01]. A l'intérieure d'un cerne d'accroissement annuel, les fluctuations de la densité du bois sont directement reliées au diamètre des cellules ligneuses et à l'épaisseur de leurs parois [Tro'01].

Admettant la spécificité propre des propriétés mécaniques du bois initial et final, les mécaniciens du bois utilisent un critère appelé texture, et généralement employé pour l'appréciation des qualités technologiques du matériau.

La variabilité de la densité se manifeste sur un arbre: différence bois initial - bois final, variabilité de la densité moyenne entre différents points de l'arbre et entre différents arbres de la même espèce et même d'un peuplement.

Tableau I.1. Exemple de valeurs de densité anhydre [Tro'01]

Feuillus	Do	Résineux	Do	Exotiques	Do
Hêtre	0,680	Sapin	0,410	Acajou	0,550
Chêne	0,630	Epicéa	0,430	Okoumé	0,420
Orme	0,650	Pin sylvestre	0,500	Sipo	0,650
Charme	0,800	Mélèze	0,590	Iroko	0,680
Peuplier	0,400	Pitchpin	0,680	Teck	0,630
Châtaignier	0,540	Pin maritime	0,530	Ebene	1,00

Tableau I.2. Qualification du bois suivant la valeur de la densité [Tro'01]

D₁₂	Qualification	Exemples
Au-dessous de 0,45	Très légers	Pin Weymouth
De 0,45 à 0,55	Légers	Sapin. Epicéa
De 0,55 à 0,65	Mi-lourds	Pin Sylvestre. P. Maritime
De 0,65 à 0,85	Lourds	Teck
Au-dessus de 0,85	Très lourds	Ebène

1.3.3. Retrait et gonflement du bois

Le volume d'un bois varie suivant sa tenue en eau. Ces variations dimensionnelles apparaissent sous l'effet de la modification de la teneur en eau du point de saturation des fibres à l'état anhydre [Luc'82]. Le retrait se manifeste en dessous du point de saturation des fibres, quand l'eau libre a été évacuée [Kau'79]. Le retrait est donc engendré par le mouvement de l'eau lié qui se trouve dans les parois cellulaires.

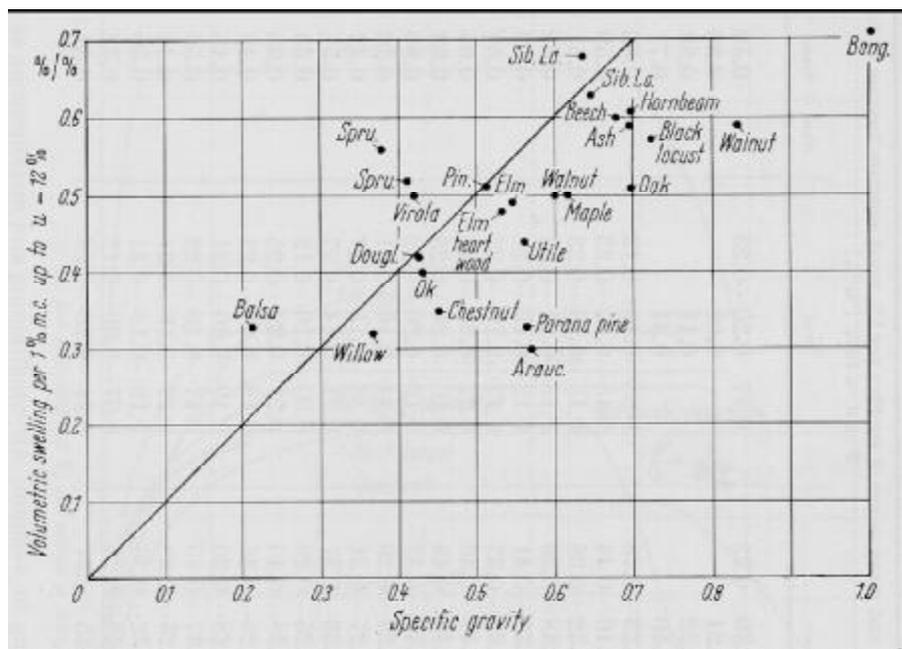


Figure I.9. Variabilité inter-spécifique de la propriété de retrait [Kol'68]

Il a été constaté que chez la plupart des résineux que le retrait axial est relativement faible (de l'ordre de 0,1 à 0,3%), exception faite des arbres à bois de réaction et beaucoup plus important dans le sens tangentiel qui se révèle 1,5 à 2 fois plus élevées que le retrait radial.

La norme [Nor'93] qualifie le bois d'après sa rétractabilité totale.

Pour des taux d'humidité inférieurs au PSF, au cours d'une désorption (séchage) ou une adsorption (reprise d'humidité), le bois subit des variations dimensionnelles, respectivement un retrait ou un gonflement.

L'expérience montre que le retrait ou gonflement est fortement anisotrope.

$$\alpha_T > \alpha_R \gg \alpha_L$$

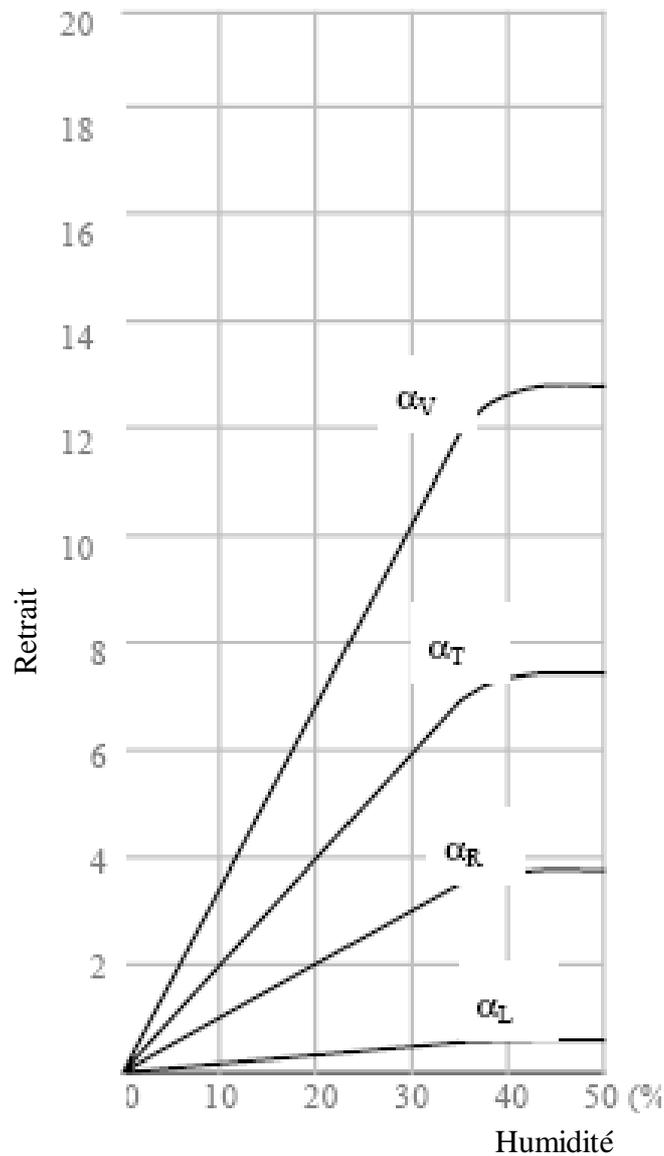


Figure I.10. Courbes de variations dimensionnelles en fonction du taux d'humidité [Tro'01]

Tableau I.3. Qualification du bois selon les valeurs de rétractabilité totale [Nor'93]

Rétractabilité totale	Qualification	Exemples
20 à 15%	Fort retrait	Grume à grandes fentes de dessiccation à débiter rapidement (chêne....)
15 à 10%	Moyen retrait	Grume à fente moyenne pouvant être conservées (résineux..)
10 à 5%	Faible retrait	Grume à petite fente apte à la menuiserie et déroulage (peuplier...)

La norme française [Nor'93] qualifie le bois suivant les valeurs du coefficient de rétractabilité volumétrique, qui est la variation de volume d'un bois entre son état anhydre à l'état de saturation de l'air, exprimé en pourcentage pour une variation de son taux d'humidité de 1%. Ce coefficient traduit la « nervosité » du bois.

Le retrait et le gonflement du bois sont directement proportionnels à la diminution ou à l'augmentation de son taux d'humidité. L'amplitude des variations dimensionnelles observées dépend :

- de la direction par rapport au fil du bois (axiale, radiale, tangentielle).
- de l'essence.
- du nombre de points perdus ou repris entre 0 et 30%.

Chaque essence est caractérisée par les trois coefficients de rétractabilité qui expriment les variations dimensionnelles d'une pièce de bois pour une variation d'humidité de 1% selon chacune des trois directions :

- le retrait axial.
- le retrait radial (débit sur quartier).
- le retrait tangentiel (débit sur dosse).

Le retrait est très fortement anisotrope. Le retrait axial est très faible et pratiquement négligeable. C'est dans le sens tangentiel qu'il est le plus important et environ 1,5 à 2 fois plus élevé que le retrait radial. Cependant pour certaines essences, les retraits radial et tangentiel sont assez proches ; ces essences sont de ce fait moins sensibles aux fentes de séchage. Le tableau I.4. indique les valeurs moyennes de rétractabilité de quelques essences utilisées en menuiserie et en structure, ainsi que leur densité et stabilité.

Tableau I.4. Propriétés physiques de quelques essences [Rio'72], [Ben'00]

Essences	Retrait radial (%) ¹	Retrait tangentiel (%) ¹	Stabilité	Densité
Feuillus européens				
Chêne	0.18/0.22	0.28/0.35	Moyennement stable	0.67/0.76
Hêtre	0.19/0.22	0.38/0.44	Peu stable	0.69/0.75
Peuplier	0.12/0.19	0.25/0.31	Moyennement stable	0.42/0.48
Erable	0.10/0.20	0.22/0.30	Stable	0.61/0.68
Résineux				
Pin maritime	0.15/0.25	0.25/0.35	Moyennement à peu stable	0.45/0.65
Pin sylvestre	0.15/0.19	0.25/0.36	stable	0.50/0.54
Sapin	0.12/0.16	0.28/0.35	Moyennement stable	0.44/0.48
Western red cedar	0.07/0.09	0.20/0.24	Stable	0.33/0.39
			Moyennement à stable	
Feuillus tropicaux				
Iroko	0.13/0.19	0.25/0.28	Moyennement à stable	0.63/0.67
Moabi	0.26/0.29	0.34/0.42	Moyennement stable	0.77/0.83
Movingui	0.18/0.20	0.28/0.32	Moyennement à stable	0.69/0.74
Sipo	0.18/0.22	0.23/0.26	Stable	0.59/0.66
Teck	0.13/0.15	0.24/0.29	Très stable	0.65/0.75

La rétractabilité conditionne la stabilité en ambiance extérieure d'une essence. On distingue ainsi les essences à fort retrait (chêne, hêtre, etc.), les essences à retrait moyen (les résineux en général), et les essences à faible retrait (sipo, iroko, peuplier, etc.) [Cha'93].

Une finition extérieure sera donc plus sollicitée sur un support en bois à fort retrait débité sur dosse (retrait tangentiel) que sur un élément en bois à faible retrait débité sur quartier (retrait radial). Si le revêtement n'est pas suffisamment souple, il ne pourra suivre les variations dimensionnelles du support et fera donc l'objet de craquèlements dus aux cycles répétés de retrait-gonflement.

¹ Pourcentage de variation dimensionnelle pour une variation du taux d'humidité du bois de 1% (entre 0 et 30%)

1.4. PROPRIETES MECANIQUES

Les essais cherchent à définir les limites de sollicitations supportables par le bois. Ces limites dépendent des qualités intrinsèques de l'arbre, conséquence directe des facteurs génétiques, couplées aux facteurs de l'environnement il importe de connaître l'humidité des échantillons soumis aux différents tests mécaniques car elles influencent directement les propriétés du bois [Ben'82].

Au-dessus du point de saturation des fibres ($H_s = S = 30\%$) l'humidité ne modifie pas les propriétés mécaniques ; par en dessous, l'humidité influe fortement les propriétés mécaniques qui augmentent lorsque l'humidité diminue, un taux d'humidité de 12% est recommandé pour tous les essais mécaniques afin de normaliser les conditions expérimentales et des comparaisons ultérieures [Gui'94]. L'ensemble des caractéristiques et propriétés physico-mécaniques du bois résulte de cette structure de matériau composite alvéolaire multicouche. Cette structure confère au matériau un caractère anisotrope et hétérogène.

Tableau I.5. caractéristiques mécaniques de quelques essences résineuses de bois [Gui'94]

Essences	Pin Maritime	Pin sylvestre	Mélèze	Epicéa	Douglas	Sapin
Caractéristiques						
Contrainte de rupture en compression (Mpa)	39	50	53	45	55	46
Contrainte de rupture en traction (Mpa)	86	102	101	85	93	86
Contrainte de rupture en flexion parallèle (Mpa)	80	90	93	71	85	68
Module d'élasticité (Mpa)	8800	11900	12500	11000	12100	12200
Résistance aux chocs(Nm/cm ²)	-	5,50	6,20	4,50	4,80	5,00
Dureté Brinell parallèle aux fibres (N/mm ²)	-	40	49	31	44	31
Dureté Brinell perpendiculaire aux fibres (N/mm ²)	20	18	22	13	18	14
Dureté Monnin	2,30	3,00	2,70	1,40	2,20	1,50

CONCLUSION

Le matériau bois considéré comme hétérogène et anisotrope, présente des caractéristiques très sensibles à la densité, à l'humidité et la présence de défauts. De manière générale, les propriétés hygroscopiques du bois sont directement liées à sa biodégradabilité complète et sont responsables de variations dimensionnelles importantes, notamment suivant l'axe radial et celui tangentiel dont il faudra tenir compte lors de sa mise en œuvre et exploitabilité. Pratiquement, il est bien entendu qu'il s'agit de données par rapport à l'état de référence du bois sec à température ambiante. Ces paramètres doivent être appliqués avec prudence lorsqu'on aborde l'étude du comportement physico-mécanique d'un matériau en conditions extrêmes de température et de d'humidité.

Chapitre II

Comportement mécanique du bois

INTRODUCTION

Après avoir donné un aperçu général sur le matériau bois, nous présentons dans ce qui suit une étude théorique sur le comportement mécanique du bois. L'objectif du présent chapitre est d'aboutir aux notions de résistance mécanique de ce matériau considéré comme hétérogène notamment lorsqu'il est en liaison avec ses défauts naturels (fissures, nœuds...) qui peuvent induire un comportement néfaste lors de sa mise en œuvre, notamment en construction à ossature bois.

1. ELASTICITE

Un solide est considéré avoir un comportement élastique si les déformations provoquées par une petite contrainte sont complètement annulées après déchargement. Les propriétés élastiques d'un matériau sont valables jusqu'à une certaine limite de contrainte. Au delà de cette limite, on entre dans le domaine plastique, précurseur de la rupture [Gui'87].

Pour le bois, l'influence de l'hygroscopie sur les propriétés élastiques est très importante. La durée de sollicitation associée aux variations d'hygroscopie occasionne également des variations importantes de comportement élastique qui traduisent le comportement du fluage.

Dans le domaine élastique, la relation contrainte déformation suit la loi de Hooke, qui stipule que la déformation est proportionnelle à la contrainte avec :

$$\varepsilon = S \sigma \quad \text{avec} \quad E = 1/ S$$

e Déformation

S Complaisance élastique

s Contrainte

E Module de Young

Les modules de Young E_i sont définis comme l'inverse de rapport des déformations normales sur contraintes normales dans les direction principale $(\vec{R}, \vec{T}, \vec{L})$ d'où le module de Young E_i est l'inverse de la complaisance S_{ii}

$$\text{Donc : } E_R = \frac{1}{S_{11}}, \quad E_T = \frac{1}{S_{22}}, \quad E_L = \frac{1}{S_{33}}$$

Pour les bois, les hypothèses générales accordent un module de Young équivalent en compression, traction et flexion. Mais la limite élastique est considérablement inférieure à celle de traction, comme l'exprime la figure II.1.

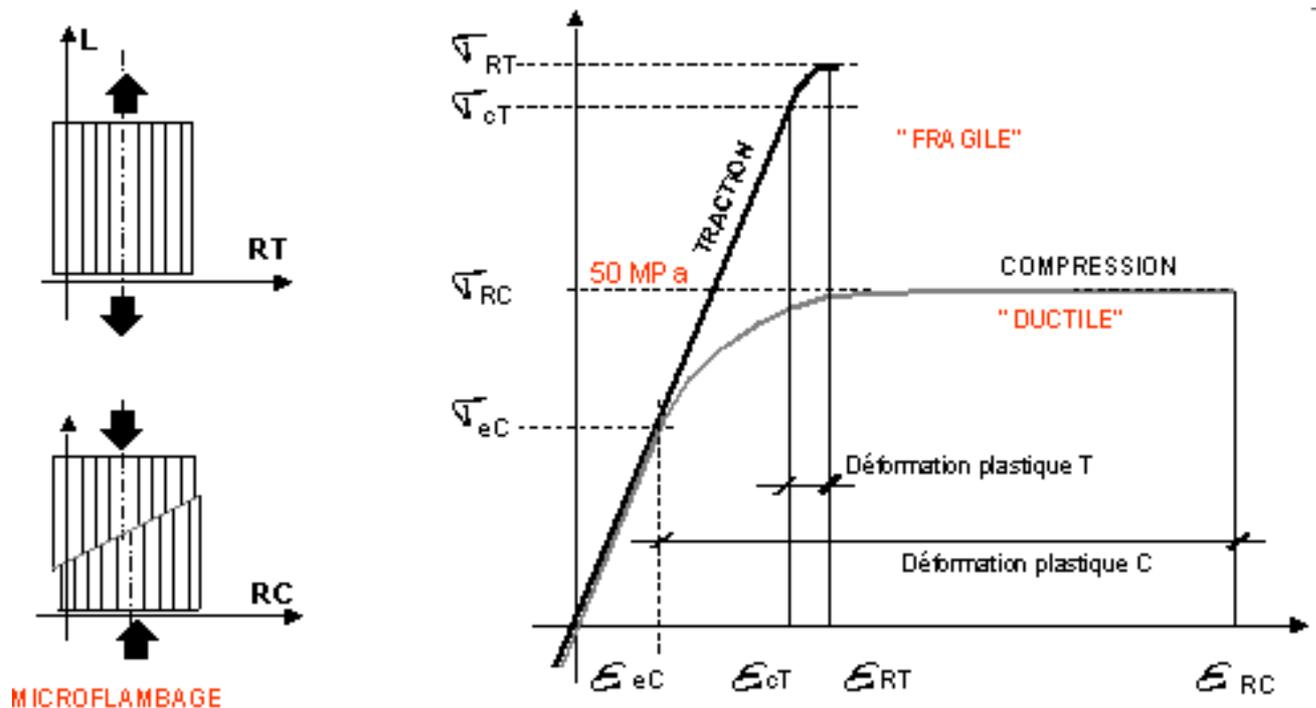


Figure II.1. Relations contraintes – déformation pour le bois [Tro'01]

2. ANISOTROPIE A SYMETRIE CYLINDRIQUE

De par son anatomie et sa structure particulière (accroissement de l'arbre en hauteur et augmentation annuelle du diamètre), le matériau présente trois directions privilégiées, distinctes et perpendiculaires entre elles. Dans ce repère ainsi choisi, l'orthotropie repose sur : la direction longitudinale, notée L dans le sens des fibres, la direction radiale notée R et correspondant à la direction de croissance en diamètre, enfin sur la direction tangentielle notée T et tangente aux cernes annuels [Gui'87].

Ces trois directions génèrent une symétrie cylindrique qui se retrouve dans la plupart des propriétés physiques et mécaniques du bois.

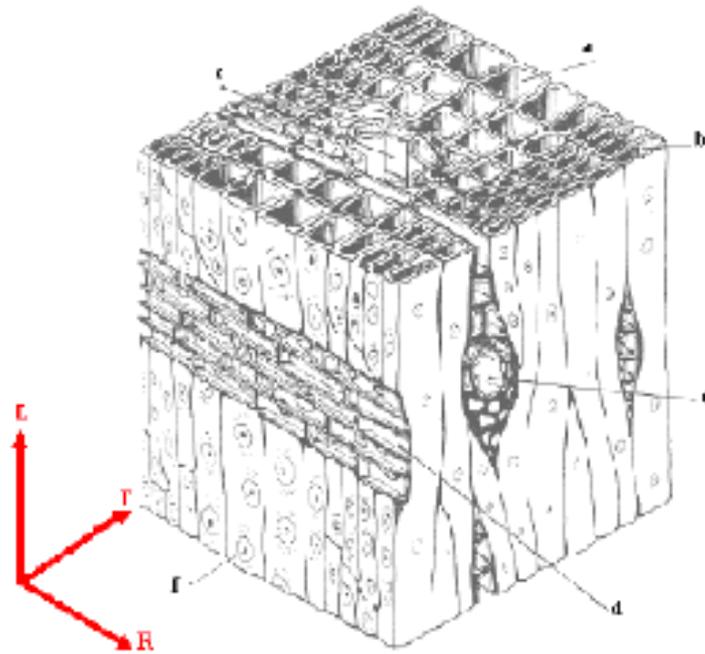


Figure II.2. Directions naturelles du matériau bois [Gui'87]

a : trachéide dans le bois de printemps ; **b** : trachéide dans le bois d'été ;

c : canal résinifère ; **d** : rayon ligneux

e : rayon ligneux avec canal résinifère ; **f** : ponctuation.

La nature, le nombre et l'organisation spatiale des cellules du bois peuvent être décrits par l'observation de trois coupes matérielles (LR, RT, TL) identifiées en définissant la base (Rr, Tr, Lr) comme le repère d'orthotropie du matériau bois (Figure II.2). Ces plans de référence décrivent le « plan ligneux » d'une espèce. Bien que l'architecture du cerne soit considérée comme un caractère systématique, quasiment invariable pour une même essence, puisque génétiquement prédéterminée, la proportion des différentes cellules qui constituent « le plan ligneux » est très fortement dépendante des conditions de croissance de l'arbre (station, climat, pluviométrie...).

Dans ce repère, l'orthotropie génère trois plans de symétrie (LT, LR, TR). Le plan LT correspond à un débit dit « débit sur dosse », le plan LR à un « débit sur quartier », le plan TR correspondant à une utilisation dite en bois « de bout ».

La loi de Hooke se généralise aux trois axes , L, R et T, et la matrice de complaisance élastique, S, est donnée par :

$$\begin{pmatrix} e_R \\ e_T \\ e_L \\ g_{TL} \\ g_{RL} \\ g_{RT} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{-n_{TR}}{E_T} & \frac{-n_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-n_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{-n_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-n_{RL}}{E_R} & \frac{-n_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_R \\ s_T \\ s_L \\ t_{TL} \\ t_{RL} \\ t_{RT} \end{pmatrix}$$

Où :

E_R, E_T, E_L Sont les modules d'Young dans les trois directions **R**, **T** et **L**.

G_{TL}, G_{LT}, G_{RT} Sont les modules de cisaillement.

n_{TL}, n_{LT}, n_{RT} Sont les coefficients de Poisson.

Et avec les trois conditions : $\frac{n_{RT}}{E_R} = \frac{n_{TR}}{E_T}$ $\frac{n_{TL}}{E_T} = \frac{n_{LT}}{E_L}$ $\frac{n_{LR}}{E_L} = \frac{n_{RL}}{E_R}$

Le module d'Young E_i est le rapport de la composante σ_i du tenseur des contraintes dans un essai uniaxial de compression ou de traction dans la direction i et de la composante e_i du tenseur des déformations avec i correspondant aux axes $\overset{u}{R}, \overset{u}{T}, \overset{u}{L}$. Le module d'Young E_i est aussi l'inverse de la complaisance S_{ij} (sans sommation sur i) :

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

Le module de cisaillement G_{ij} est l'inverse de la complaisance S_{kk} avec $K=9 - (i + j)$

$$G_{TL} = \frac{1}{S_{44}} \quad G_{LR} = \frac{1}{S_{55}} \quad G_{RT} = \frac{1}{S_{66}}$$

Compte tenu de la symétrie de la matrice, les coefficients de Poisson sont définis par :

$$v_{RT} = \frac{S_{22}}{S_{11}} \quad v_{RL} = \frac{S_{33}}{S_{11}} \quad v_{TL} = \frac{S_{22}}{S_{33}}$$

La loi de Hooke peut aussi être exprimée avec la matrice des rigidités donnant les contraintes en fonction des déformations. Quelques valeurs de constantes élastiques pour différentes essences de bois sont données dans le tableau II.1.

Tableau II.1. Constantes élastiques pour le cas des feuillus et résineux [Jod'01]

	Feuille	Résineux
Masse volumique (g/cm ³)	0,65	0,45
Humidité (%)	12	12
Modules élastiques	GPa	GPa
$S_{11}^{-1} = E_R$	1,81	1,00
$S_{22}^{-1} = E_T$	1,03	0,636
$S_{33}^{-1} = E_L$	14,4	13,1
$-S_{12}^{-1} = \frac{E_T}{\nu_{TR}}$	2,68 (0,38)	2,05 (0,31)
$-S_{23}^{-1} = \frac{E_L}{\nu_{LT}}$	31,2 (0,46)	30,8 (0,43)
$-S_{31}^{-1} = \frac{E_R}{\nu_{RL}}$	37,3 (0,05)	34,2 (0,03)
$S_{44}^{-1} = G_{TL}$	0,971	0,912
$S_{55}^{-1} = G_{LR}$	1,26	0,861
$S_{66}^{-1} = G_{RT}$	0,366	0,084

Etant donné l'anisotropie du bois et la grande différence de constantes élastiques suivant les axes, on en déduit que :

$$E_L \gg E_R > E_T$$

Il en résulte que les caractéristiques mécaniques de résistance en traction et compression seront très évolutives entre l'axe longitudinal et ses composantes orthogonales.

3. PARAMETRES D'INFLUENCE DES MODULES ELASTIQUES

Les propriétés élastiques des matériaux bois sont sensibles aux variations de l'état physique de l'échantillon considéré.

3.1. Densité

La densité est un paramètre très important, les propriétés mécaniques et qualités technologiques de ce matériau en dépendant directement.

