

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université M'Hamed BOUGARA, Boumerdès



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

École Doctorale : Science et Ingénierie: Matériaux-Structure et Environnement.

Spécialité : Sciences et Génie des Matériaux.

Option : Matériaux de Structure et Environnement.

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Magister.

Thème :

**Détermination de la résistance à la propagation
de fissures d'essences de bois Algériens.**

Présenté par : Salim Kennouche.

Devant le Jury :

Mr.Boujema BEZZAZI	Professeur	UMBB	Président
Mr.Abdellatif ZERIZER	Professeur	UMBB	Rapporteur
Mr.Kamel AIT TAHAR	Professeur	UMMTO	Examineur
Mr.Farid BELHAMEL	Maître de conférences /A	CNERIB	Co-rapporteur
Mr.Hamid AKNOUCHE	Maître de conférence / B	UMBB	Examineur

Boumerdès 2010

dédicace

Je dédie ce travail à :

**La mémoire de mon cher et regrettable cousin. Ainsi que sa
famille Et l'adorable Mazighe.**

**Ma chère mère et mon honorable père pour leur
soutien, leur aide,**

Leur patience et leur amour.

Mes frères: Toufik, Sofiane, Ilas.

Mes sœurs: Nawal et Cilia

A mon adorable oncle Lounes et Malek

Toute ma grande famille

Tous mes amis.

Remerciements

Je remercie *Allah* tout puissant de m'avoir donné le savoir et la faculté de pouvoir poursuivre mes études afin de choisir un métier d'avenir noble.

Je commence tout d'abord par, le Pr. A. ZERIZER de m'avoir proposé ce sujet de mémoire, qui a régulièrement donné valeur à mon travail et Dr. F.BELHAMEL de m'avoir fortement encouragé à l'accepter ainsi que, sa contribution à la réalisation de ce travail.

Tout comme, je présente mes sincères reconnaissances au Pr. B.BEZZAZI, et le Pr.T.ABADLIA pour leurs conseils et leurs contributions à l'achèvement de ce travail.

Je remercie particulièrement, le Dr M. SAÏDI enseignant et chef de Département (génie des matériaux). Pour la mise à ma disposition des moyens matériels pour réalisation de ce travail.

Je tien à remercier le professeur K.AIT TAHAR et le Dr.H.AKNOUCHE, pour leur acceptation d'examiner de ce travail.

Résumé :

Le bois est l'un des matériaux de construction les plus répandus, qui présente des défauts comme les nœuds, les poches de résine, les fissures dûs au séchage. Leur présence dans une structure en bois est la conséquence première d'une structure exposée aux contraintes extérieures et l'amorçage du défaut, tout en recevant une énergie extérieure suffisante pour faire propager le défaut en créant des nouvelles surfaces dans la structure en bois. En ce qui concerne les éléments structuraux en bois.

Dans notre travail, on a déterminé un facteur intrinsèque à la rupture, qui est le taux de restitution de l'énergie G (J/m^2), caractérisant la résistance à la propagation des fissures, de trois essences de bois Algérien, à partir d'éprouvettes normalisées sur lesquelles sont prévues des entailles. Ces dernières ont subi des essais de flexion trois points. L'exploitation des résultats obtenus nous permet d'estimer le taux de restitution de l'énergie

Mots clé : bois, mécanique, rupture, énergie, et fissure.

Abstract:

Wood is one of the most spread building materials, which present defects (nodes, resin pocket, cracks which are with drying.....) their presence in a timber structure, the consequence first of an exposed structure to the constraint outside is the starting of the defect, of with work external of the constraints, while receiving a sufficient energy outside to make propagate the defect by creating new surfaces in the timber structure. With regard to the structural elements out of wooden, they will lose in resistant section because of the breach of the structure, will therefore lose mechanical resistance because of the increase in dimensions of the defects and the break of the micro fibrillates.

In our work, one determined an intrinsic factor with the failure, which is the energy release rate G (J/m^2) which characterizes resistance to the propagation of a crack, of three gasoline Algerian, starting from the standardized test-tubes having notches, having undergone tests inflection three points. The exploitation of the curves force-displacement, allowed us the estimate of the energy release rate.

Key words: Wood, energy release rate (G), failure mechanic, and crack.

الملخص:

الخشب يعتبر من مواد البناء الأكثر استعمالا، و الذي يتقيد بالعيوب (عقد، جيوب راتج، والشقوق التي هي التجاويف.....)، وجودهم في هيكل خشبي، ينتج منه تعرض لخطر الانشقاق واستمراره وهذا عند تعرضه لقوة خارجية، في حين تلقي طاقة خارجية كافية للنشر الافتراضي من خلال خلق الأسطح الجديدة في هيكل الخشب. بشأن العناصر الهيكلية لمادة الخشب، فإن مناطق القوة تضعف بسبب فتح جديد للهيكل، كما تفقد قوتها بسبب زيادة حجم العيوب والفشل الجزئي من الألياف.