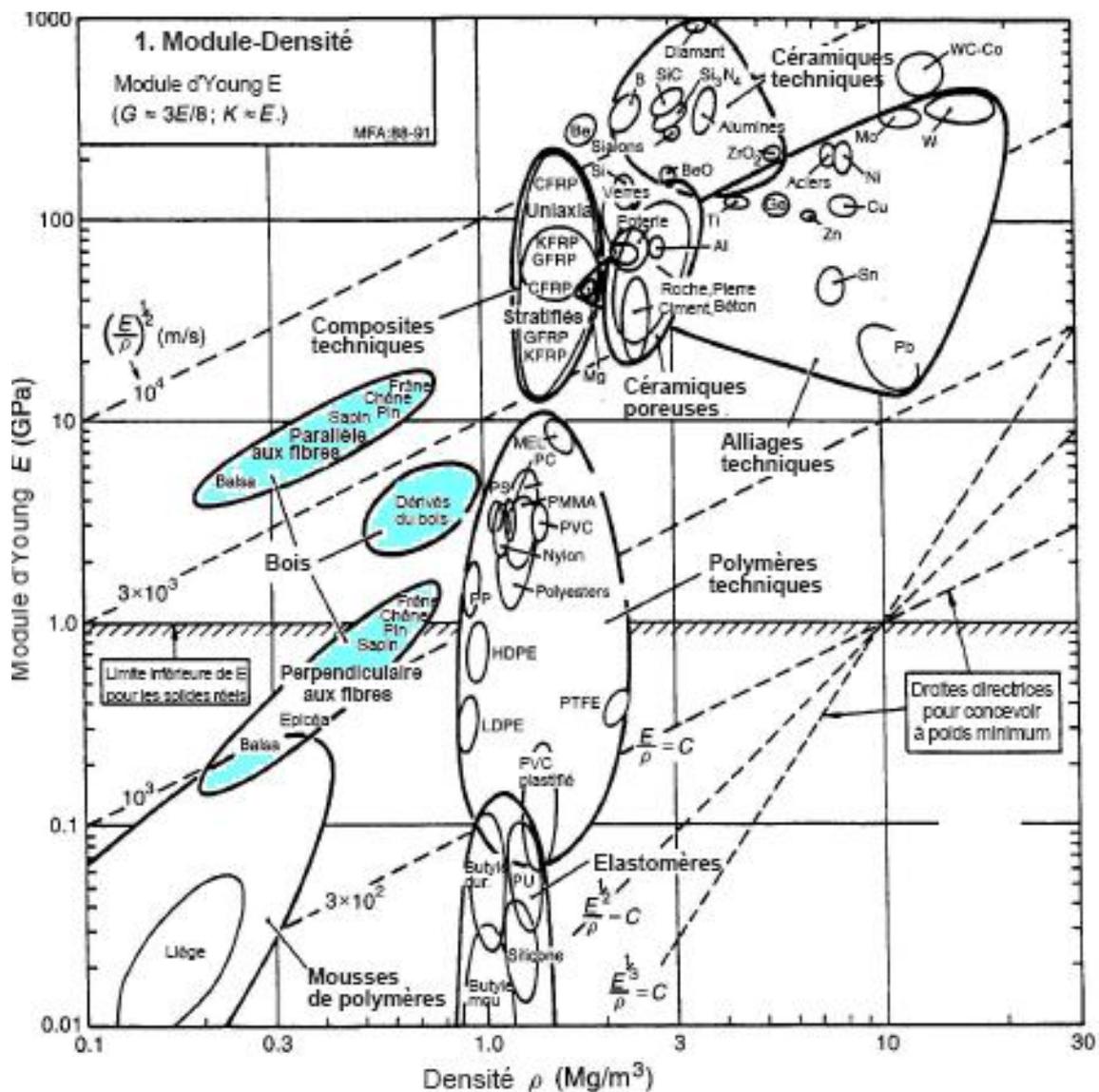


Figure II.3. Relation entre module d'élasticité et la masse volumique pour différents matériaux [Kol'68]

Pour le cas du bois, les modules élastiques et spécialement le module de l'axe longitudinal, sont fortement influencé par la densité. Cette caractéristique pouvant être très variable, le module d'élasticité longitudinal sera une valeur intégrant une variabilité importante, comme on peut le voir sur la figure II.4.

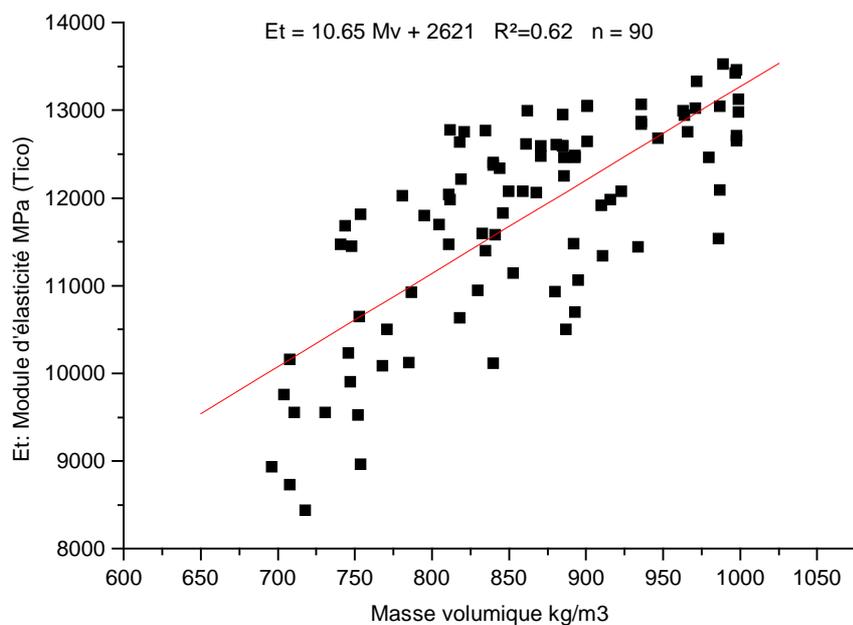


Figure II.4. Relation entre module d'élasticité du bois et sa masse volumique à 12% d'humidité [Gui'94]

La densité influe également sur la contrainte de rupture, comme on peut le voir sur la figure II. 5

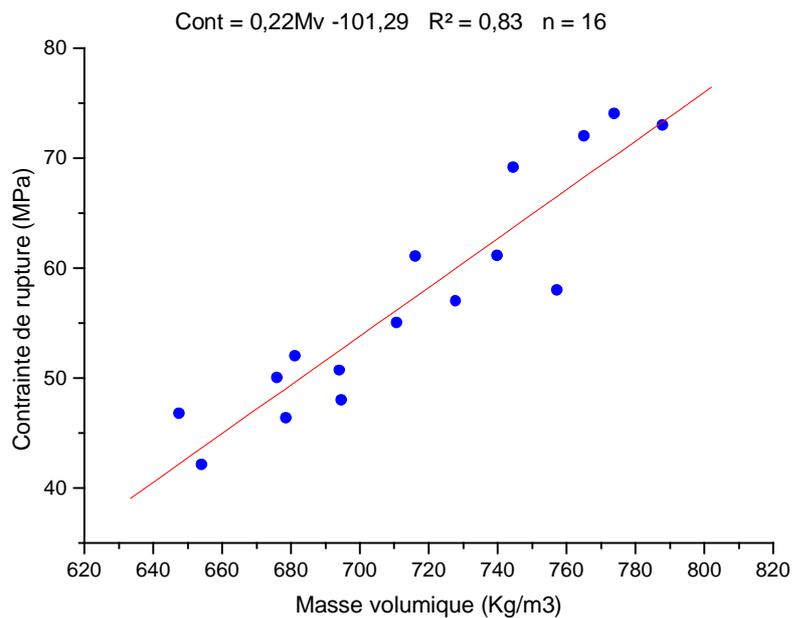


Figure II.5. Relation entre la contrainte de rupture du Pin d'Alep et sa masse volumique à 12% d'humidité [DAO'05]

3.2. Humidité

Au dessus du point de saturation des fibres (PSF), l'hygroscopie n'influence pas, ou très peu, les propriétés élastiques du bois. Au dessous du point de saturation, elle affecte de façon considérable les propriétés élastiques, comme le montre la figure II.6. Etant donné ces variations, les propriétés élastiques et la résistance du bois sont données pour une hygroscopie de référence, en principe de 12%.

Pour le dimensionnement, les caractéristiques mécaniques normalisées du bois évolueront en fonction de l'hygroscopie.

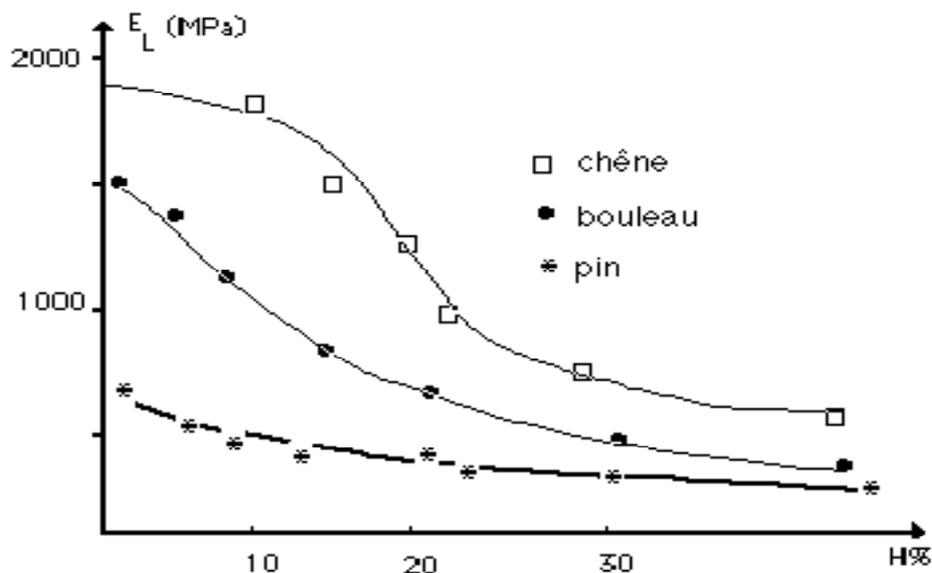


Figure II.6. Influence du taux d'humidité sur les caractéristiques du bois [Kol'68]

3.3. Température

L'influence de la température sur la résistance, l'élasticité et la plasticité du bois est importante. Comme tous les polymères ou macro-polymères, l'élévation de température des molécules cristallines augmente l'activation atomique. Ces oscillations moléculaires sont source de désordre. Si l'allongement ou la dilatation provoquée par l'élévation de température est négligeable, l'affaiblissement des propriétés élastiques est notoire.

3.4. Nœuds et entailles

Les propriétés élastiques du bois sont très sensibles à la présence de nœuds. L'analyse des propriétés mécaniques des bois a été réalisée notamment pour les résineux sur de petites éprouvettes sans défauts. Les équivalences entre résultats sur petites éprouvettes et comportement des éprouvettes à l'échelle industrielle ont montré selon les auteurs (Américains et européens) qu'il n'y avait pas ou peu de corrélations entre les propriétés mécaniques des éprouvettes sans défauts et la résistance de poutres de sections réelles. Cette dispersion des propriétés de la matière parfaite par rapport au matériau contenant des hétérogénéité macro structurelles est essentiellement causée par les nœuds.

La figure 16 qui suit montre un exemple d'influence, sur la contrainte, d'un nœud et de son voisinage. Si le nœud est bien adhérent, sa rigidité peut être jusqu'à sept fois supérieure à celle de la matière adjacente, ce qui a pour conséquence de concentrer les contraintes et de précipiter la rupture.

Sur une poutre fléchie par exemple, un nœud aura, en fonction de sa position par rapport à la fibre tendue, à l'axe neutre ou à la fibre comprimée, une influence complètement différente :

- Sur la fibre tendue, il fragilise la poutre en servant d'amorce de rupture, même à très faible niveau de sollicitation.

- Dans l'axe neutre, son influence est négligeable, même sur le comportement en cisaillement.

- Sur la fibre comprimée, son influence est très inférieure à celle sur la fibre tendue. Il n'y a en effet jamais fragilisation en compression. Le seul phénomène est de contribuer à des excentricités locales qui elles mêmes participeront à un fluage local, donc soit au déversement, soit à un déphasage de l'axe neutre et un transfert de contraintes maximales en traction (voir les trois différents modes de déformation en flexion).

Les nœuds (ou nodosité) sont un paramètre très important de la définition qualitative du bois.

Cet indicateur se retrouve comme critère essentiel du classement visuel des bois massifs de structure. Si le diamètre des nœuds et le nombre de nœuds groupés augmentent dans une poutre, elle est déclassée et ses propriétés mécaniques utiles sont diminuées.

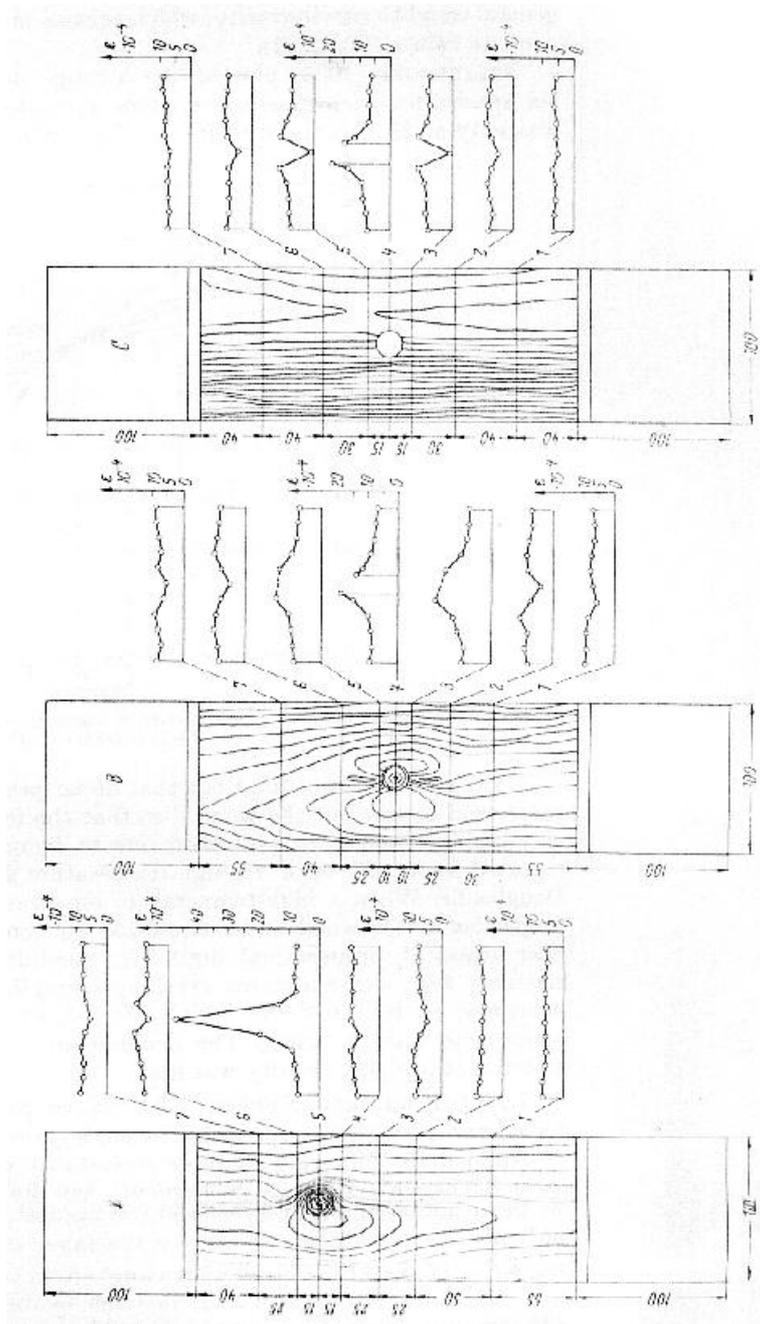


Figure II.7. Exemple de concentration de contraintes dans un nœud et dans son voisinage dans le cas d'une planche de Pin soumise à la traction [Kol'68]

4. INFLUENCE DES DEFATS SUR LA RESISTANCE A LA RUPTURE DU BOIS

Dans l'étude des contraintes ultime du matériau bois, celui-ci était considéré comme sain, exempt de défauts, situation que l'on sait fortement éloigné de la réalité en raison de la présence inévitable de gerces, fentes, entailles, nœuds etc. L'influence des défauts sur la résistance à la rupture du bois peut être appréhendée en comparant le module de Young de ce matériau et sa résistance ultime dans la même direction naturelle. Un simple calcul

énergétique, faisant l'hypothèse que la cohésion moléculaire est modélisable par un ressort élastique montre que la résistance théorique à la rupture serait de l'ordre du centième [Oht'81]. Une telle diminution de la résistance trouve son explication dans l'existence de contraintes locales fortement amplifiées qui vont permettre l'amorçage de la rupture. Ce sont les défauts naturels ou artificiels qui vont servir d'amplificateurs de contraintes. L'amplification locale de contrainte sera la plus forte à la pointe du défaut et son amplitude dépendra à la fois de l'acuité du défaut et du degré d'orthotropie du comportement mécanique. Ainsi une amplification des contraintes (ou concentration) de l'ordre de trois apparaît pour un trou dans une plaque constituée d'un matériau isotrope, elle s'élève entre 7 et 9 lorsque le bois devient le matériau constitutif et elle tendra vers l'infini quand on substituera au trou une fente très aiguë. On parle dans ce cas de singularité de contraintes. L'étude de la singularité des contraintes à la pointe d'une fissure dans un matériau isotrope a été étudiée particulièrement par [Duc'87] qui a introduit le concept de facteur d'intensité de contraintes pour décrire le gradient de contraintes à l'extrémité de cette fissure. Ce même paramètre peut être utilisé pour la description du champ de contraintes à la pointe d'une fente dans le bois mais ces valeurs sont nécessaires pour une description complète qui tient compte des orientations mutuelles de la fente et du chargement et ce par rapport aux directions naturelles du bois. Le même concept de facteur d'intensité de contraintes peut être utilisé pour décrire le champ de contraintes à l'extrémité d'une entaille mécanique d'ouverture variable [Duc'87].

Le facteur de concentration de contraintes permet de calculer une contrainte finie et maximale à la pointe de défaut en multipliant la contrainte globale par ce facteur. Dans le cas du bois, cette contrainte est si élevée qu'on peut être naturellement tenté de l'assimiler à une contrainte singulière.

Les types de défauts du bois sont extrêmement variés, il est toutefois coutumier de les classer en défauts naturels et autres défauts. Dans cette dernière catégorie entre les défauts dus à l'action d'agents d'origine bactériologique (champignons), chimique (oxydation), insectes ou aux conditionnements du bois par séchage, étuvage ou usinage.

Citons parmi ces derniers, la fissuration en surface lors d'un séchage trop rapide. Dans ce cas, l'intérieur de la pièce de bois est encore humide et soumis à des contraintes de compression tandis que l'extérieur est sec et soumis à des contraintes de traction qui favorisent l'apparition des fissures externes. Ensuite, la distribution des contraintes s'inverse car l'extérieur n'a plus la possibilité de présenter du retrait comme le cœur de la pièce. Lorsque les contraintes induites par le séchage ne sont pas suffisamment importants pour provoquer la fissuration, un

voilement ou un gauchissement des planches se produit sous l'effet des contraintes internes ainsi générées.

La ruine du bois vert est un phénomène particulier qui se produit lorsque celui-ci est porté à température trop élevée. En effet, le bois présente alors un comportement plastique et perd ses qualités de résistance. La pièce de bois est alors déformée très fortement sous l'effet de contraintes macroscopiques induites par le gradient d'humidité à travers la pièce lors du séchage. Des rangées de cellules sont littéralement écrasées par la tension des forces capillaires dans les cellules qui perdent leur eau de remplissage. Enfin, la flache est un exemple typique de défaut de sciage et constitue en une portion de la surface de la grume qui reste apparente sur le bois scié.

Les défauts dans le bois, préjudiciables à l'aspect esthétique et aux caractéristiques mécaniques du matériau sont pris en compte pour en définir la qualité. Dans le cas du bois destiné à la construction, les normes définissent des classes de qualité qui prennent surtout en compte l'existence et les caractéristiques des nœuds et des gerces.

Toutefois, il faut remarquer que le bois présente bien d'autres types de défauts naturels dont on trouvera une nomenclature détaillée en annexe.



Figure II.8. Exemple de défaut naturel : cas d'un nœud non adhérent

La présence d'un défaut et par voie de conséquence le classement en catégorie inférieure a deux conséquences : il diminue le prix du bois et impose une diminution de la contrainte admissible. Ce fait avait été d'ailleurs reconnu en 1770 par Buffon selon [Plu'92] qui disait : "Et j'ai reconnu par là combien les nœuds ôtent de la force au bois, ce qui est beaucoup au delà de ce qu'on pouvait imaginer : un nœud qui se trouvera sur une cheville qu'on mettra à la face inférieure et surtout à l'une des arêtes, diminue quelquefois d'un quart la force de la pièces". Compte tenu du degré d'empirisme qui préside aux classifications de bois, le résultat est un surdimensionnement, ce qui conduit toujours à une augmentation du coût de la construction.

5. PLASTICITE, FATIGUE ET FLUAGE

La loi de Hooke, assimilant le comportement des matériaux à un modèle parfaitement élastique, ne peut pas être valide dans tous les domaines de sollicitations, pour des matériaux aussi complexes que le bois ou certains hauts polymères. Pour le bois, le comportement en compression devient rapidement non linéaire quand la sollicitation augmente (Figure II.9.)

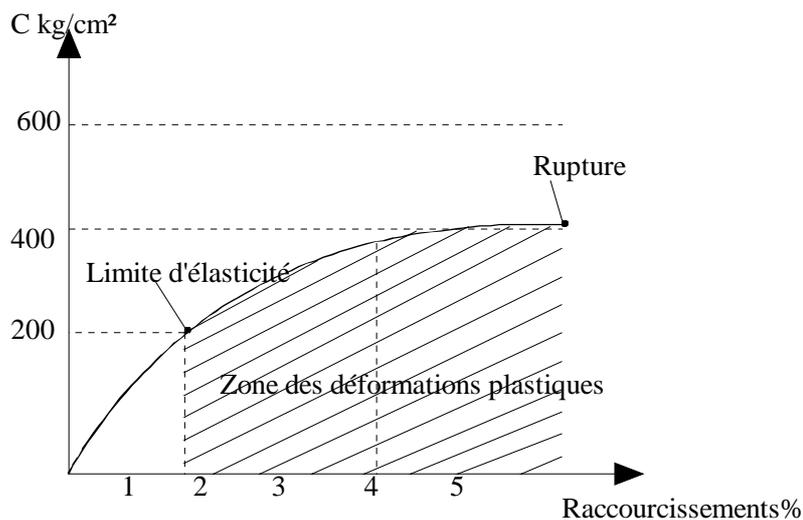


Figure II.9. Diagramme de compression axiale du Sapin [Kol'68]

Sur le diagramme, on constate que la partie rectiligne de la courbe correspond à une zone d'élasticité, est courte et que l'on atteint rapidement la zone des déformations plastiques.

On peut définir vers l'origine une valeur du module d'élasticité longitudinale en compression.

Le travail de rupture de l'éprouvette est mesuré par la surface du diagramme.

Si un matériau élastique obéit à la loi de Hooke, ses déformations après sollicitations doivent être réversibles. La déformation différée est nulle, et la réversibilité est complète, même sous charges cycliques. Le bois n'est pas un matériau parfaitement élastique. Il a un comportement élasto-plastique ou visco-élastique [Gui'87].

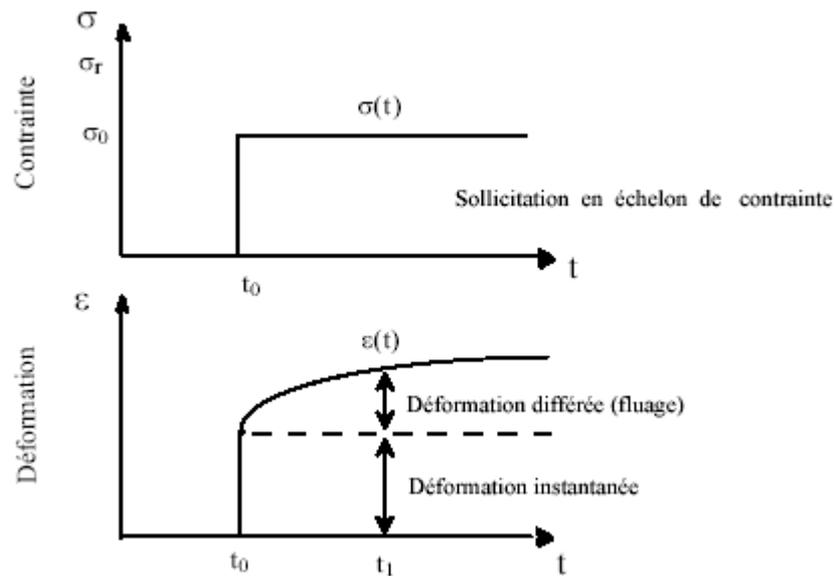


Figure II.10. Réponse en déformation d'un matériau viscoélastique à un échelon de contrainte (fluage) [Gui'87]

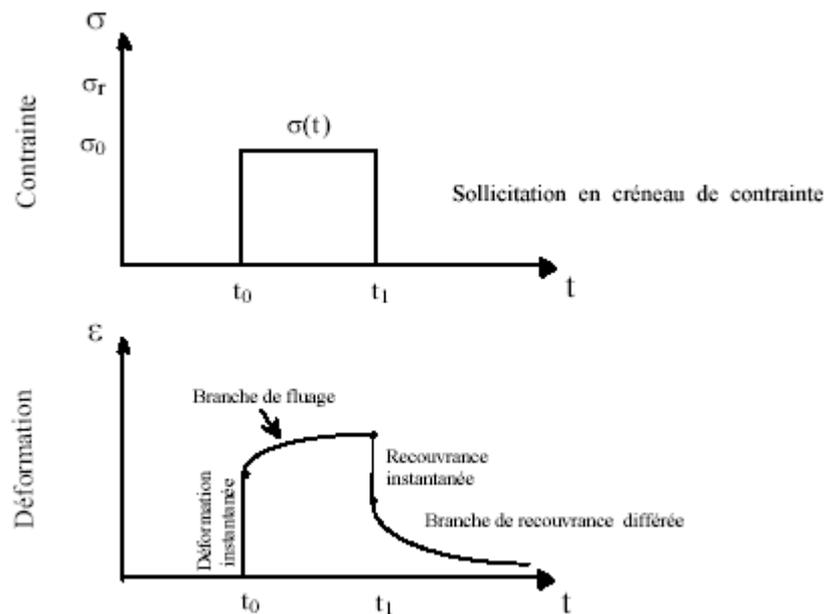


Figure II.11. Réponse en déformation d'un matériau viscoélastique à un créneau de contrainte (fluage + recouvrance) [Gui'87]

6. SOLLICITATIONS MECANQUES A LA RUPTURE

La résistance à la rupture d'un matériau est une des propriétés mécaniques les plus significatives. La nécessité d'assurer l'intégrité des structures, moins fréquemment celle de réaliser la fragmentation des matériaux rend indispensable la connaissance des contraintes

ultimes qu'ils peuvent supporter [Plu'92][Tri'81]. Toutefois, la conception d'une structure en bois ne saurait éluder le problème de la présence inévitable de défauts tels que les gerces, les nœuds, etc. qui peuvent affecter la résistance à la rupture au point que la contrainte critique peut être parfois inférieure à la contrainte admissible.

6.1. Sollicitation en traction

L'essai de traction dans les directions naturelles du bois est réalisé selon un essai normalisé dont on trouvera une description dans la norme AFNOR ou ASTM D143. Deux types d'éprouvettes sont utilisés, l'un pour obtenir la résistance à la traction dans la direction longitudinale (figure II.12.), l'autre pour obtenir la résistance à la traction dans les deux autres directions naturelles perpendiculaire à cette dernière (figure II.13.).

L'éprouvette de traction longitudinale est fixée aux têtes d'amarrage par l'intermédiaire de mors à coins, ce qui peut provoquer parfois des ruptures indésirables.

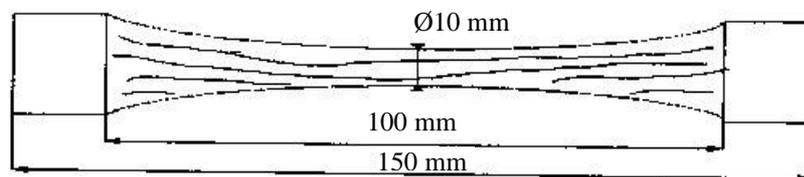


Figure II.12. Eprouvettes de traction pour des essais où la charge est appliquée selon la direction longitudinale [Nor'87]

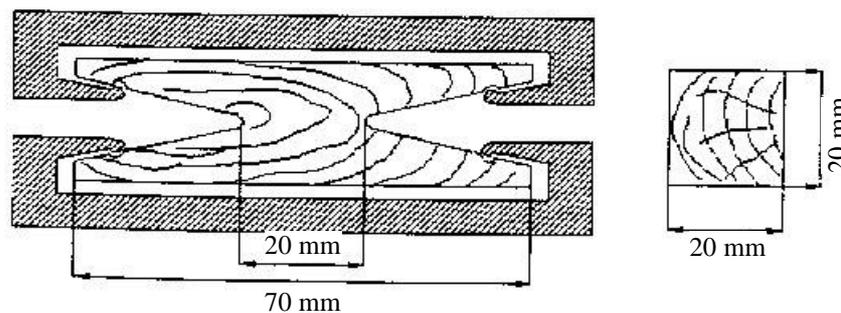


Figure II.13. Eprouvettes de traction pour des essais où la charge est appliquée selon la direction radiale ou tangentielle [Nor'87]

L'éprouvette de traction radiale ou tangentielle est appelée parfois éprouvette Monin et est plus compacte pour des raisons d'homogénéité. Le diagramme contrainte déformation présente une partie linéaire relativement importante et un domaine réduit où apparaît de la non linéarité. Celle-ci peut être attribuée à de l'endommagement et plus particulièrement à des

fissurations des parois cellulaires. La fin du comportement proportionnel peut être assimilée à une véritable limite d'élasticité.

6.1.1. Influence de divers paramètres physiques sur la résistance à la traction dans les directions naturelles du bois

La résistance ultime en traction est évidemment influencée par l'espèce, la direction de sollicitation mais aussi l'humidité, la densité du bois ainsi que la vitesse de sollicitation. Le tableau II.2. rassemble des valeurs des contraintes ultimes en traction selon les trois directions naturelles pour deux essences : le pin sylvestre et le wana kouali. Ces valeurs sont tirées des travaux de M.T Gautherin [Gau'80].

Tableau II.2. Exemple de valeurs des contraintes ultimes en traction cas du pin sylvestre et le wana kouali [Gau'80].

	$S_{u,L}^t$	$S_{u,R}^t$	$S_{u,T}^t$
Pin sylvestre	80 MPa	5 MPa	5 MPa
Wana kouali	65 MPa	3 MPa	7 MPa

On notera, une faible différence entre ces valeurs et celle de la contrainte ultime en traction selon la direction longitudinale. L'accroissement d'humidité diminue généralement la contrainte ultime en traction jusqu'à une valeur asymptotique pour un taux d'humidité variant entre 30 et 40% taux d'humidité correspondant au point de saturation des fibres.

6.2. Sollicitation en compression selon la direction naturelle du bois

Ces essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques. Les essais de compression sont le plus souvent faits sur des cylindriques de 60mm de hauteur et de 20mm de diamètre. Le taux d'élanement (hauteur sur diamètre) est suffisamment petit pour éviter les phénomènes de flambage.



Figure II.14. Essai de compression [Ben'82]

Les frictions inévitables qui apparaissent à l'interface des plateaux de compression sont limitées en intercalant dans la zone de contact des feuilles de téflon. La valeur du coefficient de frottement a par ailleurs une influence considérable sur la forme du diagramme charge déplacement. Celui-ci présente une courte période de comportement élastique et ensuite un domaine non linéaire relativement important. Le point critique est considéré comme le maximum de la courbe et intervient après une déformation importante. La résistance en compression du bois théorique, c'est à dire étudiée sur des petits cubes de matière sans défauts, est beaucoup plus faible que la résistance en traction et se situe à un niveau de 40% à 50% par rapport à celle-ci. Cet affaiblissement est causé par l'organisation micro-structurale mono axiale qui favorise le flambage local des fibres. Par ailleurs, si le comportement en traction est fragile, le comportement en compression est rapidement plastique, initié par les flambages autour de toutes les discontinuités, telles que les nœuds. Etant donné la plasticité du bois en compression, les valeurs de dimensionnement sont supérieures à celles de traction. Les essais de compression selon les directions tangentiels et radiales sont plus délicats à réaliser car le bois va se densifier et augmenter ainsi sa résistance. La résistance à la rupture est alors plus difficile à définir. Elle est alors prise conventionnellement au palier de la courbe contrainte allongement (figure II.15.)

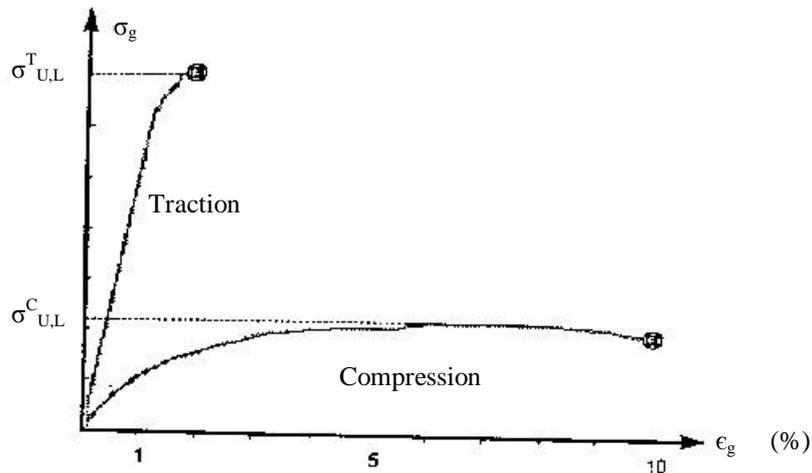


Figure II.15. Diagramme charge déplacement pour un essai de compression comparaison avec le diagramme obtenu en traction [Tro'01]

En compression perpendiculaire, les déformations par écrasement sont atteintes assez vite. Si elles n'affectent pas directement la sécurité de l'ouvrage d'un point de vue résistance, elles doivent cependant être limitées.

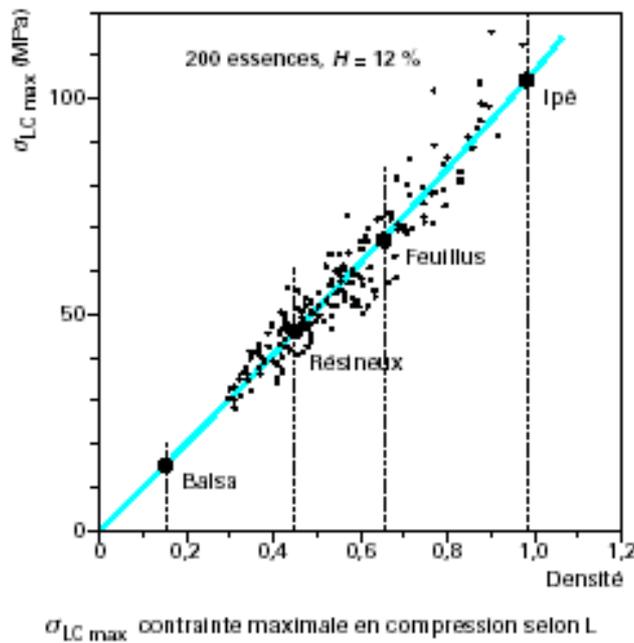


Figure II.16. Effet de la densité sur les propriétés mécaniques sur l'ensemble des essences [Tro'01]

6.3. Sollicitation et contraintes ultimes en flexion

L'association des comportements spécifiques du bois en traction et en compression détermine les caractéristiques du comportement en flexion. La résistance en flexion est supérieure à la résistance en compression, avec un ratio établi à 1,75.

Un essai de flexion provoque une distribution de contrainte présentant à la fois un gradient et une répartition de contraintes de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre. La différence entre les contraintes ultimes en traction et compression va conduire à une distribution dissymétrique des contraintes. Compte tenu du fait que la déformation ultime en traction est plus faible que la déformation ultime en compression la rupture s'amorcera sur la fibre externe en traction.

La contrainte ultime en flexion $\sigma_{u,f}$ est reliée à la contrainte ultime longitudinale $\sigma_{u,L}^t$ en traction selon une relation qui dépend des hypothèses prises sur la distribution des contraintes mais dont la forme générale est : $\sigma_{u,f} = C_2 \cdot \sigma_{u,L}^t$ C_2 est une constante.

A cause de la plasticité en compression, la section fléchie présentera différentes distributions.

6.4. Hypothèse d'une distribution trapézoïdale des contraintes

Dans cette distribution (figure II.16.), la distribution des contraintes en fonction des déformations est triangulaire en traction, trapézoïdale en compression.

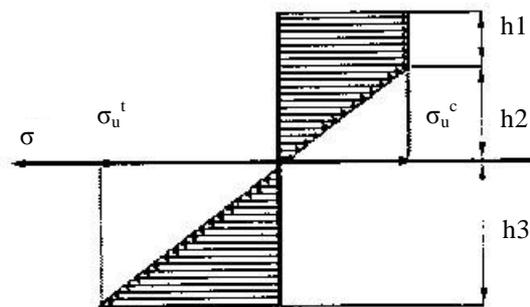


Figure II.16. Hypothèse d'une distribution de contraintes trapézoïdales dans la flexion d'une poutre en bois [Ben'82]

L'égalité des aires OAB et OCDE, nécessaire à la condition d'équilibre entraîne que :

$$m' \sigma_{u,L}^t \cdot \varepsilon_u^c - m' \sigma_u^t (m' \sigma_{u,L}^t / E_L) / 2 = t \cdot \sigma_{u,L}^t / 2$$

avec $m' = \sigma_u^c / \sigma_{u,L}^t$ et $t = \sigma_{u,L}^t / E_L$

d'où $\varepsilon_u^c = \sigma_{u,L}^t / E_L \cdot 1 + (m')^2 / 2 m'$ et $\varepsilon_u^c / t = 1 + (m')^2 / 2 m'$

E_L est le module de Young longitudinal du bois.

La position de l'axe neutre dépend donc du rapport $\sigma_{u,L}^t / \sigma_{u,L}^c$ selon :

$h_3 / 2h = 1 + (m')^2 / 2 m'$

avec $2h = h_1 + h_2 + h_3$. Généralement on trouve : $\sigma_{u,f} = C_2 \cdot \sigma_{u,L}^t = C_2 / m' \cdot \sigma_{u,L}^c$

6.5. Hypothèse d'une distribution parabolique des contraintes

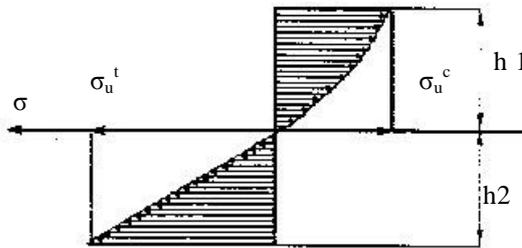
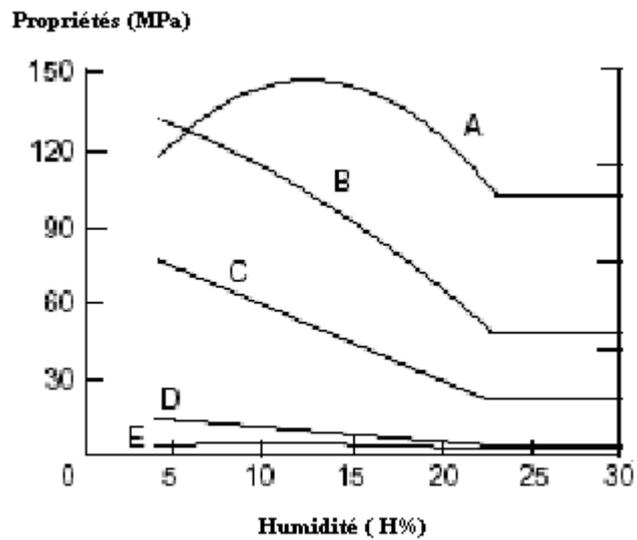


Figure II.17. Hypothèse d'une distribution de contraintes paraboliques dans la flexion d'une poutre en bois [Ben'82]

Cette distribution est représentée sur la figure II.17. Dans ce cas, la condition d'équilibre entraîne que : $2/3 \cdot \sigma_{u,L}^c \cdot h_1 = 1/2 \sigma_{u,L}^t (2h - h_2)$ d'où $h_2 / 2h = 3 / 4(m' + 3)$

La résistance en flexion est corrélée à la densité et au module d'élasticité, mais ces corrélations sont assez moyennes, étant donné les incertitudes de comportement élasto-plastique.

La résistance en flexion est également très sensible à l'humidité (figure II.18.).



- A. traction parallèle au fil
- B. Flexion
- C. Compression parallèle au fil
- D. Compression perpendiculaire au fil
- E. Traction perpendiculaire au fil

Figure II.18. Influence de l'humidité sur les propriétés mécanique du bois [Ben'82]

7. MODES DE RUPTURES DANS LE BOIS

L'analyse morphologique des ruptures du bois révèle de nombreux modes de ruine qui sont fonction du type de sollicitation et de la présence de défauts ou de plans de faiblesse du bois. On distingue généralement les types de rupture suivants.

7.1. Rupture par compression

Dans ce cas on distingue :

- Rupture transverse par écrasement de fibres ; (a_1).
- Fendage en biseau identifiable par la forme en y du plan de rupture ; (b_1).
- Fendage simple ; (c_1).
- Fendage et rupture transverses ; (d_1).
- Ecrasement des extrémités souvent en raison d'un taux d'humidité important ; (f_1).

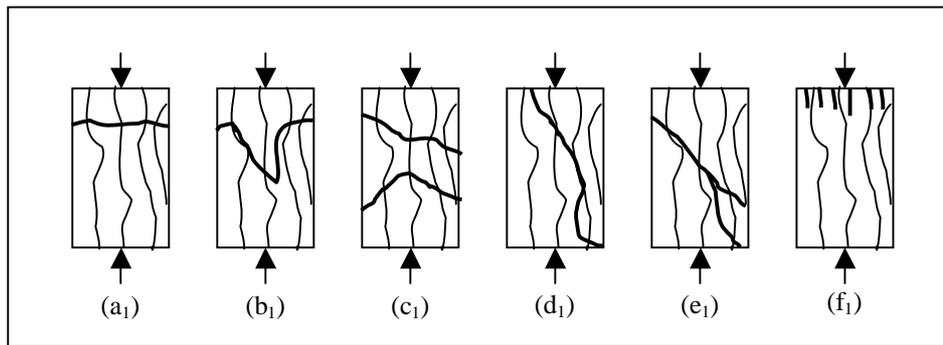


Figure II.19. Morphologie des faciès de rupture en compression [Plu'92]

7.2. Rupture par traction

- Rupture en biseau ; (a₂).
- Rupture combinée traction cisaillement ; (b₂).
- Rupture par cisaillement ; (c₂).
- Rupture fragile ; (d₂).

Dans le cas d'une sollicitation de traction, la contrainte maximale principale est précisément la contrainte de traction.

La rupture normale (cas d₂) se fait dans un plan perpendiculaire à la direction de cette traction, la rupture par scission dans une direction à 45° (cas c₂), la rupture par scissions multiples par une alternance de plans de rupture dans les (02) directions de cisaillement maxi (cas b₂).

En fin on faciès mixte peut se présenter (cas a₂).

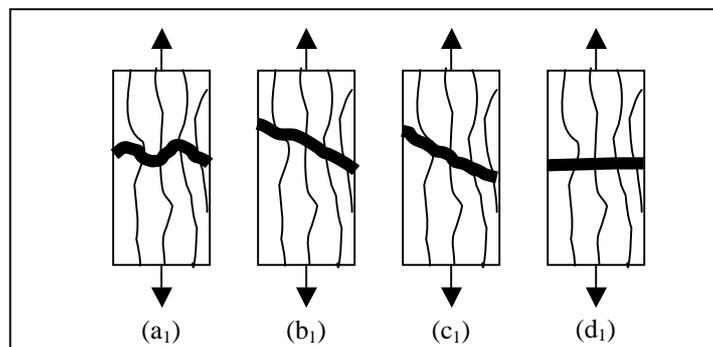


Figure II.20. Morphologie des faciès de rupture en traction [Plu'92]

7.3. Rupture par flexion

- Par simple traction ; (a_3).
- En biseau ; (b_3, c_3).
- Par traction des fibres ; (d_3).
- En compression ; (e_3).
- Cisaillement longitudinal ; (f_3)

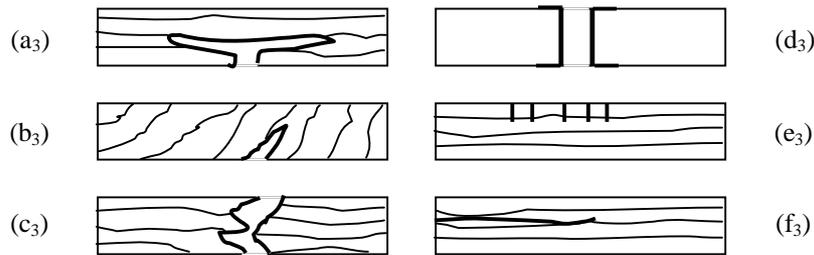


Figure II.21. Morphologie des faciès de rupture en flexion [Plu'92]

Dans le cas de la flexion, la contrainte principale de traction est dans la direction axiale et le plan d'une rupture fragile lui est perpendiculaire (cas d_3).

Des fissures peuvent toute fois apparaître dans la zone comprimée (cas e_3). La scission est, dans le as d'un essai de flexion non circulaire, maximale dans le plan de la fibre neutre et le plan de rupture contient alors cette direction (cas f_3). Des types de rupture mixte peuvent évidemment apparaître (cas a_3, b_3 et c_3).

CONCLUSION

Le comportement mécanique du bois sec est celui d'un matériau élastique orthotrope. Il peut être décrit à l'aide de neuf constantes techniques associées aux directions naturelles : trois modules de Young, trois coefficients de poisson, trois modules de torsion [Gui'87], Plu'92] [Jod'01]. La résistance ultime du bois possède un caractère orthotrope en relation avec les direction naturelles de ce matériau. Elle est plus importante dans le sens longitudinal (de 7 à 10 fois) que dans les deux autres directions où les valeurs sont sensiblement identiques. La résistance en compression du bois est bien moindre que celle en traction en raison d'un mécanique de flambage des fibres. La flexion provoque une distribution de contrainte présentant à la fois un gradient et une répartition de contraintes de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre.

La représentation par un critère de résistance ultime du bois nécessite de faire appel à des critères utilisés pour les matériaux composites. Le faciès de rupture est à la fois fonction du système de sollicitation et de la structure fibreuse du bois

Les défauts du bois tels que gerces, nœuds, entailles ont une influence très néfaste sur la tenue mécanique des pièces de bois possédant de tels défauts [PER'01]. Ceux-ci, en gênant le transfert du flux de force créent localement des contraintes très importantes qui faciliteront l'amorçage des ruptures. L'orthotropie du matériau bois augmente d'une façon très significative le gradient de contraintes à la pointe de ces défauts [Oht'82]. L'orthotropie influence aussi le point où les contraintes au bord du trou sont maximales car ce point dépend des orientations mutuelles du chargement et des fibres. Cet ensemble de remarques servira de base d'observation et d'analyse dans le chapitre qui suit, celui ci étant relatif à la partie expérimentale.

Chapitre III

Approche expérimentale

INTRODUCTION

Les différentes synthèses bibliographiques montrent que les propriétés mécaniques du bois, sont étroitement liées, à leur masse volumique [Gui'87], [Dil'92], [Dao'05], c'est à dire à la quantité de matière par unité de volume et à ses caractéristiques anatomiques, c'est à dire à l'organisation de ses éléments constitutifs, propres à chaque espèce. Une meilleure connaissance du comportement mécanique du matériau bois, indispensable à un emploi adéquat passe par l'étude des modules d'élasticité et de la contrainte de rupture « E » et « S_{rupt} » et permet une classification mécanique pour assurer aussi bien la fiabilité que la sécurité d'une construction légère. De ce fait, l'objectif de la présente expérimentation est de pouvoir arriver à caractériser notre matériau lequel a été soumis à différentes sollicitations (flexion statique et traction) permettant ainsi le calcul de quelques caractéristiques mécaniques (charges, module d'élasticité, contraintes). Ces résultats peuvent aboutir à un positionnement du matériau vis à vis d'autres, et seront injectées dans le chapitre relatif au calcul numérique pour déterminer la concentration de contraintes pour différents cas de mesure (bois sain sans défauts, contrainte autour d'un défaut naturel nœud simulé par un trou et enfin le cas d'un nœud non adhérent simulé par un trou bouchonné).

1. ETAT DES CONNAISSANCES

Depuis de nombreuses années, plusieurs études ont été effectuées pour connaître, les caractéristiques des bois sains et avec défauts ainsi que l'influence de divers paramètres géométriques liés au nœud (diamètre, position,...)[Irw'69], [Duc'87], [Jod'01], [Oht'81], [VER'87]. Nous noterons au passage que celles liées à la variation des propriétés physiques et mécaniques autour du nœud sont rares. De ce fait, nous nous sommes penchés sur ce problème en essayant d'étudier dans un premier temps par un état des connaissances sur ces points et procéder par la suite à une série d'expérimentation basée essentiellement sur le phénomène de flexion car le plus usité en construction à ossature bois.

Les méthodes de classement visuel établissent des relations entre la présence des singularités et les caractéristiques mécaniques sans prendre en compte leurs paramètres descriptifs : taille, position[Cha'93]. Des études sont actuellement développées pour réaliser de tels rapprochements par analyse statistique sur des pièces de dimension commerciale. Des corrélations directes sont établies entre taille des nœuds et résistance mécanique[Oht'81], notamment la résistance à la traction de pièces de Douglas en fonction de la taille des nœuds

qu'elles contenaient, et ont distingué les nœuds centrés de ceux situés au bord de pièces ; de même qu'il a été recensé dans le bois du nœud :

- Une densité et une humidité presque analogue à celles du bois situé loin du nœud.
- Une teneur en résine anormale.

Mise en évidence d'interactions entre facteurs explicatifs des caractéristiques mécaniques des pièces en dimensions d'emploi. L'influence des nœuds sur les caractéristiques mécaniques du pin maritime a été mise en évidence [Ver'87] ou différentes études ont été prise en charge. C'est ainsi que sur 1064 éprouvettes soumises à des essais de flexion quatre points (détermination du module élastique de flexion et de la contrainte à la rupture), la distribution des paramètres physiques, taille et position des nœuds, caractéristiques mécaniques a été analysée par les lois de Weibull à 2 et 3 paramètres en relation avec la position des pièces de bois dans l'arbre et en particulier la hauteur de prélèvement (hauteur du billon). Outre la masse volumique, le module d'élasticité apparaît comme le meilleur prédicateur de la contrainte de rupture. Les autres paramètres ont une influence secondaire.

Une approche par la mécanique de la rupture de l'influence d'un nœud sur le comportement mécanique d'une pièce de bois prise en charge [Oth'81]. Dans son intervention portant sur l'influence d'un nœud sur la résistance en traction d'une planche, il démontre que sur une zone de largeur X_c les fibres du bois sont supposées fortement perturbées par la présence du nœud. Cette perturbation est assimilée à une fissure préexistante de demi longueur X_c .

La contrainte globale de traction simple σ dans la pièce de bois loin du nœud, est, lors de sa rupture, liée à la contrainte ultime du bois sans nœud (σ_{ult}), au diamètre du nœud (ϕ) et à la longueur critique X_c par la formule (1) développée par IRWIN [Irw'69] pour une plaque trouée comportant une fissure préexistante de longueur X_c .

Une méthode de détermination des propriétés à la rupture de pièces de bois avec nœuds a été développée [Jod'01] en s'appuyant sur le fait que, localement, on trouve toujours une zone de fil dévié, perpendiculaire à l'axe de l'effort et, donc, sollicitée dans les directions R ou T, moins résistantes. Les études de corrélations entre caractéristiques de nodosité et paramètres de déformabilité / rupture de pièces de bois en flexion; le module d'élasticité MOE est peu sensible aux caractéristiques de la nodosité mais reste aussi très dépendant de la masse volumique.

2. PRINCIPE DE LA FLEXION STATIQUE

L'essai de flexion prend en ligne de compte l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application d'une charge appliquée et positionnée à mi-distance des appuis. On impose à une éprouvette normalisée, une déformation (flèche), à vitesse de déformation constante, et on mesure la force (charge appliquée) qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

La flexion provoque à la fois des sollicitations de traction, compression et cisaillement. Dans le cas du bois, la différence de caractéristique en traction et en compression entraîne le comportement spécifique d'une poutre soumise à flexion.