في عملنا ، حددنا عامل جوهري للتمزق ، وهو معدل انبعاث الطاقة G (جول متر مربع) ، الذي يميز المقاومة ونشر الشقوق ، لثلاثة أنواع من الخشب الجزائري ، من العينات المقياسية ذو الشقوق ، بعد قياس النقص بثلاث نقاط الذي مكنا من استرجاع منحنيات القوة-الانتقال، فقد حسبنا مساحة الحيز بين المنحنيات و الذي سمح لنا بتقدير معدل انبعاث الطاقة G .

الكلمات الرئيسية : الخشب ، وميكانيكا الانكسار ، معدل انبعاث الطاقة والكراك.

SOMMAIRE

Page

Remerciements	
Sommaire	
Introduction générale.....	01

Chapitre I- Introduction au matériau bois

I. Introduction au matériau bois.....	02
I.1. Bois – Généralités.....	03
I.1.2. Formation du bois et de l'écorce.....	04
I.1.3. Quelques caractéristiques chimiques et physiques du bois.....	06
I.1.4. Composition, et caractéristiques principales.....	06
I.1.5. Densité et dureté	08
I.1.6. Constituants chimiques du bois.....	11
I.1.7. Ultra-structure de la paroi cellulaire.....	10
I.1.8. Classification des bois.....	12
I.1.9. Motivation d'utilisation du bois.....	12
I.1.9.1. Bois, un matériau naturel et écologique.....	12
I.1.9.2. Bois, un matériau renouvelable.....	13
I.1.9.3. Bois, un matériau robuste et durable.....	13
I.1.10. Place du bois dans le marché Algérien.....	14
I.1.11. Défauts du bois.....	15
I.1.11.1. Introduction.....	15
I.1.11.2. Nœuds et les fentes.....	16
I.1.11.2.1. Nœuds.....	16
I.1.11.2.2. Irrégularités dans la structure des nœuds.....	17
I.1.11.2.3. Fentes ou gerces.....	17
I.1.12. Autres défauts naturels.....	17

Chapitre II-mécanique de la rupture

II.1. Propriétés mécaniques du bois.....	19
II.1.1. Élasticité.....	19
II.1.2. Influence de la densité.....	20
II.1.3. Effet de la de la température et de la teneur en humidité.....	21
II.1.4. Effet de couplage des paramètres physiques	23
II.2. Comportement mécanique du bois.....	24
II.2.1. Propriétés mécaniques du bois.....	24
II.2.1.1. Comportement élastique.....	25
II.2.1.2. Comportement non- élastique.....	26
II.2.2. Résistance à la propagation de fissures.....	28
II.3. Modèle élastique.....	29
II.4. Modèle élastoplastique	29

II.5. Modèle viscoélastique.....	30
II.6. Mécanique de la rupture.....	31
II.6.1. Historique.....	31
II.7. Endommagement et mécanique de la rupture.....	32
II.8. Fissures statiques, quasi-statiques, dynamiques.....	33
II.9. Modes de rupture.....	33
II.10. Mécanique linéaire, et non-linéaire de la rupture.....	34
II.10.1. Module d'Young et coefficient de Poisson.....	34
II.11. Rupture.....	35
II.11.1. Rupture fragile.....	35
II.11.2. Rupture ductile.....	35
II.12. Étude d'un milieu élastique fissuré.....	35
II.13. Phases de chargement.....	36
II.13.1. Phase d'ouverture.....	36
II.13.2. Phase de propagation.....	36
II.14. Hypothèses du modèle de rupture fragile.....	36
II.14.1. Modèle de rupture fragile.....	37
II.15. Coefficients de concentration k et facteur d'intensité K	38
II.16. Approche Globale ou Énergétique.....	38
II.17. Taux de restitution d'énergie.....	38
II.17.1. Intégrales de contour.....	40
II.17.2. Calcul du taux de restitution d'énergie.....	41
II.17.3. Calcul par avancée réelle de fissure.....	41

Partie expérimentale :

III.1. Matières premières.....	42
III.1.2. Provenance de la matière.....	42
III.1.3. Préparation des éprouvettes	43
III.2. Essais physiques	45
III.2.1. Détermination des masses volumiques des trois bois	45
III.2.2. Détermination du gonflement longitudinal, radial et transversal de chaque espèce.....	45
III.2.2.1. Remarque.....	50
III.2.2.2. Interprétation des résultats.....	50
III.3. Détermination du retrait longitudinal, radial et transversal de chaque espèce.....	50
III.3.1. Remarque.....	54
III.3.2. Interprétation	54
III.4. Détermination des modules de Young.....	54
III.4.1. Résultats.....	55
III.4.2. Remarque.....	56
III.4.3. Remarque.....	57
III.4.4. Remarque.....	58
III.4.5. Interprétation.....	58
III.5. Calcul des modules de Young, selon la norme (ISO 14125:1998) (F).....	58