L'essai de flexion trois points, selon la norme AFNOR B51-008, sert à déterminer le module d'élasticité E et la contrainte à la rupture σ_R en flexion statique d'un matériau composite naturel comme le bois.

Les conditions géométriques de l'essai peuvent être celles préconisées par la norme d'essai de flexion statique (NF B51 008)

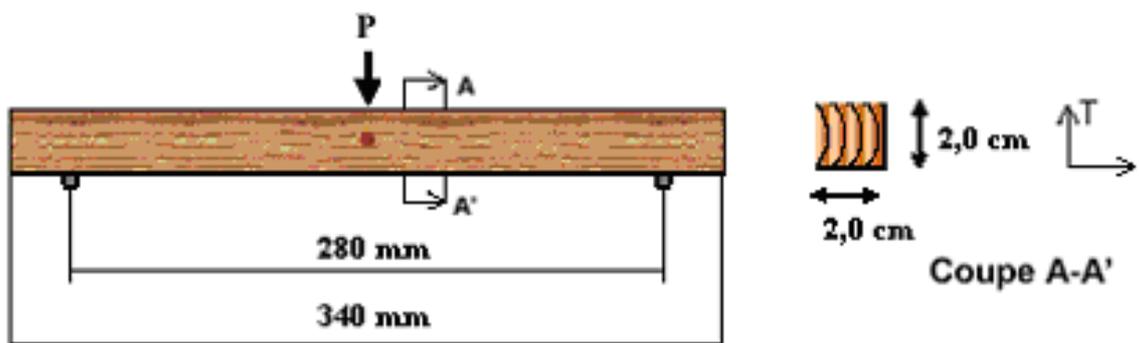


Figure III.1. Essai de flexion statique [Nor'87]

Dans la procédure expérimentale, les échantillons ont été conditionnés pour un taux d'humidité $H\% = 12\%$ et leurs dimensions sont comme suit : $h = 20$ mm, $e = 20$ mm et longueur 340 mm. La distance entre les appuis (L) est de 280 millimètres. La vitesse d'avancement du couteau est imposée de l'ordre de quelques millimètres par minute (10mm/min) pour le bois et pour nos essais nous avons retenue une vitesse de l'ordre de 10mm/min. Le cycle est répété trois fois et le module d'élasticité est pris pour une force comprise dans la plage 10-30% de la force de rupture. La formulation des grandeurs qui seront calculées se présente comme suit :

$$E = \frac{P_1 L^3}{4eh^3 y_1} \text{ (Mpa)} \quad \text{et} \quad s_R = \frac{3PL}{2eh^2} \text{ (MPa)}$$

Avec P_1 la charge correspondant à la limite élastique, P la charge maximum à la rupture, L la distance entre appuis, b la largeur, e l'épaisseur et y_1 le déplacement au centre à la charge P [Gui'87]. La charge est appliquée par un couteau de même profil que les appuis agissant au milieu de la portée L .

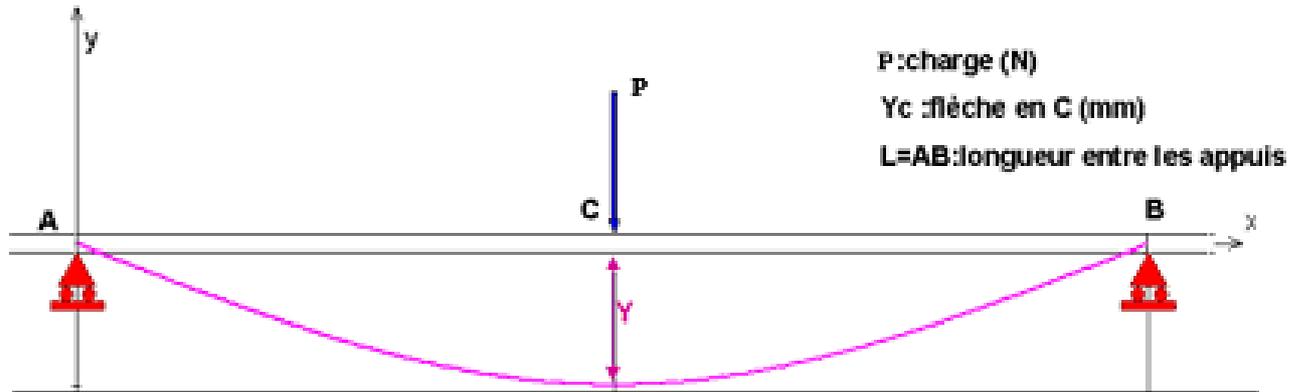


Figure III.2 Déformée statique en flexion 3 points

3. MATERIEL ET METHODES

3.1. Eprouvettes

Le choix des échantillons de Pin d'Alep est basé sur les considérations suivantes :

- La rectitude de l'arbre.
- Etat sanitaire acceptable.
- Diamètre d'exploitabilité.

Après l'abattage à 1,3m du sol, nous avons tronçonné les grumes en billons de 1m de longueur pour faciliter leur transport, leur stockage et conditionnement avec renouvellement d'eau tous les deux jours pour évacuer les dégagements de tanin. Ensuite nous avons procédé à leur écorçage (manuel), après leur tronçonnage à 1m à l'aide d'une scie pendulaire pour faciliter leur débitage. A l'aide de la dégauchisseuse nous avons réalisé une surface de référence qui servira au guidage des rondins au niveau de la scie à ruban.

Au moyen de scie circulaire à table nous avons obtenu des ébauches lesquelles étaient passées dans une raboteuse pour obtenir une surface lisse.

A partir des ébauches nous avons obtenu des éprouvettes normalisées pour chaque type d'essai à l'aide d'une petite scie circulaire.

Les différentes opérations aboutissant à la confection des éprouvettes sont schématisées dans ce qui suit :

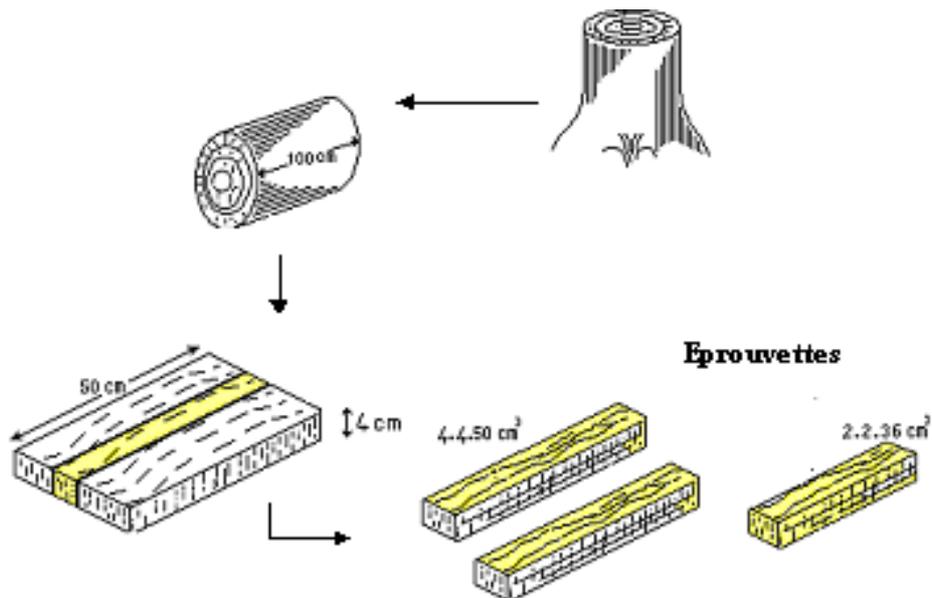


Figure III.3. Plan de découpe des éprouvettes normalisées

Etant donné la difficulté de choisir des éprouvettes avec des nœuds bien particuliers (centrés, circulaire, même dimension, positionnement bien localisé, nous avons sélectionné une centaine d'éprouvettes qui ont été débitées aux dimensions finales suivantes (340mm x 20mm x 20mm). De ce lot, nous en avons extrait 75 qui ont été sélectionnés selon les trois modalités suivantes (Figure III.4.):

- Modalité 1 : 15 éprouvettes pour des essais sans défauts
- Modalité 2 : 45 éprouvettes pour des essais avec défauts (perçage de différents trous de diamètres $\varnothing 5$, $\varnothing 8$, $\varnothing 11$, assimilés à des nœuds.
- Modalité 3 : 15 éprouvettes pour des essais sur trous bouchonnés (mélange colle + poussière) assimilés à des nœuds non adhérents ayant été rebouchés.



Figure III.4. Photo de quelques types d'éprouvettes

3.2. Principe de l'essai

Une éprouvette, supportée comme une poutre, est soumise à une flexion au milieu de la portée, à une vitesse constante, jusqu'à la rupture de l'éprouvette ou jusqu'à ce que la déformation ait atteint une valeur prédéterminée. Durant cet essai, la charge supportée par l'éprouvette est mesurée.

3.3. Machine d'essai

Les essais de flexion trois points statiques sont réalisés sur une machine d'essais statique de type Instron 100 KN pilotée par ordinateur et équipé d'un système d'acquisition de données Figure III.5.



Figure III.5. Banc d'essai de flexion [CNERIB]

Les dimensions, la masse volumique et l'humidité de chaque éprouvette ont été préalablement déterminées. L'éprouvette repose librement sur 02 appuis cylindriques rotules (02 axes). La distance entre les appuis est égale à 14 fois la hauteur fléchie, correspondant à une distance de 280 mm. Une force est appliquée avec une vitesse de chargement de 10 mm/mn pour une section de 20 x 20 mm.

Le module d'élasticité statique et la contrainte de rupture sont calculés suivant les formulations énumérées dans le principe de la flexion statique

N.B : Cas des poutres bouchonnés

Les trous sont colmatés par un mélange (colle – poussière)

La masse volumique du mélange est calculée par différentes proportions de colle et poussière

Nous avons retenus dans notre calcul la masse volumique des proportions suivantes entre colle et poussière.

$$\text{pour } \begin{cases} 30\% \text{ colle blanche} \\ 70\% \text{ sciure de pin d'Alep} \end{cases}$$

on a $M_m = 17\text{g}$

D'ou la masse volumique du mélange $M_{vm} = 0,67 \text{ g/cm}^3$

(calcul voir annexe 3)

3.4. Enregistrement des résultats

Le banc d'essai expérimental qui pilote la machine Instron permet la combinaison de plusieurs paramètres. Dans l'exemple de la figure, on a présenté l'exemple de la charge appliquée avec le déplacement de la traverse qui ont été enregistrées par le biais d'une procédure informatique. De même qu'il est possible d'obtenir une courbe charge / flèche ou contrainte / flèche.

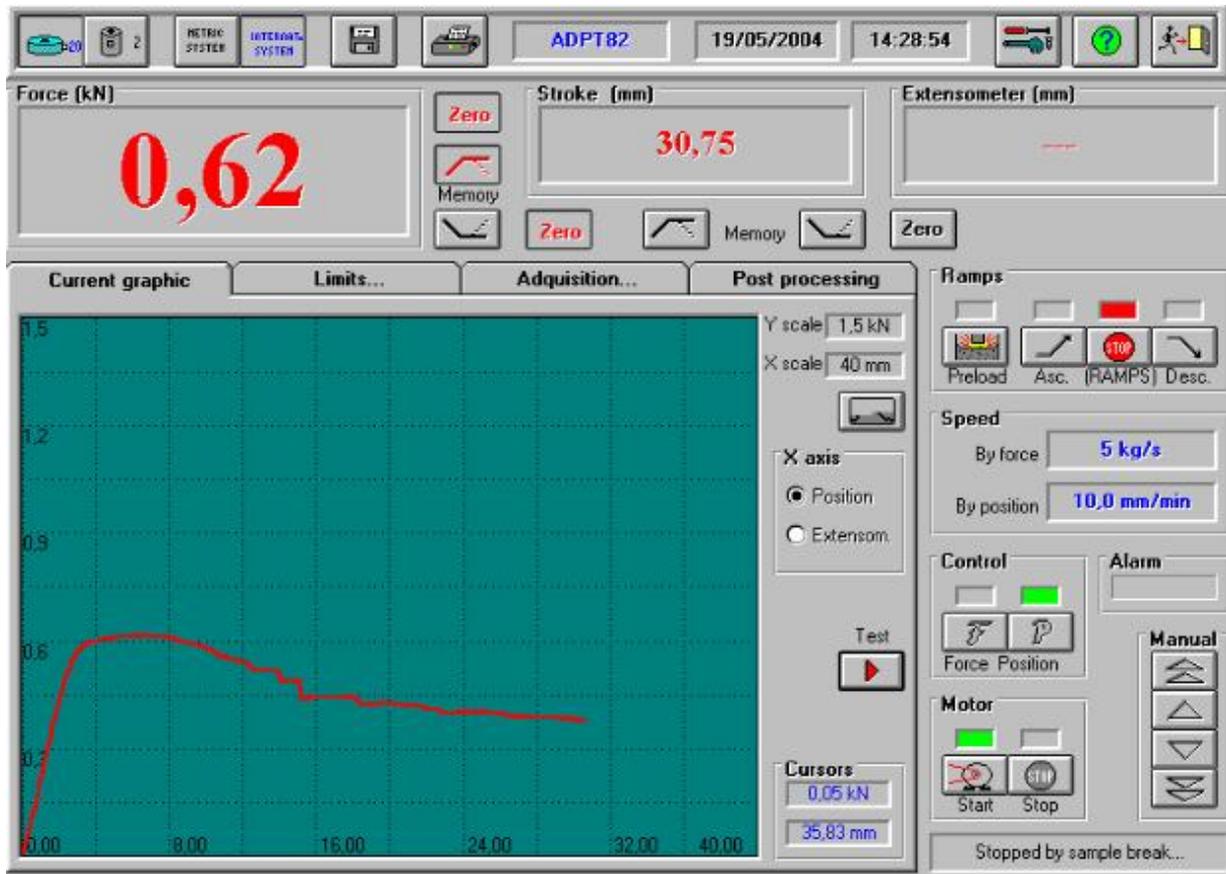


Figure III.6. Allure de la charge / déplacement au centre de la charge
(machine Instron CNERIB)

3.5. Enregistrement des charges appliquées

Les charges enregistrées sont représentées dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Charges enregistrées

Types d'éprouvettes P (KN)	PST	PT5	PT8	PT11	PTB
P ₁	1,23	0,89	0,81	0,84	1,14
P ₂	1,24	0,90	0,90	0,79	1,15
P ₃	1,19	1,00	0,95	0,84	1,08
P ₄	1,18	1,12	0,89	0,86	1,19
P ₅	1,24	1,06	0,95	0,82	1,17
P ₆	1,26	0,98	0,95	0,80	1,19
P ₇	1,15	1,11	0,89	0,79	1,12
P ₈	1,12	1,04	0,99	0,88	1,09
P ₉	1,26	1,14	0,98	0,81	1,05
P ₁₀	1,10	1,16	0,89	0,83	1,08
P ₁₁	1,29	1,25	0,99	0,81	1,07
P ₁₂	1,30	1,29	1,01	0,80	1,03
P ₁₃	1,32	1,19	0,97	0,81	1,08
P ₁₄	1,23	1,23	0,94	0,90	1,09
P ₁₅	1,18	0,99	0,89	0,94	1,06
Moyenne	1,22	1,09	0,93	0,83	1,11
Variance S²	0,004	0,015	0,003	0,002	0,003
Ecart type S	0,06	0,12	0,05	0,04	0,051
Coeff. de Variation C_V	0,05	0,11	0,06	0,05	0,05

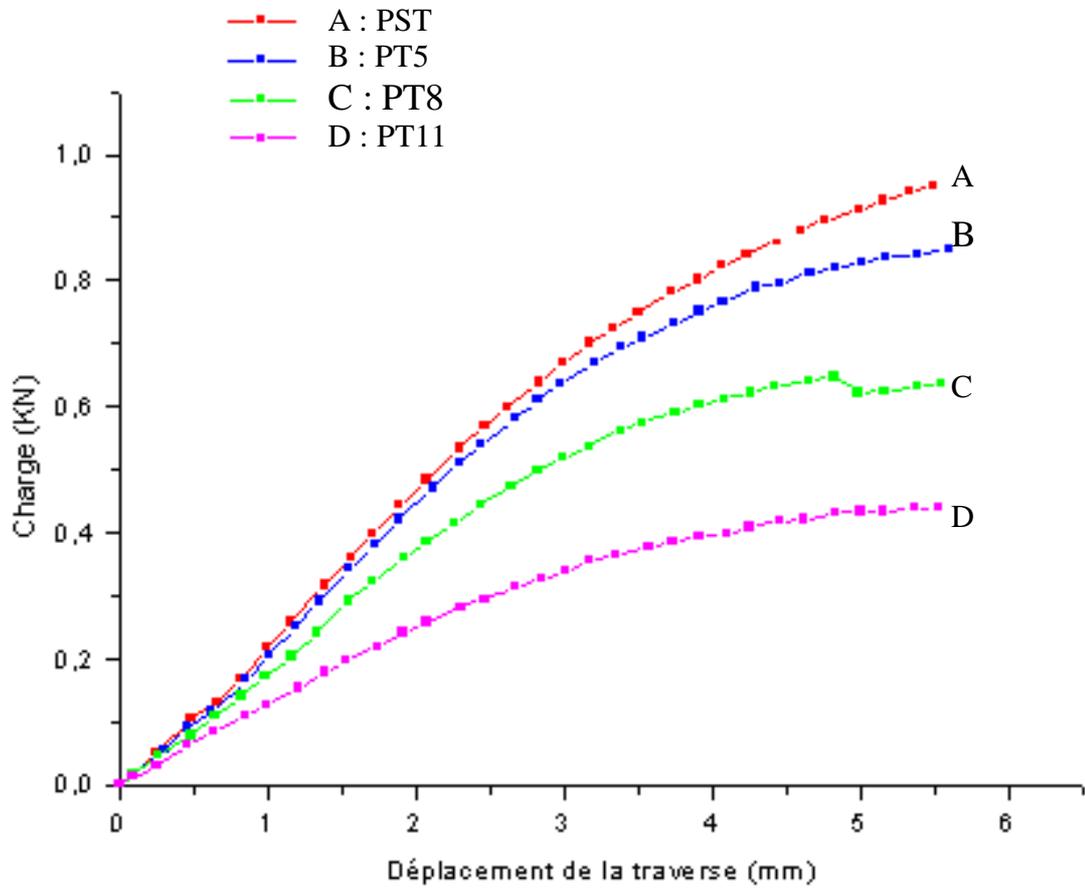


Figure III.7. Influence de la taille du défaut sur la charge appliquée

3.6. Relevé de la flèche pour les trois types d'éprouvettes

Les flèches sont représentées dans le tableau III.2.

Tableau III.2. Relevé de la flèche

Type D'éprouvettes Flèches(mm)	PST	PT5	PT8	PT11	PTB
Y ₁	3,62	3,22	2,95	2,68	3,39
Y ₂	3,64	2,93	2,86	2,87	3,36
Y ₃	3,67	2,95	2,95	2,69	3,50
Y ₄	3,62	3,04	2,95	2,85	3,44
Y ₅	3,73	3,00	2,95	2,79	3,33
y ₆	3,55	2,95	2,78	2,69	3,30
Y ₇	3,21	3,12	3,02	2,90	3,15
Y ₈	3,50	3,15	2,78	2,99	3,46
Y ₉	3,37	3,10	2,90	2,94	3,19
Y ₁₀	3,63	2,89	2,79	2,65	3,31
Y ₁₁	3,61	3,02	3,09	2,70	3,24
Y ₁₂	3,27	3,15	2,90	2,56	3,42
Y ₁₃	3,40	2,95	2,86	2,82	3,29
Y ₁₄	3,45	2,88	2,89	2,72	3,39
Y ₁₅	3,36	3,03	2,93	2,68	3,56
Moyenne	3,51	3,03	2,91	2,77	3,36
Variance S²	0,025	0,011	0,007	0,015	0,013
Ecart type S	0,16	0,10	0,09	0,12	0,11
Coeff. de Variation C_V	0,05	0,03	0,03	0,04	0,03

3.7. Calcul des contraintes de rupture

Les contraintes de rupture pour les trois cas d'éprouvettes sont reportées dans le tableau III.3.

Tableau III.3. Calcul des contraintes de rupture

Types d'éprouvettes σ_r (n/mm²)	PST	PT5	PT8	PT11	PTB
σ_1	64,58	46,73	42,51	44,58	59,66
σ_2	65,10	47,25	47,25	43,98	60,38
σ_3	62,48	52,50	49,41	43,75	56,70
σ_4	61,95	58,80	46,74	42,15	62,48
σ_5	65,10	55,65	50,50	45,99	61,58
σ_6	66,15	51,45	49,885	43,44	62,48
σ_7	60,38	58,45	46,73	44,45	58,8
σ_8	58,8	54,6	50,48	41,74	57,25
σ_9	66,15	59,6	51,03	46,88	55,24
σ_{10}	57,75	60,9	46,73	40,37	56,74
σ_{11}	67,76	65,63	51,45	45,95	56,18
σ_{12}	68,25	67,76	51,69	41,76	54,20
σ_{13}	69,30	62,48	51,02	44,94	56,48
σ_{14}	64,58	64,58	50,45	42,28	57,24
σ_{15}	61,95	51,98	46,50	41,41	55,65
Moyenne	64,02	57,22	48,83	43,58	58,07
Variance S²	11,61	42,05	6,81	3,68	7,11
Ecart type S	3,41	6,48	2,61	1,92	2,67
Coeff. de Variation C_v	0,05	0,11	0,05	0,04	0,05

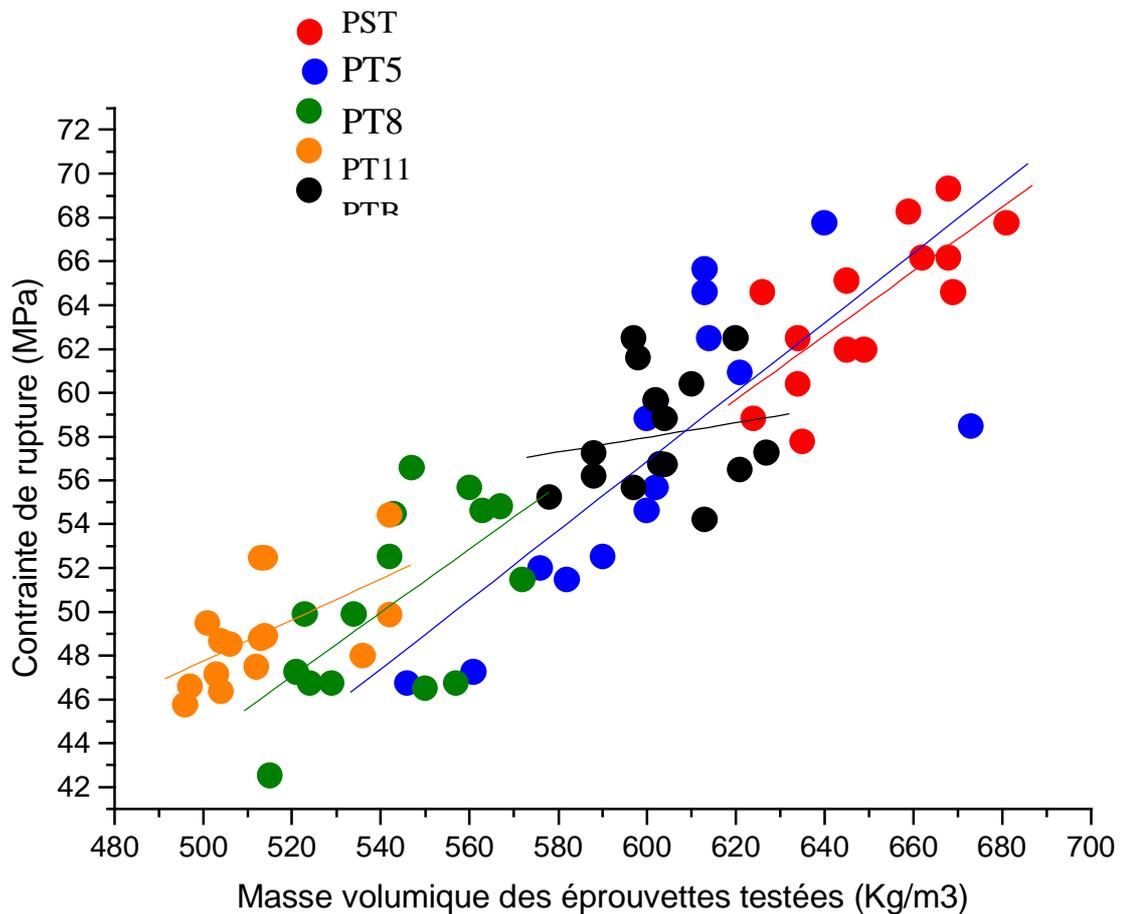


Figure III.8. Influence de la masse volumique sur la contrainte de rupture (pour l'ensemble des éprouvettes sollicitées).

Le graphe montre une bonne liaison entre la contrainte de rupture et la masse volumique. Il est à noter que pour le cas des défauts bouchonnés, la liaison est moins évidente.

Les éprouvettes sans défauts ainsi que celles bouchonnées se caractérisent par des contraintes moyennes assez élevées (64 et 58 MPa) comparativement à celles avec défauts qui présentent des contraintes plus faibles (57MPa pour un défaut de 5mm de diamètre ; 49 MPa pour un défaut de 8mm de diamètre et enfin 44MPa pour un défaut de 11mm de diamètre). Pour ce point, on a relevé une diminution quoique légère de la contrainte de rupture avec l'augmentation du diamètre du défaut.

3.8. Calcul des modules d'élasticité

Les modules d'élasticité sont calculés d'après la relation suivante :

$$E = \frac{PL^3}{4Ybh^3}$$

P : la charge en N

L : longueur de l'éprouvette

Y : la flèche

B : la largeur de l'éprouvette

h : l'épaisseur de l'éprouvette

Tableau III.4. Calcul des modules d'élasticité

Type D'éprouvettes E (Mpa)	PST	PT5	PT8	PT11	PTB
E ₁	11655,32	9007,38	9226,35	10126,54	11497,90
E ₂	11684,62	10009,04	10577,83	9415,51	11740,56
E ₃	11122,69	11045,76	10825,93	10012,52	10584,00
E ₄	11180,66	12005,00	10142,26	10222,03	11866,36
E ₅	11402,68	11513,37	11394,58	9225,70	12081,76
E ₆	12174,08	10824,85	11487,95	10070,32	12369,78
E ₇	12289,18	11627,55	9907,17	10043,87	12195,56
E ₈	10976,00	10758,22	12545,08	9262,37	10810,21
E ₉	12824,33	11932,82	12489,62	9062,89	11313,52
E ₁₀	10393,94	13079,10	10723,89	9759,20	11199,44
E ₁₁	12263,12	13488,20	11531,02	11191,00	11328,48
E ₁₂	13636,09	13351,23	12054,68	10221,60	10354,00
E ₁₃	13316,47	13145,51	12268,05	9007,43	11215,89
E ₁₄	12229,64	13917,59	11398,52	9691,79	11031,50
E ₁₅	12045,83	10647,61	10161,23	10252,95	10212,92
Moyenne	11946,31	11756,88	11115,61	9837,71	11320,12
Variance S²	780586,53	2019288,3 8	1001766,4 7	336462,36	430358,32
Ecart type S	883,51	1421,02	1000,88	580,05	656,02
Coeff. de Variation C_v	0,074	0,121	0,090	0,059	0,058

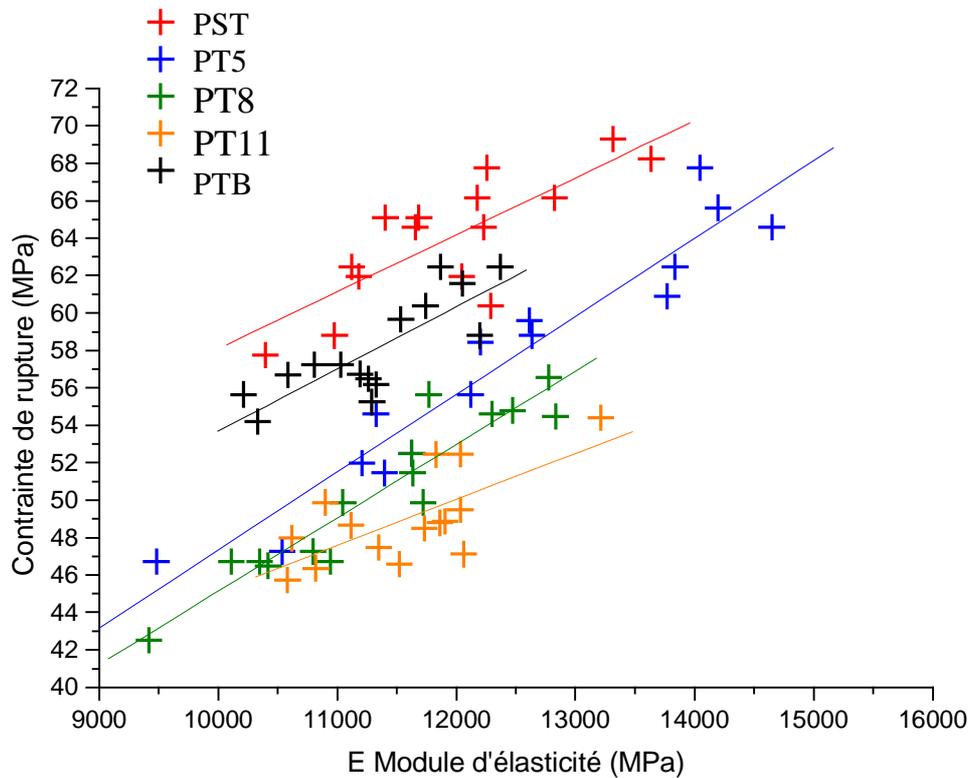


Figure III.9. Influence du module d'élasticité sur la contrainte de rupture (pour l'ensemble des éprouvettes sollicitées).

Sur ce graphe, on note une relation linéaire entre les deux paramètres que sont le module d'élasticité et la contrainte de rupture, elle est moins marquée pour le cas d'un défaut de 11mm de diamètre.

CONCLUSION

Dans le cadre de ce chapitre, nous avons essayé de trouver des relations entre les contraintes de rupture, le module d'élasticité statique et la masse volumique. Les relations entre les différents paramètres énumérés sont de manière générale assez satisfaisantes. Il convient de

souligner la rareté des références relatant les relations des propriétés mécaniques du bois de Pin d'Alep. La confrontation entre les valeurs obtenues en flexion indique la bonne relation entre le module d'élasticité et la contrainte de rupture.

L'analyse globale de l'ensemble de ces sollicitations ne permet pas d'approcher ou de visualiser les défauts au voisinage des nœuds. Pour cela, il est impératif d'utiliser les données pratiques relevées durant l'expérimentation pour les injecter dans des opérations de simulation numériques moyennant un outil de simulation et de modélisation. Cette présente démarche fera l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV

Approche numérique

PROBLEMATIQUE POSEE

De nombreuses équipes, comme dans tous les domaines de la recherche, utilisant des codes de calcul éléments finis pour étudier le comportement d'éléments sollicités en traction ou en flexion ont mis en évidence l'influence de nombreux paramètres (défauts, nœuds) et leur influence sur l'état de contrainte.

Dans le domaine de la construction, il est parfois nécessaire de réaliser des perçages dans les poutres soumises à la flexion pour laisser le passage à des câbles ou des conduites de différents types. Les structures légères à base de bois sont maintenant largement utilisées pour la construction à ossature bois. Les procédés de fabrication permettant maintenant de disposer d'un produit à propriétés bien définies et d'une qualité constante. Pour les dimensionner, on fait appel aux codes de calcul dont l'EUROCODE 5 qui rassemblent les règles de dimensionnement pour les constructions en bois.

Par ailleurs, le bois étant ce qu'il est, les nœuds non adhérents peuvent très facilement se détacher pour laisser un vide non comblé. Dans un cas comme dans l'autre, ces évidements constituent un point d'affaiblissement de la structure et doivent être pris en compte dans le dimensionnement. Les nœuds aussi bien que les trous peuvent avoir des formes variées, ce qui engendre un problème de concentration de contrainte qui peut être traité en analysant les contraintes au bord du trou de la réservation. L'intérêt c'est de rechercher les contraintes maximales, de manière à pouvoir localiser éventuellement le lieu d'amorçage des ruptures. Ce chapitre présente un travail réalisé sur des éprouvettes de bois de Pin d'Alep sans défaut ainsi que sur des réservations de forme circulaire réalisées par perçage et assimilées à un nœud non adhérent ou bouchonné.

Le problème posé est celui d'une poutre en bois de Pin d'Alep reposant sur deux appuis et chargée en son milieu par une force ponctuelle. Selon le cas, cette

poutre comporte ou non un évidement circulaire centré sur l'axe médian et à mi-distance du milieu et de l'extrémité.

Les calculs qui sont pris en charge dans ce chapitre sont réalisés, soit par des fonctions analytiques issus de la résistance des matériaux, soit par la méthode des éléments finis. Dans ce cas, on utilise le code de calcul moyennant le logiciel RDM6 [Deb'02]. Cette procédure portera plus particulièrement sur l'influence du rapport du diamètre du trou sur la hauteur de la poutre.

INTRODUCTION

Dans la partie relative à la présentation du matériau, il a été relevé des différentes investigations d'auteurs, que le bois est un matériau renouvelable, d'aspect chaleureux et aux propriétés mécaniques intéressantes, eu égard à sa masse volumique. [Duc'87] a réalisé une simulation numérique d'un nœud et du bois environnant par la méthode des éléments finis. La pente de fil a été assimilée aux lignes de courant d'un fluide s'écoulant laminairement autour de l'obstacle circulaire représenté par le nœud. La position du nœud la plus défavorable en matière de concentration de contrainte de traction est une position proche du quart de la hauteur de la pièce.

Pour revenir à l'aspect des trous (nœud non adhérent) ou trou (réservation) servant de passage à un conduit, nous avons noté le fait qu'ils constituent un point d'affaiblissement des poutres.

Par exemple, dans une plaque « infinie » soumise à de la traction et percée d'un trou circulaire, on observe une augmentation locale de la contrainte au bord du trou d'un facteur 3 pour un matériau isotrope [Jod'01].

Un autre cas de simulation numérique [Duc'87] par la méthode des éléments finis des états de contraintes déformations autour du nœud d'une éprouvette en

traction simple a permis d'aboutir à des résultats intéressants. Les fibres du bois sont disposées autour du nœud à la manière de courbes isothermes entre une paroi à la température T_1 qui englobe le plan médian de l'éprouvette de traction (qui passe par l'axe du nœud cylindrique) et la périphérie du nœud, et une paroi à la température T_2 qui correspond à la frontière extérieure de l'éprouvette parallèle au plan médian précédent. Le programme de calcul par éléments finis est conçu pour tenir compte d'un gradient de masse volumique, les lignes de fibres (isothermes) correspondant aux courbes iso valeurs de la masse volumique. Les constantes élastiques peuvent être déterminées localement à partir de la masse volumique suivant les relations [Gui'87] ou autres. Le facteur K_T de concentration de contrainte dû au nœud est défini par : $K_T = \frac{S_n \cdot \max}{S}$ Où $S_n \cdot \max$ est la contrainte normale à la section de l'éprouvette à l'interface nœud bois et σ la contrainte moyenne de traction loin du nœud. La figure IV.1. indique l'évolution du facteur K_T avec l'excentricité du nœud (R_x et R_y correspondant aux demi axes de l'ellipse) dans 4 conditions de simulation :

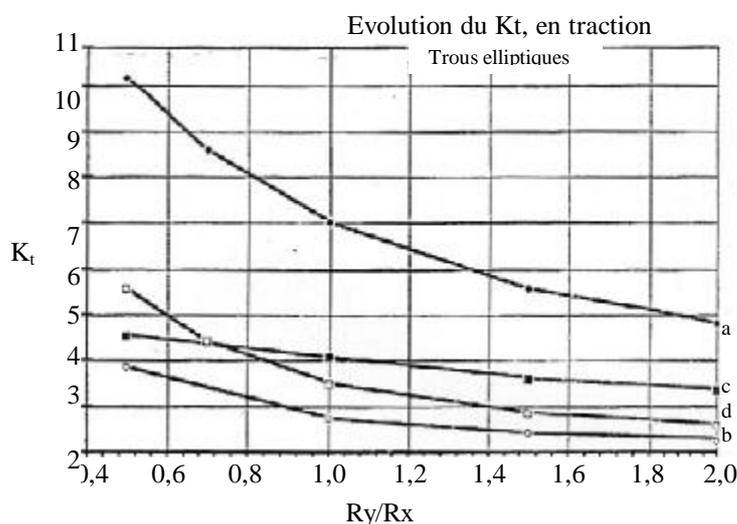


Figure IV.1. Facteur de concentration de contrainte [Duc'87]

- a** : Bois élastique orthotrope à direction constante (LT)
- b** : Bois élastique orthotrope à direction constante (TL)
- c** : Bois élastique orthotrope à direction variable autour du nœud,
- d** : les lignes des fibres suivant des courbes isothermes (plan LT)

1. INFLUENCE DES DEFAUTS SUR LA RESISTANCE A LA RUPTURE DU BOIS

Dans l'étude des contraintes ultimes du matériau bois, celui-ci était considéré comme sain, exempt de défauts, situation que l'on sait fortement éloignée de la réalité en raison de la présence inévitable de gerces, fentes, entailles, nœuds etc. L'influence des défauts sur la résistance à la rupture du bois peut être appréhendée en comparant le module de Young de ce matériau et sa résistance ultime dans la même direction naturelle [Oth'81]. Un simple calcul énergétique, faisant l'hypothèse que la cohésion moléculaire est modélisable par un ressort élastique montre que la résistance théorique à la rupture serait de l'ordre du centième. Une telle diminution de la résistance trouve son explication dans l'existence de contraintes locales fortement amplifiées qui vont permettre l'amorçage de la rupture. L'amplification locale de contrainte sera la plus forte à la pointe du défaut et son amplitude dépendra à la fois de l'acuité du défaut et du degré d'orthotropie du comportement mécanique.

L'étude de la singularité des contraintes à la pointe d'une fissure dans un matériau isotrope a été étudiée [Irw'69], [Jod'01] qui ont introduit le concept de facteur d'intensité de contraintes. La présence d'un trou dans une planche a une conséquence double sur la distribution des contraintes au niveau du ligament qui sépare le bord du trou du bord de la planche la contrainte s'élève car la section supportant l'effort est amoindrie et un gradient de contrainte maximale importante au bord du trou.

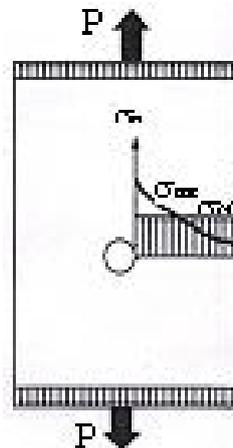


Figure IV.2. Distribution des contraintes globales réelles et nominales au bord d'un trou dans une planche [Plu'92]

Le facteur d'intensité de contraintes permet de calculer une contrainte finie et maximale à la pointe de défaut en multipliant la contrainte globale par ce facteur. Dans le cas du bois, cette contrainte est si élevée qu'on peut être naturellement tenté de l'assimiler à une contrainte singulière. En effet, si on considère des planches de bois possédant des nœuds de taille variable et réalisons sur ces planches des essais de traction. La contrainte globale critique sera définie par le rapport de la charge sur la section de la planche.

$\sigma_g^c = P_c / BW$ avec P_c la charge critique, B l'épaisseur de l'éprouvette et W sa largeur

Cette contrainte globale critique représente l'intensité de la distribution des contraintes uniformes qui règne loin de la perturbation introduite par le défaut. Reportons maintenant dans un diagramme la contrainte globale critique en fonction du diamètre du nœud $2a$.

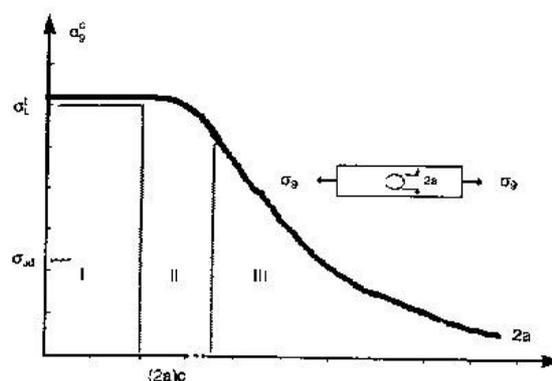


Figure IV.3. Evolution de la contrainte globale critique avec la taille de défaut normalisée

On constate sur ce diagramme que la contrainte globale critique diminue lorsque la taille du défaut augmente sauf dans une région appelée I où cette contrainte critique est constante et égale à la résistance ultime en traction du bois. Il est dit familièrement que "le bois ne voit pas les petits défauts". Dans ce domaine, la taille du nœud $2a$ est inférieure à 3 ou 5 mm environ et varie selon les espèces.

Dans la région III, la contrainte critique varie comme l'inverse de la racine carrée de la taille du nœud et peut être inférieure à la contrainte admissible. La région II est une courte zone intermédiaire entre les deux régions précédemment citées. L'état de contraintes à la frontière de ces régions peut être considéré comme un "état limite".

La région II peu étudiée actuellement, peut être éventuellement, représentée à l'aide d'une interpolation entre les deux états limites cités précédemment.

1.1. Concentration de contrainte au voisinage des nœuds

Les effets des nœuds sur le comportement mécanique sont encore actuellement évalués de façon fort empirique. La norme NFB 52.001 classe les bois en trois catégories I, II et III en fonction du diamètre des nœuds, de la pente du fil et de l'accroissement annuel.

Tableau IV.1. Classement des bois selon la norme NF B 52.001

Critères	Catégorie I	Catégorie II	Catégorie III
Nœuds	Sains Adhérents Non groupés $\varnothing \leq 30\text{mm}$	Sains Adhérents Groupés $\varnothing \leq 30\text{mm}$	

Pente du fil	$\leq 70\%$	$\leq 12\%$	$\leq 18\%$
Générale	$\leq 10\%$	$\leq 20\%$	$\leq 25\%$
Locale			
Accroissements	$\leq 3\text{mm}$	$\leq 5\text{mm}$	$\leq 10\text{mm}$

Les nœuds sont considérés dans deux positions particulières, au centre et au bord de la planche. La simulation du comportement mécanique d'un nœud peut se faire par méthode numérique couplée avec des hypothèses plus ou moins complexes telles la situation bidimensionnelle, la perturbation de la pente du fil autour du nœud, l'orthotropie du comportement élastique, l'existence d'un gradient des constantes élastiques en fonction du gradient de la masse volumique etc. Des calculs réalisés [Duc'87] montre que le coefficient de concentration de contrainte pour un nœud est nettement moins élevé que pour un trou circulaire. Ceci est vraisemblablement dû au fait que le fil du bois qui guide le flux de force et atténue la concentration de contrainte. Le facteur de concentration de contrainte augmente lorsque le rapport du diamètre du nœud sur largeur de la planche augmente et lorsque le nœud s'approche du bord (Figure IV.4.).

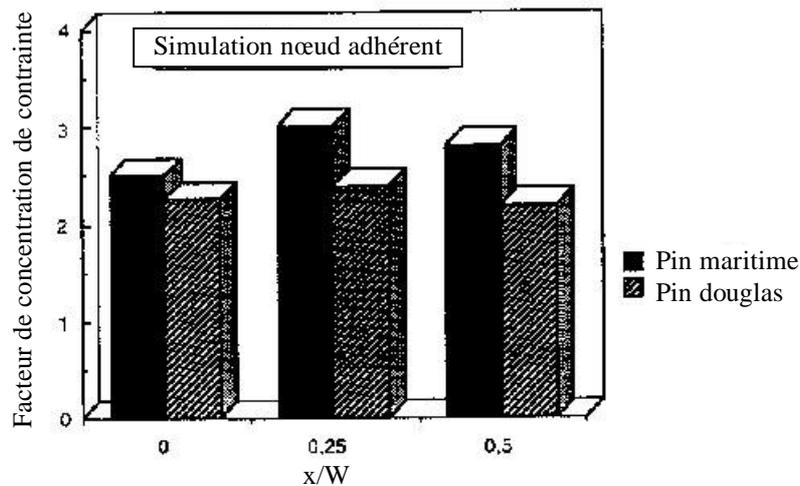


Figure IV.4. Influence de la position du nœud sur le facteur de concentration de contrainte [Duc'87]

1.2. Problème de la plaque trouée

Les différentes références bibliographiques le présentent comme un problème académique. L'intérêt de cette étude est le fait qu'il y ait un rapprochement entre

un trou et un nœud (défaut naturel du bois), puisque tous les deux engendrent des contraintes dans leur périphérie.

De ce fait, il a été toujours utile de calculer la contrainte au bord du trou pour évaluer la résistance des pièces soumises à des sollicitations données.

Si nous prenons l'exemple de la plaque trouée, de côté a , percée en son centre, d'un trou circulaire de rayon b petit par rapport à a (Figure IV.5.).

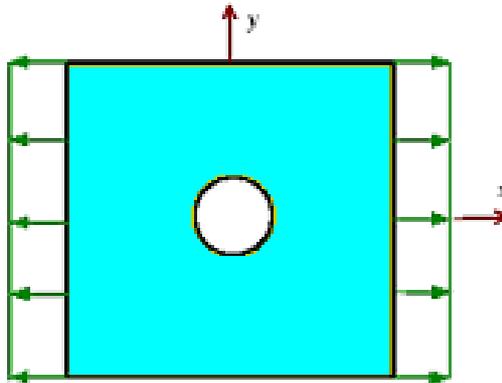


Figure IV.5. Plaque trouée soumise à un essai de traction [Deb'02]

1.2.1. Géométrie et Propriétés du matériau

Pour ce cas précis, on modélise seulement un quart de la plaque à cause des symétries.

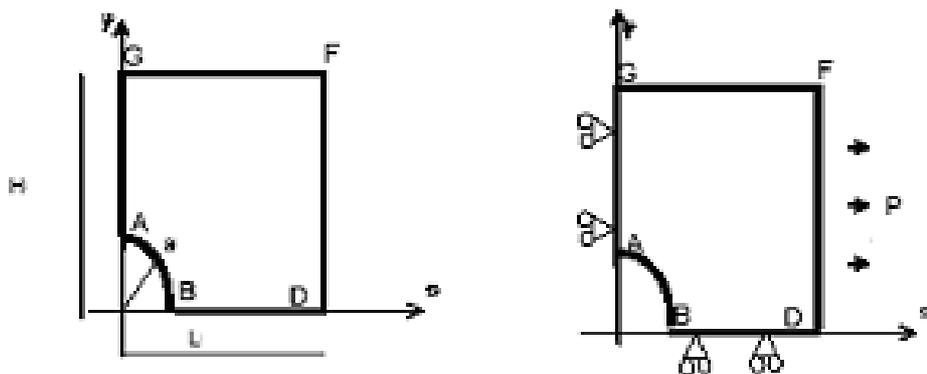


Figure IV.6. Modélisation du quart de la plaque [Deb'02]

On définit alors les propriétés du matériau (Epaisseur, masse volumique, Module d'Young $E = 1000 \text{ Mpa}$, Coefficient de Poisson $\nu = 0.3$).

1.2.2. Conditions aux limites et chargements

Conditions de symétrie

La plaque est bloquée suivant Ox le long du côté AG et suivant Oy le long du côté BD.

Chargement en contrainte imposée

Elle est soumise à une traction P suivant Ox répartie sur le côté FD.

Trajet de chargement

On considère un trajet de chargement monotone, tel que la traction P croisse depuis 1 MPa (la solution est alors élastique) et jusqu'à plastification complète de la structure.

1.2.3. Solution de référence du problème

Solution élastique

En élasticité, pour une plaque **infinie**, comportant un trou de diamètre a, soumise à un chargement P selon x à l'infini, la solution analytique en contraintes planes et coordonnées polaires (r, θ) est [Lar'88], [Ber'99], [Oht'92].

Si θ est l'angle entre l'axe des x et le rayon vecteur au point considéré, les contraintes radiales, circonférentielles et de cisaillement dans le plan ont pour expression :

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma}{2} \left(\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) - \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) \right)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma}{2} \left(\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) \right)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{\sigma}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \sin(2\theta)$$

En particulier, sur l'axe des x, au bord du trou ($r = a$), en un point géométrique caractéristique, les contraintes ont pour valeur :

$$\sigma_{rr} = \sigma_{r\theta} = 0 \quad \sigma_{\theta\theta} = \sigma(1 + 2 \cos 2\theta) \quad \sigma_{\theta\theta} = 3\sigma$$

Et le long de l'axe des x

$$\sigma_{\theta\theta} = \sigma_{yy} = \frac{\sigma}{2} \left(\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \right)$$

Numériquement, pour $P = 1$ MPa, et pour une plaque infinie [Deb'02]

Point	Contraintes (MPa)	
A	σ_{xx}	3
B	σ_{yy}	-1

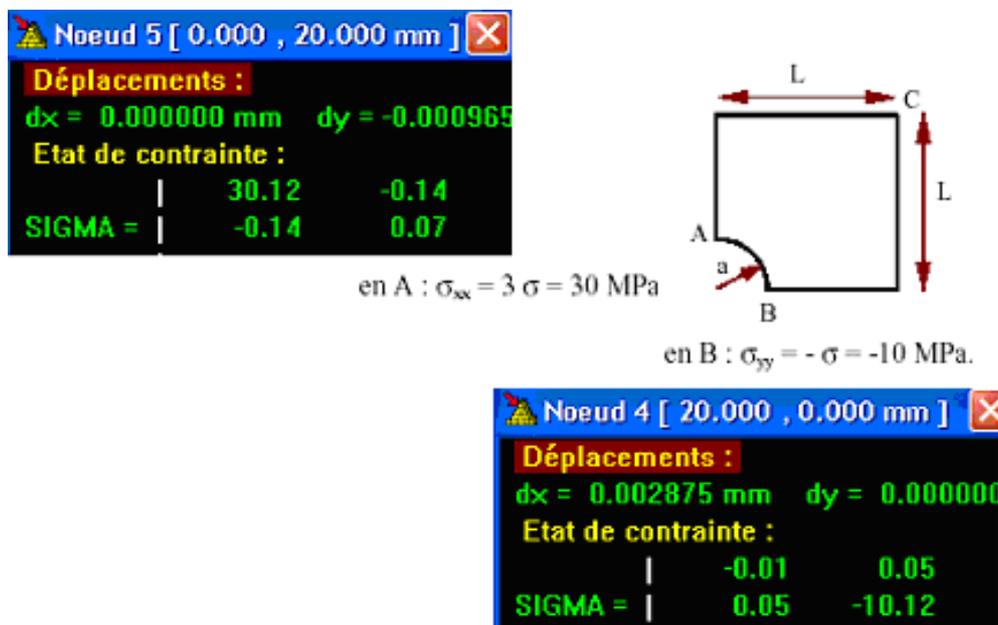


Figure IV.7. Résultats de la simulation numérique sur RDM6 [Deb'02]

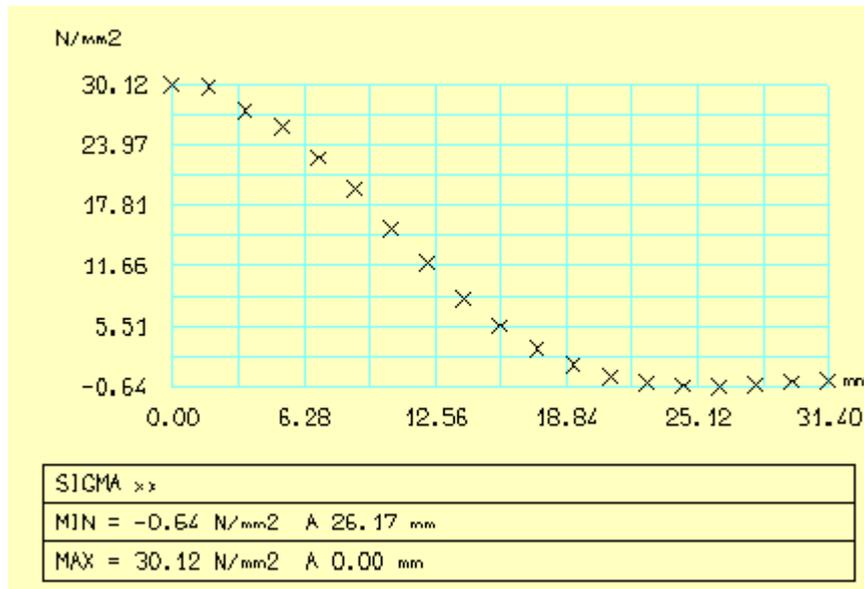


Figure IV.8. Distribution des contraintes au bord d'un trou circulaire [Deb'02]

Le but principal de cet exemple est tout simplement de comparer les solutions analytiques d'élasticité avec les résultats numériques obtenus par la MEF.

2. CAS D'APPLICATION A L'EXPERIMENTATION DE FLEXION

INTRODUCTION

Cette partie prendra en compte le cas de la sollicitation en flexion laquelle a été initiée dans la partie expérimentale. La démarche numérique sera appliquée au cas des éprouvettes avec et sans défauts [Deb'02]. Les défauts dus aux nœuds non adhérents ont été simulés par des trous de 5, 8 et 11 mm qui permettront de comprendre le mécanisme des contraintes tout autour des trous mais aussi d'évaluer leurs concentrations de contraintes.

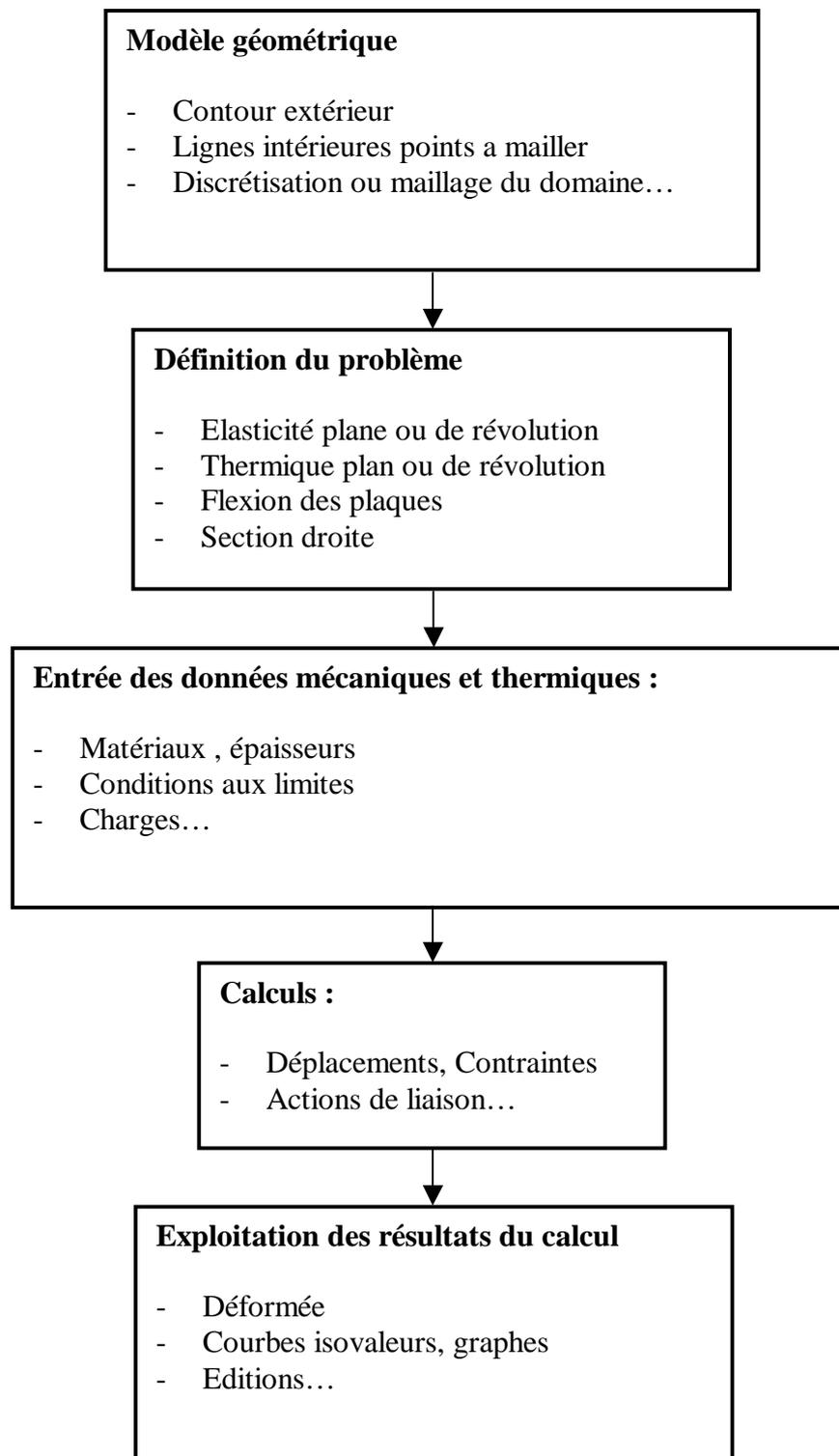
Nous rappelons dans ce qui suit les valeurs moyennes des charges, flèches, contrainte et modules d'élasticité, obtenues expérimentalement. Ces résultats seront injectés dans la démarche numérique.

Tableau IV.2. Rappel des résultats expérimentaux (Réf. Chapitre III).

Valeurs moyennes	PST	PT5	PT8	PT11	PTB
Charge (KN)	1,22	1,09	0,96	0,83	1,11
Flèche (mm)	3,51	3,03	2,91	2,77	3,36
Contrainte (MPa)	64,02	57,22	48,82	43,57	58,07
Module d'élasticité (MPa)	11946	11757	11116	9838	11320

L'ensemble de l'étude de simulation numérique, réalisée à l'aide de l'outil logiciel RDM6 [Deb'02], a été prise en charge selon la méthodologie d'application suivante :

L'évaluation du comportement mécanique et / ou thermique d'une pièce par la méthode des éléments finis peut être décomposée en cinq phases :



2.1. Cas de la poutre en flexion percée d'un trou circulaire

Considérons la structure bois suivante :

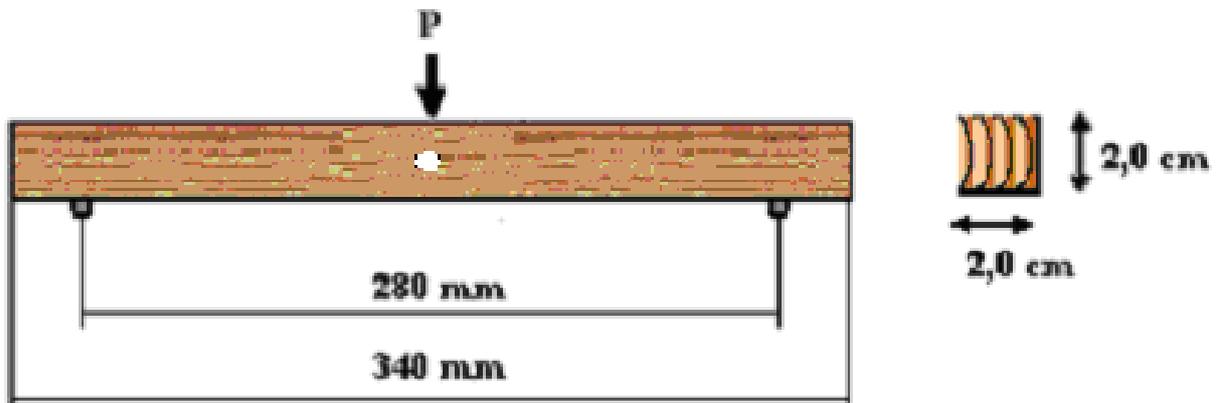


Figure IV.9. Epreuve expérimentale

Les étapes de la modélisation sont les suivantes [Deb'02] :

Les caractéristiques mécaniques du matériau étudié sont issues des données expérimentales (chapitre III). Dans un premier temps, on lance le module dessin en y entrant les dimensions de la structure (Poutres ayant 360 mm de longueur, 20 mm de largeur et 20 mm d'épaisseur).

Nouvelle étude

Longueur

M

CM

MM

μM

Ebauche

Définir le cadre de travail :

Longueur maximale

Hauteur maximale

x y

Origine

Points - Unité : mm

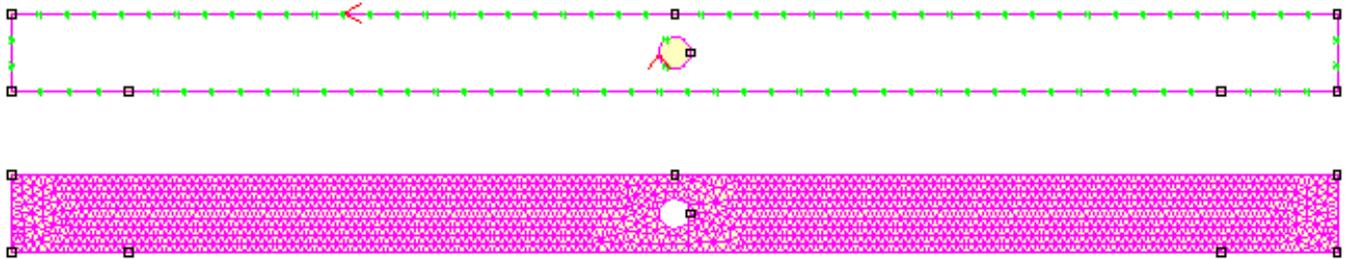
	Abscisse	Ordonnée
Point 1	<input type="text" value="-170"/>	<input type="text" value="10"/>
Point 2	<input type="text" value="170"/>	<input type="text" value="10"/>
Point 3	<input type="text" value="170"/>	<input type="text" value="-10"/>
Point 4	<input type="text" value="-170"/>	<input type="text" value="-10"/>
Point 5	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="10"/>

Points - Unité : mm

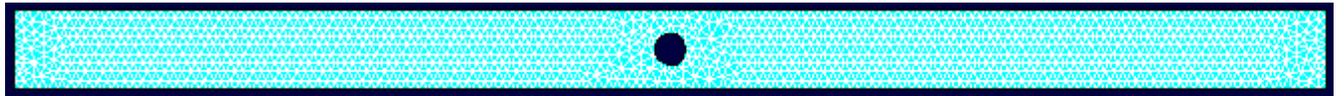
	Abscisse	Ordonnée
Point 6	<input type="text" value="140"/>	<input type="text" value="-10"/>
Point 7	<input type="text" value="-140"/>	<input type="text" value="-10"/>
Point 8	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Point 9	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Point 10	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Cette procédure d'introduction des données est suivie de la modélisation et du maillage des points de la poutre. Le squelette que forme la structure est centré puis agrandi afin de réunir les points maillés par les segments qui formeront la poutre.

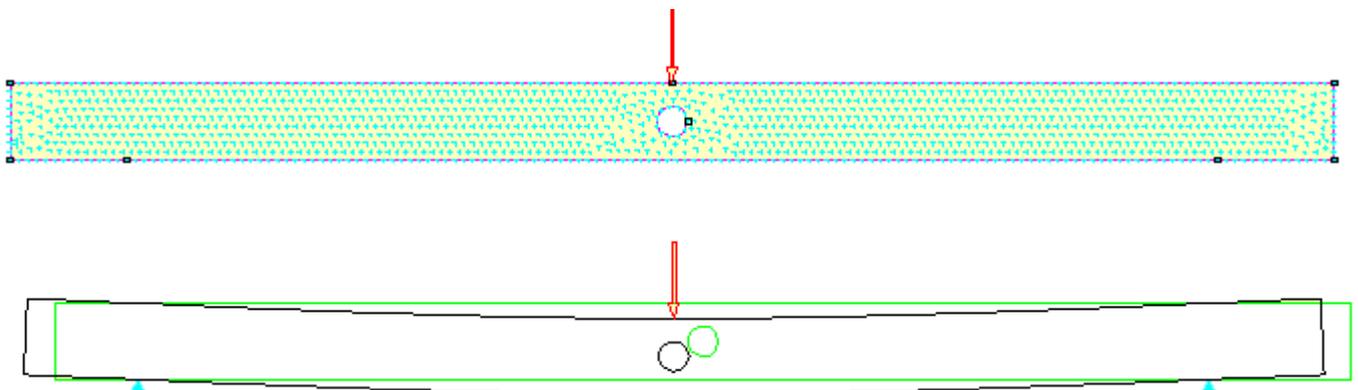
Par la suite, on modélise par la même démarche le cercle (simulé à un nœud) en y incorporant son centre et son rayon.



Une fois, le schéma global finalisé, on y incorpore le reste des informations, à savoir : l'épaisseur, les caractéristiques du matériau (Module d'élasticité, coefficient de poisson, masse volumique..), les liaisons ou appuis et enfin les cas de charge.



Les résultats numériques des différents cas de sollicitations (σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{xy} , Contraintes de Von Mises, de Tresca....) sont sauvegardés dans un fichier donné.



Nous présentons dans ce qui suit, un exemple de contrainte (σ_{xx}) pour le cas d'une poutre de 360 x 20 x 20 et percée d'un trou de 8mm.

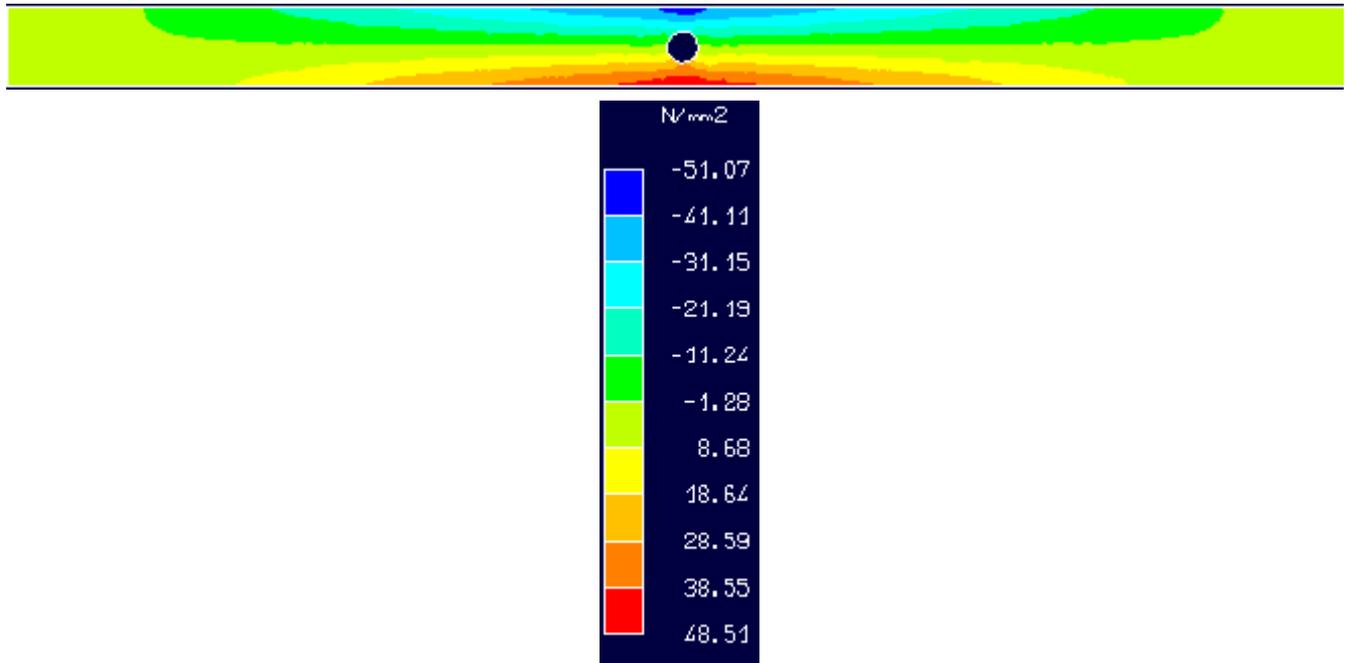


Tableau IV.3. Valeurs utilisées dans le calcul

Données de calcul	PST	PT5	PT8	PT11	PTB
Charge (KN)	1,22	1,09	0,96	0,83	1,11
Masse volumique (kg/m ³)	650	602	543	513	670
Coefficient de poisson	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Module d'élasticité (MPa)	11946	11757	11116	9838	11320
Résultats					
calcul numérique s _{xx} (MPa)	57,25	51,55	48,51	41,99	55,34

Pour le cas précis de la flexion, les contraintes sont en fait les contraintes de flexion maximales qui règneraient si le nœud ou le trou n'existait pas.

2.1.1. Calcul de l'évolution des contraintes le long du contour du trou

On a supposé précédemment que la contrainte σ_{xx} était maximale en l'absence de défauts (trou). La mise en évidence de cette affirmation se fera par le tracé de l'évolution de σ_{xx} le long du contour du trou. De même, on tracera l'évolution de la contrainte σ_{yy} et celle de σ_{xy} .

La détermination du maximum dans chaque cas doit nous permettre de calculer un facteur de concentration de contrainte, et donc un facteur de réduction de contrainte à appliquer pour le dimensionnement.

Contrainte σ_{xx}

Les résultats sont directement issus du calcul par éléments finis et sont exprimés en fonction de l'angle parcouru. Ils sont donnés dans la figure IV.10. On constate que le maximum se trouve à proximité de l'angle 160° . On notera également que le minimum relatif est du même niveau que le maximum et situé sur un point diamétralement opposé. Le bois étant un matériau qui présente une forte différence entre les valeurs de résistance en traction et en compression, il y aura lieu, pour le dimensionnement de prendre la valeur de σ_{xx} en compression au lieu de celle de la traction.

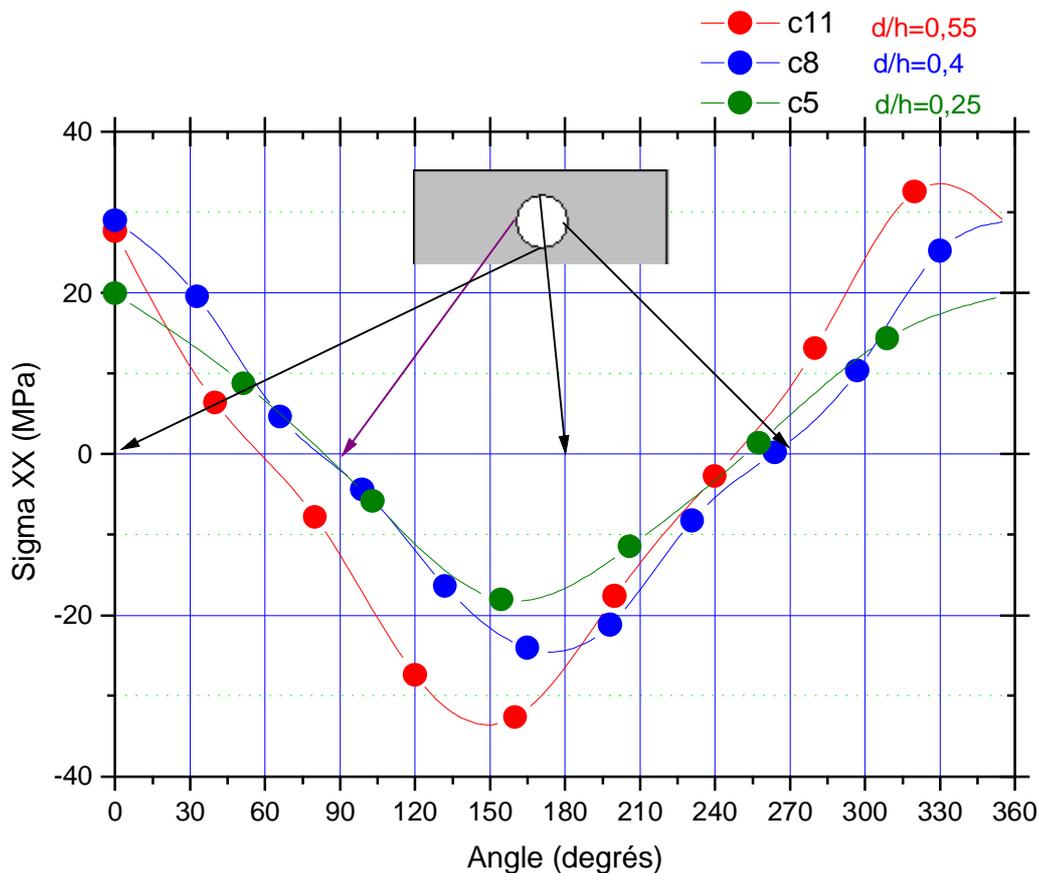


Figure IV.10. Evolution de la contrainte σ_{xx} le long du contour du trou.

contrainte S_{yy}

L'évolution de la contrainte σ_{yy} est montrée sur la figure 51. On constate que les maximums et les minimums se trouvent à 0° , 360° et 270° . Dans ce cas, il n'y a pas de symétrie par rapport au centre du trou, contrairement à ce qui est observé pour σ_{xx} . L'effet de la présence d'un trou est ici très marqué puisqu'en l'absence de trou ces contraintes σ_{yy} sont quasiment nulles. Le dimensionnement doit prendre en compte cette contrainte en la comparant à la contrainte admissible perpendiculaire aux fibres du bois.

Toutefois, on ne peut pas calculer de facteur de concentration de contrainte, puisqu'il n'y a pas de contrainte de référence.

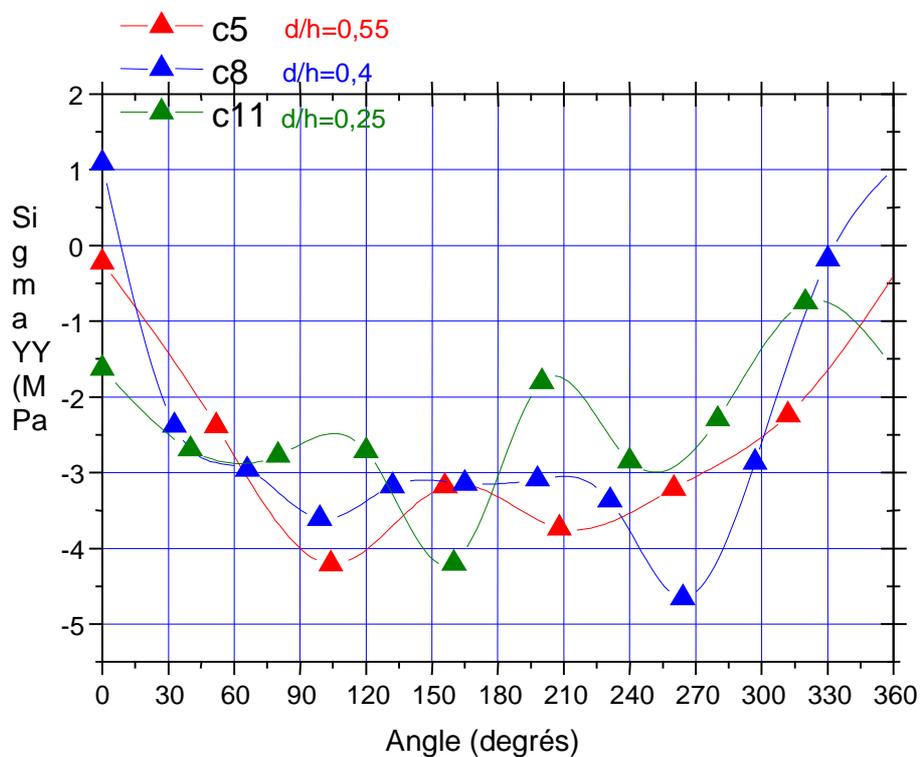


Figure IV.11. Evolution de la contrainte σ_{yy} le long du contour du trou

contrainte S_{xy}

Les contraintes de cisaillement sont ici importantes à étudier, puisque selon l'EUROCODE 5, ce sont les contraintes qui sont utilisées pour le

dimensionnement dans ce cas de figure. Leur évolution est présentée sur la figure IV.12.

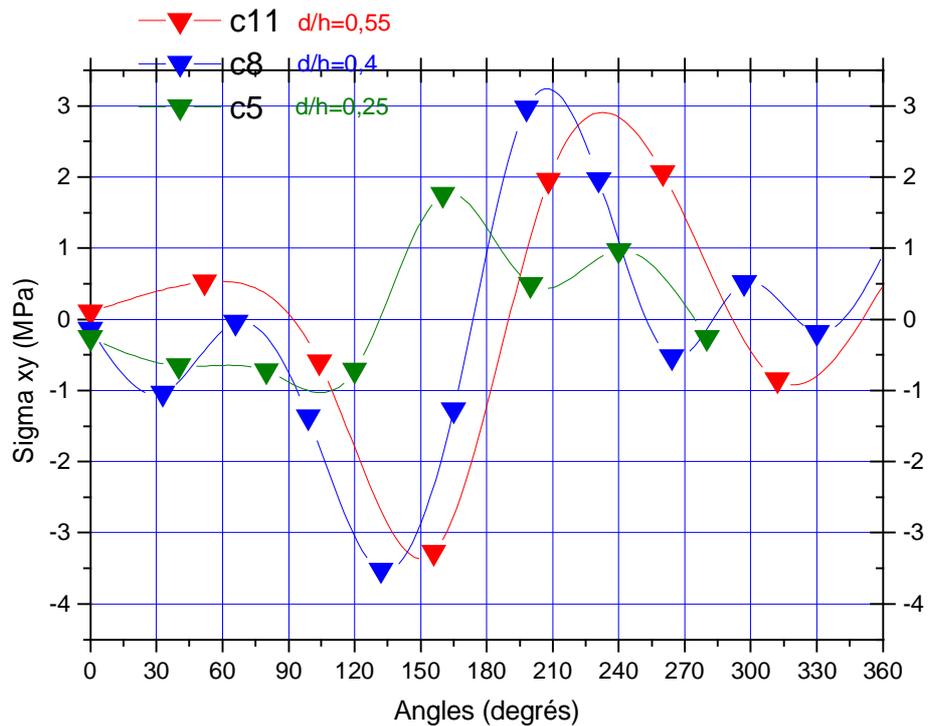


Figure IV.12. Evolution de la contrainte σ_{xy} le long du contour du trou

2.1.2. Facteur de concentration de contrainte autour d'un trou

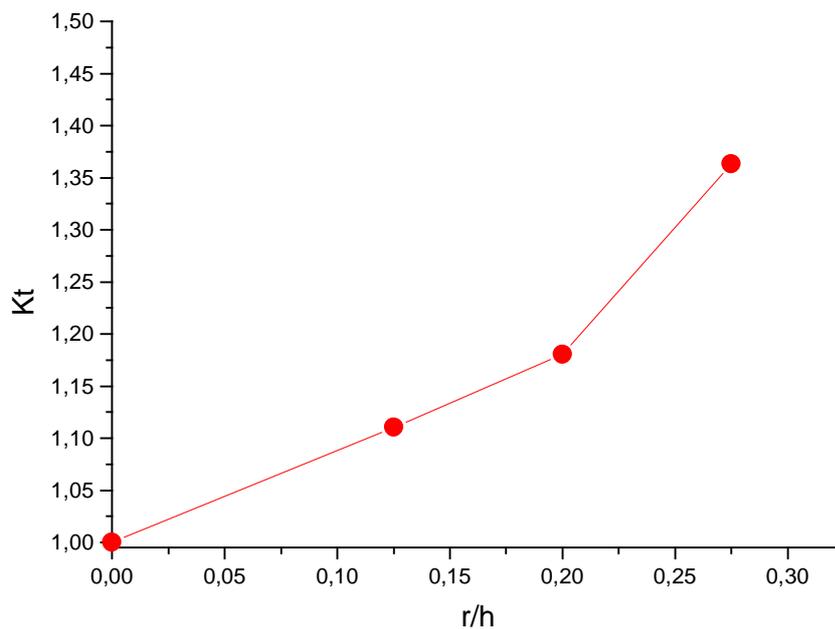


Figure IV.13. Facteurs de concentration de contrainte dans une éprouvette trouée en flexion

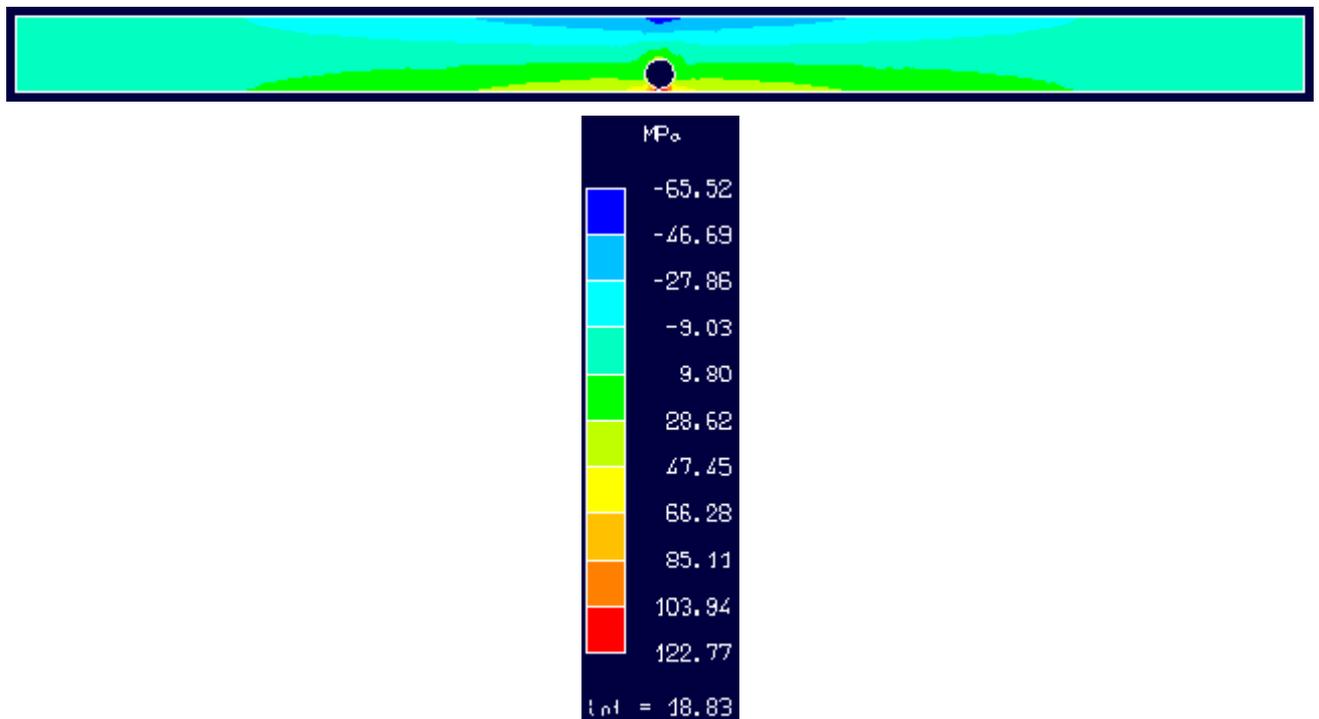
2.2. Influence de la position du nœud

Pour montrer l'influence de la position du nœud dans une planche de bois, nous avons simulé en flexion ce problème.

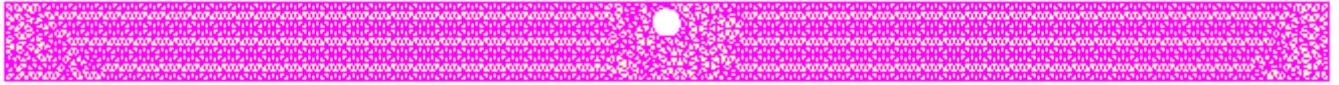
1^{er} cas : lorsque le nœud simulé à un trou est situé au quart inférieur de la section (position la plus défavorable).



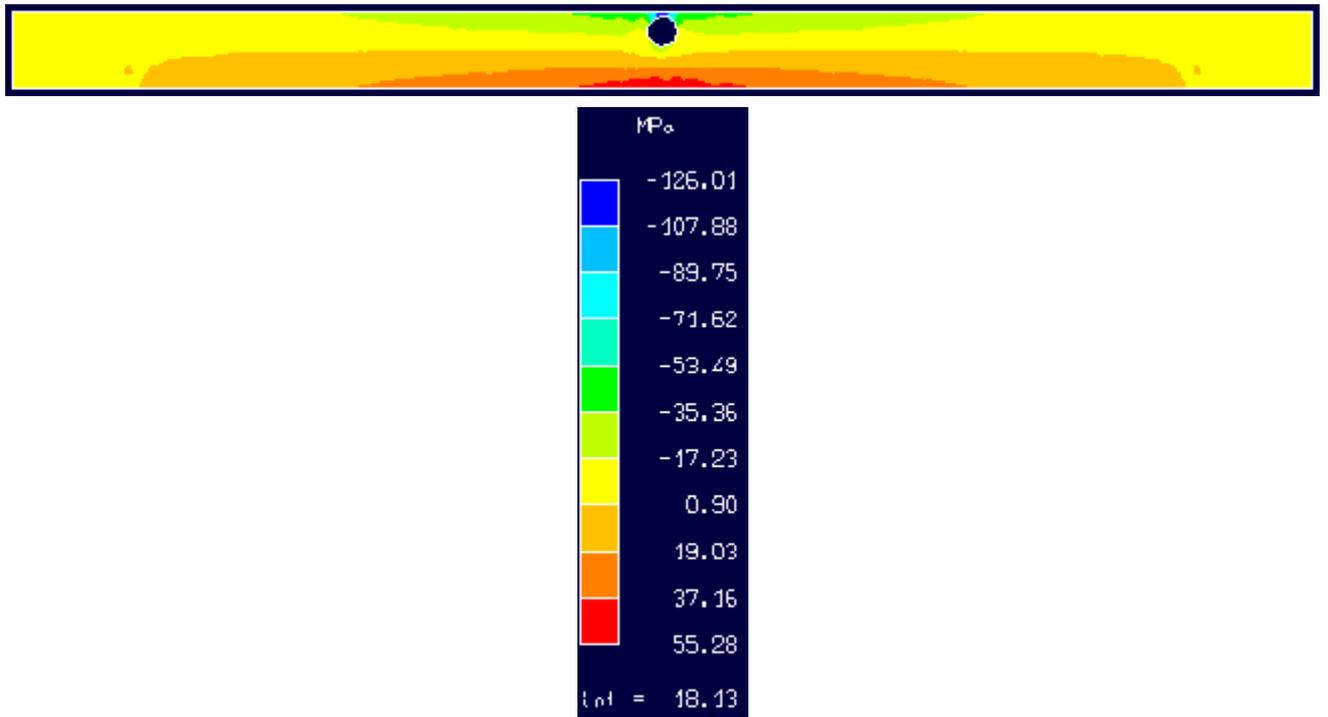
Nous présentons dans ce qui suit, les valeurs de (σ_{xx}) pour le cas d'une poutre de 360 x 20 x 20 et percée d'un trou de 8 mm.



2^{ème} cas : lorsque le nœud simulé à un trou est situé au quart supérieur de la section.



Nous présentons dans ce qui suit, les valeurs de (σ_{xx}) pour le cas d'une poutre de 360 x 20 x 20 et percée d'un trou de 8 mm.



Nous constatons que lorsque le nœud (simulé à un trou) est situé au quart inférieur de la pièce, la concentration de contrainte est plus importante que lorsque le trou est situé au quart de la partie supérieure. Pour ce cas de figure comparativement au premier cas énoncé, la conclusion se déduit du fait que la rupture est favorisée dans les zones tendues de la pièce et tout constructeur se doit d'éviter cette situation de risque.

3. SOLUTION ANALYTIQUE

Si θ est l'angle entre l'axe des x et le rayon vecteur au point considéré, les contraintes radiales, circonférentielles et de cisaillement dans le plan peuvent se calculer selon les mêmes expressions énumérées pour le cas de la traction. Après calcul, les valeurs numériques deviennent :

Pour le cas d'un trou de 5mm											
σ_{xx} (Mpa)	σ_{yy} (Mpa)	a	r	θ	$2\theta(^{\circ})$	$2\theta(\text{rad})$	$\sin(2\theta)$	$\cos(2\theta)$	σ_{rr}	$\sigma_{\theta\theta}$	$\sigma_{r\theta}$
19,94	0,09967	2,5	167,5	0	0	0,00	0	1	20,03	0,10	0,00
8,75	0,51982	2,5	167,5	45	90	1,57	1,00	0,00	4,64	4,63	-4,64
-5,86	-0,60285	2,5	167,5	90	180	3,14	0,00	-1,00	0,00	-5,86	0,01
-18,09	-3,27486	2,5	167,5	135	270	4,71	-1,00	0,00	-10,65	-10,70	-10,69
-11,48	1,94933	2,5	167,5	180	360	6,28	0,00	1,00	-9,53	1,95	-0,02
1,37	2,05702	2,5	167,5	225	450	7,85	1,00	0,00	1,72	1,72	-1,72
14,33	-0,85555	2,5	167,5	270	540	9,42	0,00	-1,00	0,00	14,33	-0,03
19,94	0,69436	2,5	167,5	315	630	10,99	-1,00	-0,01	10,26	10,37	10,32

Pour le cas d'un trou de 8mm											
σ_{xx} (Mpa)	σ_{yy} (Mpa)	a	r	θ	$2\theta(^{\circ})$	$2\theta(\text{rad})$	$\sin(2\theta)$	$\cos(2\theta)$	σ_{rr}	$\sigma_{\theta\theta}$	$\sigma_{r\theta}$
28,98	-0,14122	4	166	0	0	0,00	0	1	28,82	-0,13	0,00
19,55	-1,03761	4	166	30	60	1,04	0,86	0,51	13,94	4,05	-7,99
4,61	-0,04109	4	166	60	120	2,09	0,87	-0,50	1,15	3,44	-1,99
-4,41	-1,37259	4	166	90	180	3,14	0,00	-1,00	0,00	-4,41	0,00
-16,38	-3,52277	4	166	120	240	4,19	-0,87	-0,50	-4,96	-13,18	-8,63
-24,08	-1,27509	4	166	150	300	5,23	-0,87	0,49	-18,94	-7,04	-11,03
-21,21	2,96421	4	166	180	360	6,28	0,00	1,00	-18,24	2,96	-0,03
-8,24	1,96469	4	166	210	420	7,33	0,87	0,50	-4,71	-0,59	2,72
0,20	-0,53071	4	166	240	480	8,37	0,87	-0,49	-0,08	0,01	0,15
10,31	0,51345	4	166	270	540	9,42	0,00	-1,00	0,00	10,31	-0,03
25,20	-0,18368	4	166	300	600	10,47	-0,87	-0,50	6,23	18,88	10,83
28,98	1,08323	4	166	330	660	11,51	-0,87	0,49	22,41	8,18	13,10

Pour le cas d'un trou de 11mm											
σ_{xx} (Mpa)	σ_{yy} (Mpa)	a	r	θ	$2\theta(^{\circ})$	$2\theta(\text{rad})$	$\sin(2\theta)$	$\cos(2\theta)$	σ_{rr}	$\sigma_{\theta\theta}$	$\sigma_{r\theta}$
27,68	-0,26092	5,5	164,5	0	0	0,00	0,00	1	27,40	-0,25	0,00
6,36	-0,65333	5,5	164,5	22,5	45	0,78	0,70	0,71	4,88	0,36	-2,01
-7,83	-0,72765	5,5	164,5	45	90	1,57	1,00	0,00	-4,28	-4,28	4,29
-27,44	-0,71919	5,5	164,5	67,5	135	2,30	0,75	-0,67	-4,68	-22,99	10,52
-32,65	1,74856	5,5	164,5	90	180	3,14	0,00	-1,00	0,01	-32,66	0,02
-17,64	0,48714	5,5	164,5	112,5	225	3,92	-0,70	-0,71	-2,46	-15,04	-6,03
-2,76	0,96572	5,5	164,5	135	270	4,71	-1,00	0,00	-0,89	-0,90	-0,90
13,09	-0,26092	5,5	164,5	157,5	315	5,49	-0,71	0,70	10,90	1,74	4,58

Observation

La confrontation entre le numérique et l'analytique nous donne une cohérence entre certaines valeurs à titre d'exemple :

Les valeurs de σ_{xx} calculées numériquement sont pratiquement les mêmes que celles trouvées dans le calcul analytique de σ_{rr} .

CONCLUSION

La flexion provoque à la fois des sollicitations de traction, compression et cisaillement, dans le cas du bois la différence de caractéristique en traction et en compression entraîne le comportement spécifique d'une poutre soumise à flexion.

La résistance du bois appliquée à une poutre de longueur L de section carrée a x a sur deux appuis soumise à une charge centrale p et qui prend une flèche centrale F, permet de

déterminer le module d'élasticité : $E = \frac{PL^3}{4fbh^3}$

La contrainte maximum en traction-compression est : $s = \frac{3PL}{2bh^2}$ et la contrainte maximum de

cisaillement sur l'axe est $t = \frac{3P}{2bh}$ donnant les valeurs moyennes suivantes :

	PST	PT5	PT8	PT11	PTB
E (MPa)	11946	11757	11115	9838	11320
s (Mpa)	64	57	49	44	58
t (Mpa)	4,56	4,09	3,49	3,15	4,16

Les nœuds réduisent la résistance car le fil est dévié, les fibres du nœud sont généralement perpendiculaires à celles du bois étudié et les recherches bibliographiques mettent en évidence l'influence importante de la variation de pente du fil sur la résistance. De plus, des fentes sont courantes dans les nœuds secs, ce qui augmente encore la fragilité.

Les propriétés élastiques sont considérablement influencées par les nœuds, le fil travers ou le fil tors, le module d'élasticité décroît nettement entre un échantillon sans défaut et le même présentant un nœud (tableau ci-dessus).

CONCLUSION GENERALE :

Le matériau bois présente des caractéristiques très sensible à la densité, à l'humidité et à la présence des défauts (nœuds, entailles, gerces).

Les propriétés élastiques sont fortement influencées par les nœuds. Il a été démontré que le module d'élasticité décroît nettement entre un échantillon sans défaut et le même présentant un défaut. Il est apparu dans ce travail que les démarches aussi bien expérimentale que numérique, présentent des conclusions satisfaisantes sur la base des résultats obtenus.

Les éprouvettes sans défaut se caractérisent par des contraintes assez élevés comparativement à celles avec défaut. Les nœuds mettent en évidence des concentrations de contraintes importantes d'où la nécessité d'en tenir en compte dans le domaine de la construction préfabriquée.

Ce travail nous a permis de nous rendre compte de la difficulté que peut présenter un défaut donné positionné dans un matériau orthotrope aussi complexe que le bois. Toutefois, il serait intéressant de reprendre comme perspective, cette problématique relative aux défauts du bois pour l'étudier avec plus d'essais et en y injectant d'autres défauts et paramètres (gerces, pente du fil, humidité...).

BIBLIOGRAPHIE

[Adj'98] Adjznohoum G., Jodin, Ph., Niandou, H., "Optimisation par renforcement local d'éléments de structure", Journées Nationales sur les Composites, Octobre 1998.

[Ben'00] Benoit Yves, "les guides des essences de bois", 2000-127 pages

[Ben'82] Benferhat M., "Contribution à la mesure expérimentale des complaisances élastiques d'un échantillon cubique de bois". DEA de mécanique INPL, 1982.

[Ber'99] Berthelot J.M., "Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures". Masson (édition) Paris, pp.533-560, 1999.

[Ble'00] Bleron L., Bocquet J.F., Duchanois G., Triboulot P., "Etude comparative sur le dimensionnement suivant les règles CB71 et DAN EC5 d'assemblages brochés en lamellé-collé". Annales GC Bois, volume 5, 57-64, 2000.

[Bne'84] Bneder, "Plan National de Développement Forestier du M.A.R.A". Alger, 1984.

[Bre'81] Bretaudeau., "Le guide familial des arbres Ed. la Boetie CTFT", 1981.

[Cha'93] Chantre G., Gouma A., "Influence du génotype, de l'âge de la station sur la relation entre l'infradensité du bois et la vigueur chez l'Epicéa commun" (*Picea abies* Karst) Ann. De l'AFOCEL 61-89, 1993.

[Cau'04] Caubon J., "calcul des structures Technique de l'Ingénieur", {AF5} / A305, 2004.

[Col'88] Collardet J. et Besset J., "bois commerciaux et leur utilisation", 1988.

[Dao'05] Daoui A., "Evaluation des modules d'élasticité d'un matériau orthotrope par méthodes acoustiques et mécanique conventionnelle". Cas du Pin d'Alep de la station de Zemmouri. Mémoire de Magister en physique et mécanique des matériaux, 2005.

[Dil'92] Dilem A., "Contribution à l'étude du déterminisme de quelques propriétés de base du bois de Pin d'Alep" (*Pinus halepensis* Mill.), 1992.

[Dub'98] Dubelco P., Luro D., "l'essentiel sur le bois", édition CTBA, 1998.

[Duc'87] Duchanois G., Pluvinage G., "Simulation numérique des contraintes autour d'un nœud" Journées d'études du G.S. Rhéologie du Bois Paris, 1987.

- [Eng'04] **Engerard J. L.**, “Mécanique de rupture. Technique de l'ingénieur”, {BD₁}/BM 5060, 2004.
- [Eur'95] **Eurocode 5**, “Calcul des ouvrages en bois”, DAN – ENV, 1995.
- [Fra'91] **François D., Pineau A., Zaoui A.**, “Comportement mécanique des matériaux”, 1991.
- [Fre'99] **Frey F., Jirousek J.**, “Analyse des structures et milieux continus méthode des éléments finis”, 1999.
- [Fer'82] **Ferrand J.C.**, “Définition de la densité du bois”. *Réflexions sur la densité du bois. 1^{ère} Partie : Holzforshung* 36 99-105, 1982.
- [Fre'79] **Freman S.**, “Relation between physical and chemical properties of wood adhesion”. *Forest Product Journal* 9(12) 451-458, 1979.
- [Gau'80] **Gautherin M.T.**, “Critères de contrainte limite du bois massif”, 1980.
- [Geo'90] **George P.L.**, “Génération automatique des maillages application aux méthodes des éléments finis”, 1990.
- [Got'01] **Gotz K.H., Hoor D., Natter M.K.J.**, “Construire en bois”, 2001.
- [Gre'99] **Green D.W. – Windy J. E. and Kretchmann D.E.** “Mechanical properties of wood”, 1999.
- [Gui'94] **Guitard, D.**, “Comportement mécanique du Bois”, in *Le Bois Matériau d'Ingénierie*, ARBOLOR, Ph. Jodin éditeur, pp. 92-125, 1994.
- [Gui'87] **Guitard D.**, “Mécanique du matériau bois et composites”, 1987-240 pages
- [Gus'88] **Gustafsson, P.J.**, “A study of strength of notched beams”, in *Proceedings of CIB-W18A Meeting* 21, Parksville, Canada, Paper 21-10-1, 1988.
- [Hai'97] **Haines D., Leban J.M.**, “Evaluation of the MOE of Norway spruce by the resonance flexure method”. *Forest Products Journal*, 47(10), p 90-94, 1997.
- [Hai'96] **Haines, D.W., Leban J.M. and Herbé C.**, “Determination of Young's modulus for Spruce, Fir and Isotropic Materials by the Resonance Flexure with Comparisons to Static Flexure and Other Dynamic Methods”. *Wood Science and Technology*, 30:253-263, 1996.
- [Her'98] **Herzag T., Volz M.**, “Construire en bois 2^{ème} édition”, 1998.
- [Irw'69] **Irwin G.R.**, “Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate Trans ASME”, *Journal of applied Mechanics* 24 p 361-364, 1969.
- [Jod'01] **Jodin P.**, “notch effects on the fracture behaviour of orthotropic materials”, 2001.
- [Jod'02] **Jodin P.**, “notch effects in timber structures”, 2002.

[Kau'79] **Kauman W.**, “Les causes des déformations des bois pendant le séchage” CTB, 1979.

[Lem'85] **Lemaître J., Chaboche J.L.**, “Mécanique des matériaux solides”, Paris, Dunod, 1985.

[Luj'04] **Lu jian, Lieurade H.P.**, “Concentration de contrainte. Technique de l'ingénieur” {BD₁} / B5040, 2004.

[Luc'82] **Lucquin D.**, “Etude de l'influence de la forme et de la taille des échantillons de bois sur le retrait”. DEA sciences du bois. Station de recherches sur la qualité des bois, Champenoux. NANCY, 1982.

[Lar'88] **Laroze S.**, “Mécanique des structures”, Tome II, Poutres. Eyrolles Masson (Ed) Paris, pp.125.142, 1988.

[Kol'68] **Kolmann F.F.P.**, “Principles of wood science and technology”. Springer Verlag Berlin, 1968.

[Mar'78] **Mariaux A., Narboni Ph.**, “Anisotropie de retrait et structure du bois. Essai d'approche statistique”. Revue bois et forêts des tropiques N°178 Mars, avril 1978.

[Mar'79] **Marchal R.**, “Intérêt de la prise en compte des caractéristiques physiques et anatomiques du bois de chêne pour l'appréciation de la qualité des placages d'ébénisterie”, 1979.

[Maa'98] **Maatoug**, “Evolution de quelques propriétés de base du Pin d'Alep” (*Pinus Halepensis* Mill) en fonction de l'âge du peuplement (7, 16, 24 et 32 ans), 1998.

[Mar'92] **Martensson. A.**, “Mechanical behaviour of wood exposed to humidity variations”, 1992.

[Nor'95] **Normes NF EN 408** “Structures en bois, Bois massif et bois lamellé-collé”. Déterminations de certaines propriétés mécaniques. Afnor (Ed) France, 1995.

[Nor'87] **Normes AFNOR, NF B 51-008**, “Essai de flexion statistique”, 1987.

[Nor'93] **Normes AFNOR, NF-EN 383**, “Structures en bois – méthodes d'essai”, 1993.

[Nor'87] **Normes AFNOR, NF B 51-016**, “bois flexion statique, détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défaut”, 1987.

[Nor'87] **Normes AFNOR, NF B50.001 à 006 et B51.007 à 012**, “Essai de compression, traction”, 1987.

[Oht'81] **Ohta. M., Jodin P., Pluinage G.**, “Application de la mécanique de la rupture aux défauts du bois Nœuds non adhérent en traction longitudinale”, 1981.

- [Oht'82] Ohta M., Triboulot P., JODIN Ph., Pluinage G., "The influence of nodes on the strength of wooden boards", 1982.
- [Par'57] Parde J., "La productivité des forêts de Pin d'Alep en France" Annales ENEF B P 367-419, 1957.
- [Per'01] Perré P., Badel E., "L'homogénéisation appliquée au bois : principe et quelques résultats". Bulletin du groupe français de mécanique des matériaux, Mécamat Infos n° 27, 36-46, 2001.
- [Plu'95] Pluinage G., "120 exercices de mécanique élastoplastique de la rupture", 1995.
- [Plu'92] Pluinage G., « Rupture du bois », 1992-320 pages
- [Pol'92] Polge H., "Le bois de Pin d'Alep Forêt méditerranéenne" Tome XIII N°3 p 234-237, 1992.
- [Que'92] Quezel P. & Barbero M., "Le Pin d'Alep et les espèces voisines : répartition et caractères écologiques généraux, sa dynamique récente en France méditerranéenne. Forêt méditerranéenne" XIII (3) :158-170, 1992.
- [Rah'88] Rahman O., Kebdan S., "Introduction à la méthode des éléments finis pour ingénieur", 1988.
- [Rac'96] Racher, P., Biger, J.-P., Rouger, F., Sagot, G., Vidon, G., "Structures en bois aux états limites – Introduction à l'EUROCODE 5 : 1 Matériaux et bases de calcul", Eyrolles éditeur, 1996.
- [Rio'72] Riollot C., "Technologie générale du bois", 1972-225 pages
- [Rou'94] Roux M.L., Anquetil F., "Finition des ouvrages en bois dans le bâtiment CTBA", 1994.
- [Stu'99] Studer M. A., Frey F., "Introduction à l'analyse de structures", Mars 1999.
- [Tro'01] Trouy-Triboulot M.-C., Triboulot P., "Matériau bois, C926 : Durabilité et finitions". vol C2, Collection Techniques de l'Ingénieur – traité construction, février.2001.
- [Tri'81] Triboulot P., "Application de la mécanique de la rupture aux bois massifs considérés comme bois de construction. Université Technologique de Compiègne". Thèse de Docteur-Ingénieur, 1981.
- [Tro'01] Trouy-Triboulot M.-C., Triboulot P., "Matériau bois", C925 : "Structure et caractéristiques" (26 pages). C927 : Matériau bois (pour en savoir

plus) (4 pages), “Techniques de l’Ingénieur – traité construction”, Vol C2, février. 2001.

[The’04] Thevenon M. F., “Durabilité naturelle et conférée du bois”. Deuxième école des sciences et technologie du bois Tetouan 27-30 avril 2004.

[VER’87] Vergne A., Felix B., “The wood knots and their mechanical behavior”, “Journées d’études du groupement scientifique rhéologie du bois”, Paris 1987.

[Wil’96] Williams S., Knaebe M.T., FEIST W.C., “Finishes for exterior wood, forest products society”, 1996.

ANNEXES

ANNEXE 1 REGLES D'UTILISATION DES BOIS

Les constructions ne sont solides qu'à condition de choisir judicieusement les bois à mettre en œuvre et de respecter les règles découlant de leurs propriétés mécaniques.

1. CLASSEMENT TECHNOLOGIQUE DES BOIS

Ce classement est précisé dans la norme (NF B52001) et tient compte des facteurs suivants:

- Epaisseur moyenne des cernes d'accroissement
- Densité minimum à 20% d'humidité
- Diamètre des nœuds et leur nature
- Pente des fibres sur les faces sciées

Il est valable pour les bois courants. Les résineux étant représentés par le sapin, le pin sylvestre, l'épicéa et les feuillus par le chêne. Les bois ne doivent pas être pourris ni présenter d'attaques de champignons ou d'insectes.

Bois de catégorie I (Supérieure)

Fil dans la pente maximum est de 7% sur une face.

Nœuds sains et adhérents, non groupés, de diamètre maximum 30 mm.

Résineux: cernes d'épaisseur inférieure à 3 mm et de densité minimum 0,5 à 20%.

Feuillus: cernes d'épaisseur supérieure à 7 mm et de densité minimum 0,8 à 20%.

Bois de catégorie II (Moyenne)

Fil dans la pente maximum est de 12% sur une face.

Nœuds sains et adhérents, non groupés, de diamètre inférieur à 40 mm.

Résineux: cernes d'épaisseur inférieure à 5 mm et de densité minimum 0,45 à 20%.

Feuillus: cernes d'épaisseur supérieure à 4 mm et de densité minimum 0,75 à 20%.

Bois de catégorie III (Inférieure)

Fil dans la pente maximum est de 18% sur une face.

Résineux: cernes d'épaisseur inférieure à 10 mm.

Feuillus: cernes plus fins et de densité moindre que dans les catégories précédentes.

2. LES CONTRAINTES ADMISSIBLES

Il importe de fixer les limites admissibles des contraintes auxquelles sont soumises les pièces rigides pour s'assurer qu'aucun accident n'est à craindre dans les systèmes étudiés.

Coefficients de sécurité

Pour fixer ces limites, on peut faire des essais de rupture sous des efforts semblables à ceux qui seront effectivement appliqués et adopter des valeurs admissibles inférieures. Le rapport entre les contraintes de rupture et les contraintes ainsi admises s'appelle "coefficient de sécurité". Ce coefficient de sécurité peut être très variable suivant que l'on connaît précisément ou non les charges et surcharges accidentelles que peuvent subir les pièces. De plus, le bois exige une grande prudence car d'un échantillon à un autre, il peut y avoir de grands écarts de résistance (Exemples de coefficients de sécurité: en compression axiale on prendra 4 pour les bois de 1^{ère} et 2^{ème} catégorie et 5 pour les bois de 3^{ème} catégorie).

Les valeurs des contraintes admises compte tenue des coefficients de sécurité sont données dans le tableau A.1. Cependant, il est rare que l'on puisse pour un travail déterminé tester tous les bois qui doivent être utilisés. Aussi utilisera-t-on couramment des valeurs forfaitaires.

Tableau A.1. Valeurs forfaitaires de contraintes couramment utilisées

Sollicitations	Catégories I et II	Catégorie III
Compression axiale	1/4 de la contrainte à la rupture en compression axiale	1/5 de la contrainte à la rupture
Flexion dynamique	1/4 de la contrainte à la rupture en compression axiale + 10%	1/5 de la contrainte à la rupture en compression axiale + 10%
Traction parallèle aux fibres	1/4 de la contrainte à la rupture en compression axiale + 20%	1/5 de la contrainte à la rupture en compression axiale + 20%
Cisaillement longitudinal	1/4 de la contrainte à la rupture au cisaillement	1/4 de la contrainte à la rupture au cisaillement
Compression transversale	1/3 de la charge au palier des déformations de la courbe	1/3 de la charge au palier des déformations de la courbe

Valeurs des contraintes admissibles

L'importance et le rythme des travaux justifient la plupart du temps l'achat de bois de diverses provenances, pour lesquels on ne possède aucun renseignement, et ce serait considérablement freiner le travail que d'imposer des essais systématiques. La norme a donc prévu le cas où aucun essai ne peut être fait (Tableau A.2.).

Tableau A.2. Contraintes forfaitaires affectées des coefficients de sécurité de réduction à l'humidité

Lieu	Humidité des bois	Coefficient de réduction
Local clos et couvert	Inférieure à 17%	1
Local ouvert	de 17% à 20%	0,8
Construction non couverte	de 20% à 25%	0,7
Construction en milieu humide	de 25% à 30%	0,6
Construction hydraulique	supérieure à 30%	0,5

Contraintes admissibles en kgf/cm²

Sollicitations	Catégorie	Catégorie I	Catégorie II	Catégorie	Catégorie III	Catégorie III
	I Feuillus	Résineux	Feuillus	II Résineux	Feuillus	Résineux
Compression axiale	110	100	100	90	80	70
Flexion statique	12	110	110	100	85	75
Traction // aux fibres	130	120	120	110	90	80
Cisaillement longitudinal	15	12	15	12	12	10
Compression transversale	30	15	30	15	-	-

3. MODULE D'ELASTICITE

La théorie de l'élasticité suppose qu'à l'intérieur de la période élastique, les déformations sont proportionnelles aux efforts. Le corps revient à son état initial lorsque les causes de déformations ont disparues.

La période élastique est mal définie pour le bois, elle varie avec l'essence, la provenance, le degré d'humidité, la nature des sollicitations et la durée de l'application des charges. Les modules d'élasticité correspondent à la déformation instantanée au moment où les charges sont appliquées ou résultante dans le cas des charges permanentes.

Valeurs forfaitaires données par la norme

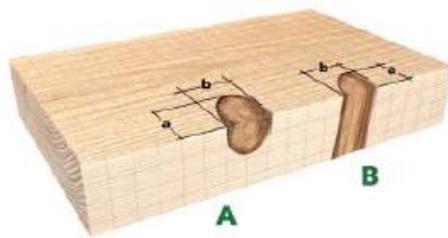
100.000 kgf/cm ²	dans le sens longitudinal pour les charges instantanées.
50.000 kgf/cm ²	dans le sens longitudinal pour les charges permanentes.
5.000 kgf/cm ²	dans le sens transversal pour les charges instantanées.
2.500 kgf/cm ²	dans le sens transversal pour les charges permanentes.

Ils sont mesurés sur le côté ou la branche origine du nœud sur le bois, a été coupée transversalement par rapport à son axe longitudinal.

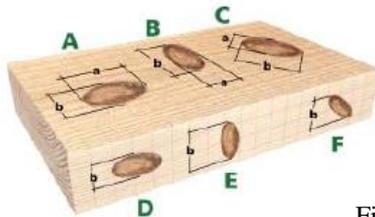
Dans le cas contraire ils sont pris en compte par leur présence.

La dimension de nœud prise en compte sur les faces est la moyenne entre la plus petite dimension du nœud et sa plus grande dimension.

Sur les rives, la dimension prise en compte est la distance entre les tangentes aux nœuds parallèles aux arêtes de la pièce (voir figure A.1.).



Dimensions à prendre en compte
Sur les faces (Nœuds A, B) = $(a+b)/2$
Sur les rives (Nœud A) = entre les tangentes parallèles aux rives



Dimensions à prendre en compte
Sur les faces (Nœuds A, B, C) = $(a+b)/2$
Sur les rives (Nœuds D, E, F) = entre les tangentes parallèles

Figure A.1. Mesurage des nœuds

Aspect spécifique de mesurage des nœuds

La dimension des nœuds est mesurée sur le côté où le nœud est coupé transversalement ou obliquement entre les tangentes aux nœuds ou au groupe de nœuds parallèles à l'axe de la pièce.

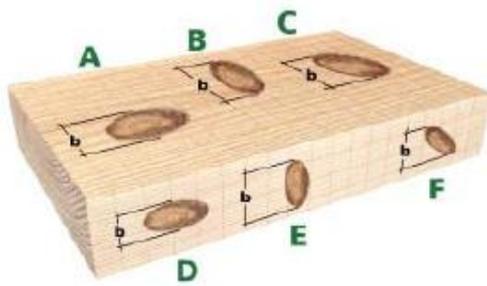
La nation de nœuds groupés est primordiale dans le classement visuel d'aspect selon la résistance mécanique de la pièce.

Définition des nœuds groupés (NF EN 844)

Nœuds situés de telle façon que la rectitude du fil n'est pas rétablie entre deux nœuds successifs.

Il est admis conventionnellement que la distance entre deux nœuds consécutifs (dans le sens longitudinal) doit être inférieure à la largeur de la pièce ou inférieure à 150 mm dans le cas où la largeur de la pièce dépasse 150 mm.

Exemple de mesurage des nœuds



Dimension à prendre en compte
 Sur les faces (nœuds A, B,C) = entre les tangentes parallèles aux rives
 Sur les rives (nœuds D,E,F) = entre les tangentes parallèles aux rives

Dimension à prendre en compte
 Sur les faces :entre les tangentes
 Nœud A= dimension d
 Nœud B = $d_1 + d_2 + \dots + d_n$
 parallèles aux rives

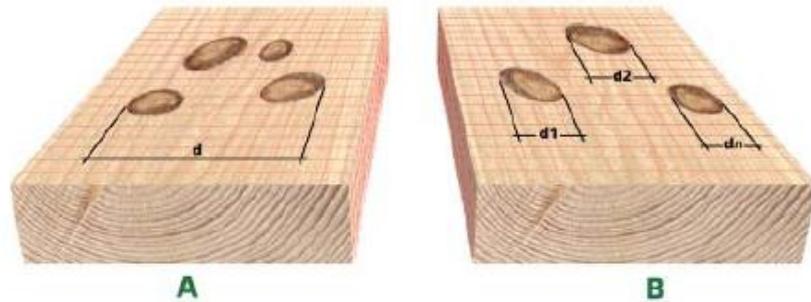


Figure A.2. Exemple de mesurage des nœuds

1. LES CLASSEMENTS D'ASPECT ET D'UTILISATION EN STRUCTURE

Classement d'aspect des sciages résineux

Défini par la norme européenne NE EN 1611-1 (Octobre 1999) applicable aux épicéas, sapins, pins et douglas européens.

Dimensions des bois sciés

La Norme NF EN 1313-1 d'avril 1997, amendée en mars 2000, fixe les dimensions préférentielles existant sur le marché et les écarts admissibles.

Classement structure visuel

La norme NF B 52-001 de décembre 1998 fixe les critères visuels associés à des classes de résistance pour l'utilisation en structure des principales essences résineuses et feuillues françaises.

Classement structure par machine

La Norme NF EN 519 définit les classes de bois sciés utilisables en structure obtenues lors d'un classement par machine.

1.1. Le classement d'aspect

La base de conception des différents choix

Le classement d'aspect des sciages résineux européens repose sur des critères visuels relatifs à l'aspect des faces et des rives selon la nature, l'importance et la localisation des singularités, les imperfections de débit et les altérations du bois.

Pour classer une pièce, il convient d'examiner successivement les quatre côtés de la pièce et de leur attribuer un choix en fonction des limites admises dans chaque choix pour les différents critères.

Les choix possibles sont 0, 1, 2, 3, 4.

Le choix de la pièce est du choix immédiatement supérieur au choix du côté le moins beau (pièces de section carrée). Dans le cas de pièces de section rectangulaire, le choix de la pièce est le choix immédiatement supérieur au choix de la moins belle face. Toutefois si la rive est d'un choix inférieur au choix établi par le classement des faces, la pièce est du choix de la plus mauvaise rive.

Ce système est bien conforme à la réalité : lors de la mise en œuvre du bois, les utilisateurs ont toujours pris en compte la notion de parement et de contre parement. La qualité de la rive, de largeur réduite par rapport à celle de la face, est un élément important de l'utilisation d'une pièce, tant au niveau de l'aspect que de la solidité de la pièce.

Le tableau ci-après illustre la façon de déterminer le choix d'une pièce de bois scié en fonction de la qualité de ses faces et rives, Il est théorique, car certains cas de figure se présenteront peu souvent, le choix d'une pièce de bois scié étant une conséquence naturelle du tronçon de l'arbre d'où est issue la pièce de bois sciée.

Il introduit deux modes de classement, repérés par le préfixe G2- ou G4-. Dans ce préfixe la lettre G- indique le mode de classement (G2- indique que les nœuds ont été pris en compte sur deux faces; G4- indique que les nœuds ont été considérés sur les 4 côtés.). Les autres caractéristiques sont considérées sur les quatre côtés. En France, le système G4- est le plus appliqué.

Référence pièce	Face 1	Face 2	Rive 1	Rive 2	Choix pièce	
A	1	2	1	1	1	1
B	1	3	2	2	2	2
C	1	1	2	1	1	2
D	1	1	2	3	1	3

Dans la détermination des choix, les nœuds sont souvent considérés comme primordiaux. Il faut pourtant reconnaître que lors de l'utilisation du bois, ils ne sont pas le critère à exclure absolument.

Même s'ils ne font pas référence à une utilisation donnée, les choix définis ci-dessus sont plus ou moins adaptés à un type d'utilisation. Il ne faut pas oublier que ces choix sont des choix de matière première, à partir de laquelle des ouvrages finis peuvent être réalisés dans des conditions spécifiques de rendement matière et de rentabilité, selon la destination de l'ouvrage fini et le degré d'acceptation des singularités du bois dans l'ouvrage fini.

Description des différents choix

La définition complète des différents choix figure dans la plaquette « Choisir les sciages résineux.. .C'est simple, c'est facile : suivez la norme européenne ».

Une description simplifiée est proposée ci-dessous:

Choix (G2- ou G4-) 0

Les pièces de bois scié composant un lot de bois classé —O présentent peu de petits nœuds sur les 4 côtés de la pièce, des flaches réduites devant disparaître au rabotage, peu de poches de résine, fentes ou gerces et aucune trace d'altération biologique ou de dégâts d'insectes. Les déviations de fil anormales sont exclues.

Les pièces de choix O sont destinées plus particulièrement à être utilisées en menuiserie fine, ameublement, agencement, décoration, menuiserie intérieure et extérieure, fermetures.

Elles se trouvent en quantité réduite. Elles sont rares dans les grandes dimensions. En France, principalement dans les pins, on trouve des bois sans nœuds. Ce choix est désigné sous l'appellation 0-A.

Choix (G2- ou G4-) 1

Les pièces de bois scié composant un lot de bois classé -1 présentent des nœuds de dimension petite à moyenne, en nombre réduit, fonction de la dimension des nœuds. Les nœuds noirs non sautant sont acceptés s'ils sont sains. Certaines pièces peuvent comporter des nœuds moustache.

La présence des nœuds est compatible avec l'appellation souvent utilisée de « bois rabotable » pour désigner des bois de choix 1.

Les poches de résine sont peu nombreuses et de petite taille. Les flaches doivent disparaître au rabotage. Aucune trace d'altération biologique ou de dégâts d'insectes n'est autorisée. Les déviations de fil anormales sont exclues. Les pièces de choix 1 constituent une matière première particulièrement adaptée à l'utilisation en charpente choisie, en charpente industrielle ou lamellée - collée, en menuiserie courante et en agencement, à l'élaboration de fermetures, d'emballages spéciaux

Pour les emplois structure, il y a lieu de vérifier leur conformité avec la classe de résistance mécanique désirée, définie ci-après.

Choix (G2- ou G4-) 2

Les pièces de bois scié composant un lot de bois classé -2 comportent en général des nœuds de dimension individuelle restant souvent limitée à 45 —50 mm. Dans certains cas de pièces de très grosse section, ils peuvent être plus gros, sans que leur dimension ne nuise à la solidité de la pièce. Il n'y a pas de restriction quant à la nature et qualité du nœud. La présence de nœuds pourris ou sautés reste toutefois accidentelle.

La dimension des flaches est limitée à 10 mm de chaque côté de la pièce et à 30% de la longueur sur chaque arête. Des légères traces de bleuissement et d'échauffure peuvent être présentes sur un nombre limité de pièces. Toute autre altération biologique et dégât d'insecte sont exclues. Les déviations de fil anormales sont permises. Les pièces de choix 2 constituent une matière première particulièrement adaptée à l'utilisation en charpente traditionnelle, en ossature ou pour différentes structures travaillantes, en menuiserie courante, en emballage industriel....

Pour les emplois structure, il y a lieu de vérifier leur conformité avec la classe de résistance mécanique désirée, définie ci-après.

Choix (G2- ou G4-) 3

Les pièces de bois scié composant un lot de bois classé -3 présentent les singularités dont la dimension, la nature ou le nombre n'ont pas permis le classement de la pièce dans les choix précédents. La solidité et la mise en œuvre de l'ensemble de la pièce ne doivent pas être compromises.

Les flaches sont limités à 20 mm de chaque côté de la pièce et à 50% de la longueur.

La présence de pourriture est exclue. La présence de piqûres noires doit affecter moins de 15% de la surface de la pièce.

Elles sont souvent désignées en scierie sous le vocable « caissage », ou « palette », mais peuvent être utilisables dans une large étendue d'emploi pour lesquels l'aspect n'a qu'une importance minime.

Choix (G2- ou G4-) 4

Correspond à toutes les pièces déclassées des choix précédents. La configuration géométrique de la pièce doit toutefois être préservée. Les flaches peuvent être importantes mais restent limitées à 20 mm épaisseur. La présence de pourriture est limitée à quelques tâches.

Le choix 4 est communément dénommé sous le vocable « coffrage », même s'il est possible de l'utiliser pour d'autres emplois.

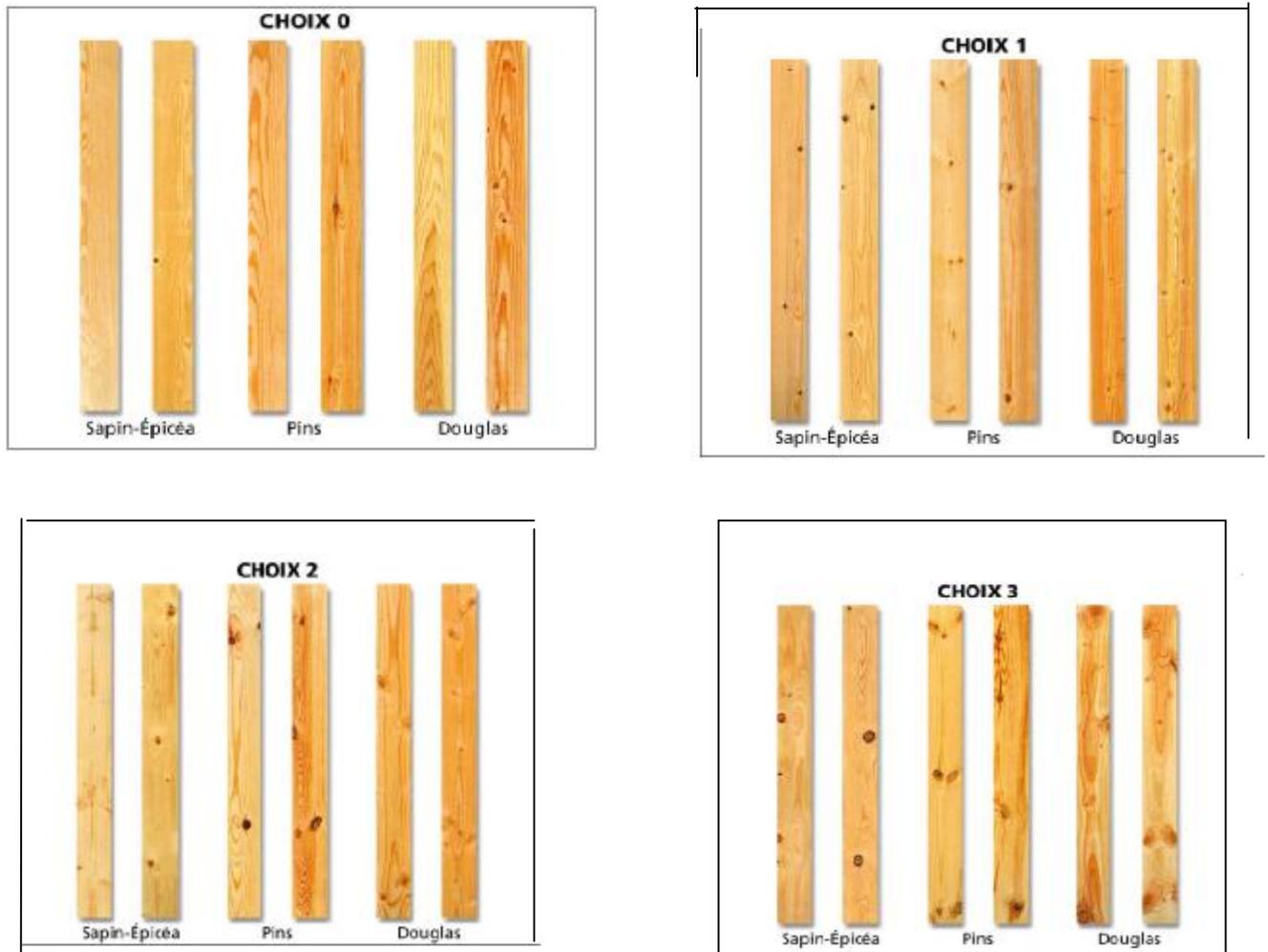


Figure A.3. Description des différents choix

1.2. Le classement en structure

Les choix structurels et leurs applications

Pour mieux répondre aux conditions d'utilisation en structure des résineux français et aux conditions de disponibilité sur le marché, le CTBA a mis au point une méthode de classement visuel. Cette méthode est conforme aux textes normatifs européens et fait l'objet des parties 4 et 5 de la norme française de décembre 1998.

Le classement visuel structure définit 3 choix désignés par les appellations ST-I, ST-II, ST-III. Les correspondances entre classes mécaniques et visuelles sont données dans le tableau suivant (EN 1912 de Septembre 1998):

Tableau A.3. Caractéristiques mécaniques pour les différents classements

Caractéristiques mécaniques (Teneur en humidité de référence 12%)	C 30 (ST-I)	C 24 (ST-II)	C 18 (ST-III)
	Contraintes admissibles (Mpa)		
Flexion parallèle	13,2	10,5	8,00
Compression parallèle	11,00	9,00	8,00
Traction axiale	8,00	6,00	5,00
Cisaillement longitudinal	1,30	1,10	0,80
Compression transversale	2,50	2,30	2,00
Traction transversale	0,15	0,15	0,15
	Modules conventionnels de déformation (Mpa)		
Cisaillement	750	690	550
Longitudinal, effort tranchant inclus	12 000	11 000	10 000

Dans les appellations C30, C24, C18, la lettre C (classe) est suivie du nombre correspondant à la valeur de la contrainte caractéristique de rupture en flexion exprimée en méga pascals (MPa).

La classe C18 convient bien aux utilisations en charpente traditionnelle.

La classe C24 convient essentiellement à la charpente industrielle (fermettes) et lamellée- collée.

La classe C30 est préconisée pour la charpente lamellée - collée à hautes performances.

Le classement basé sur l'aspect est spécifique à chaque essence, pour les valeurs admises pour les cernes d'accroissement et les nœuds (voir tableau ci-dessous).

METHODE ET ZONE DE PRISE EN COMPTE DU CRITERE	ESSENCES	CLASSES		
		ST-I	ST-II	ST-III
		Largeur des cernes d'accroissement (mm)		
	Sapin – Epicéa - Pins	6	8	10
	Douglas	8	10	12
		DIAMETRE DES NOEUDS		
Sur la face	Sapin – Epicéa – Douglas	Ø 1/6 largeur Ø 3/4 largeur Et Ø 30 mm	Ø 1/2 largeur	et Ø 100 mm
Sur la face		Ø 2/3 épaisseur et Ø 40		
Sur la face	Pins	Ø 1/10 largeur Ø 2/3 largeur Et Ø 15 mm	Ø 1/3 largeur	et Ø 100 mm
Sur la face		Ø 1/3 épaisseur Et Ø 15 mm	Ø 2/3 épaisseur	et Ø 30 mm
		FENTES		
traversantes	Toutes essences	Longueur La pièce	deux fois la largeur de	600 mm
Non traversantes		Longueur de la pièce	moitié de la longueur	non limitée
		GROSSE POCHE DE RESINE		
	Toutes essences	Non admise	admise si < 80 mm	
		ENTRE-ECORCE		
	Toutes essences	Non admis		
		PENTE DE FIL (EN %)		
Locale	Toutes essences	10 %	25 %	
générale		7 %	17 %	
		FLACHES		
Longueur	Toutes essences	1/3 de la longueur de la pièce et < 100 m		
Largeur		Non admise	1/3 de l'épaisseur de la pièce	
		ALTERTIIONS BIOLOGIQUES		
Bleu Traces de gui	Toutes essences	Permis		
Piqûres noires		Permis sur une seule face		
échauffure		Exclue		
		DEFORMATION MAXI. (en mm/ Longueur de 2 m)		

Annexe 3 calcul de la masse volumique du mélange (colle – Sciure)

LA MASSE VOLUMIQUE DU MELANGE $M_{VM} = M_M / V_M$

LE VOLUME DU MELANGE $V_M = \Pi \cdot R^2 \cdot H$

R : RAYON DU CYLINDRE

H : HAUTEUR DU CYLINDRE

R = 2 CM

H = 2 CM

$V_M = 3,14 \cdot 4 \cdot 2 = 25,12 \text{ CM}^3$

POUR :

{ 20 % COLLE BLANCHE
80 % SCIURE DU PIN D'ALEP On a $M_m = 13 \text{ g} \Rightarrow M_{vm} = 0,51 \text{ g/cm}^3$

POUR :

{ 30 % COLLE BLANCHE
70 % SCIURE DU PIN D'ALEP On a $M_m = 17 \text{ g} \Rightarrow M_{vm} = 0,67 \text{ g/cm}^3$

POUR :

{ 40 % COLLE BLANCHE
60 % SCIURE DU PIN D'ALEP On a $M_m = 19 \text{ g} \Rightarrow M_{vm} = 0,75 \text{ g/cm}^3$

POUR :

{ 50 % COLLE BLANCHE
50 % SCIURE DU PIN D'ALEP On a $M_m = 21 \text{ g} \Rightarrow M_{vm} = 0,83 \text{ g/cm}^3$

POUR :

{ 60 % COLLE BLANCHE
40 % SCIURE DU PIN D'ALEP On a $M_m = 23 \text{ g} \Rightarrow M_{vm} = 0,92 \text{ g/cm}^3$

POUR :

{ 80 % COLLE BLANCHE
20 % SCIURE DU PIN D'ALEP On a $M_m = 26 \text{ g} \Rightarrow M_{vm} = 1,035 \text{ g/cm}^3$