III.5.1. Remarque.....	58
III.6. Détermination des énergies de rupture J (N*m).....	61
III.6.1. Remarque.....	63
III.6.2. Interprétation.....	63
III.7. Calcule numérique.....	64
III.7.1. Formules de calcul.....	64
III.7.2. Interprétation des résultats.....	68
Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	71
Recommandations et perspectives.....	72
Annexes	

Liste des figures

Fig I.1 : Photo d'une partie du bois et de l'écorce dans une coupe transversale d'un tronc de feuillu.....	04
Fig I.2 : Représentation schématique de la croissance primaire et secondaire d'un arbre par la superposition successive des couches en forme de cône.....	05
Fig I.3 : Organisation du bois résineux et feuillus.....	06
Fig I.4 : Coupe dans un tronc d'arbre.....	07
Fig I.5 : Organigramme mentrant la composition chimique du bois anhydre.....	08
Fig I.6 : Représentation schématique d'une cellule longitudinale (trachéide) entourée de 6 autres cellules.....	10
Fig I.7 : Les différentes couches de fibres (F) et cellules de parenchyme (P) sont mis en évidence au moyen d'un microscope polarisé -Thomas (1991).....	11
Fig I.8 : Représentation schématique des différentes couches constituant la paroi cellulaire.....	12
Fig I.9 : Les utilisations du bois.....	12
Fig I.10 : Les principales variétés de nœuds.....	15
Fig I.11 : Principaux types de fentes.....	17
Fig II-1 : Courbe contrainte-déformation du matériau bois.....	19
Fig II-2 : Effet de la température sur les modules d'élasticité pour différentes espèces (d'après Sulzberger 1953).....	22
Fig II.3 : Module élastique en fonction de la température.....	23
Fig II.4 : Courbes typiques de contrainte- déformation pour le bois [Tro et al].....	26
Fig II.5 : Types de rupture à la compression perpendiculairement aux grains du bois. (a) compression. Radiale ; (b) compression. Tangentielle et (c) compression. Sous angle [Tro et al.].....	27
Fig II.6 : fissuration au niveau microstructural pour le mode I de chargement (a) fracture des parois cellulaires ; b) fissuration par la séparation des cellules adjacentes.[Tro et al.].....	28
Fig II.7 : Mode de rupture.....	34
Fig II.8 : Allongement et contraction latérale (effet de Poisson).....	34
Fig II.9 : Courbe contrainte déplacement Loi de Hooke.....	35
Fig II.10 : Les zones de champs mécaniques.....	36
Fig II.11 : Ouverture et propagation d'une fissure.....	36
Fig II.12 : Traction en tête de fissure.....	37
Fig II.13 : Facteur d'intensité de contrainte.....	38
Fig II.14 : Méthode de calcul du taux de restitution d'énergie G	39
Fig II.15 : Contour d'intégration J	40
Fig II.16 : Détermination du J par la méthode de complaisance.....	41
Fig III.1: Images satellite Google earth 2009.....	42
Fig III.2 : prélèvement et conservation des grumeaux du chêne zeen et d'eucalyptus.....	43
Fig III.3: Photos Google earth atelier bois (ex-INIL).....	43
Fig III.4: étape de préparation des éprouvettes (coupe et rabotage).....	44
Fig III.5 : Finition des éprouvettes (20*20*340).....	44
Fig III.6 : préparation éprouvettes entaillées (4 et 8 mm).....	44

Fig III.7 : détermination des dimensions et poids des éprouvettes (20*20*20).....	45
Fig III.8 : éprouvette de bois (20*20*20).....	46
Fig III.9 : Évolution de lamasse des trois essences en fonction du temps (absorption).....	47
Fig III.10 : Dimension (D_L , D_R , D_T) pin d'Alep.....	48
Fig III.11 : Dimension (D_L , D_R , D_T) chêne zeen aubier.....	49
Fig III.12 : Dimension (D_L , D_R , D_T) chêne zeene duramen.....	49
Fig III.13 : Dimension (D_L , D_R , D_T) eucalyptus aubier.....	49
Fig III.14 : Dimension (D_L , D_R , D_T) eucalyptus duramen.....	49
Fig III.15 : éprouvettes de bois (20*20*20) dans l'étuve de séchage.....	50
Fig III.16 : Evolution massique en fonction du temps (lors du séchage).....	52
Fig III.17 : Dimension (D_L , D_R , D_T) pin d'Alep.....	53
Fig III.18 : Dimension (D_L , D_R , D_T) chêne zeen aubier.....	53
Fig III.19 : Dimension (D_L , D_R , D_T) chêne zeen duramen.....	53
Fig III.20 : Dimension (D_L , D_R , D_T) eucalyptus aubier.....	53
Fig III. 21 : Dimension (D_L , D_R , D_T) eucalyptus duramen.....	53
Fig III.22 : Image du labo à partir de l'espace, éprouvettes et réalisation de l'essai flexion trois points.....	55
Fig III.23 : courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois pin d'alép sans entaille, avec entaille $a_1 = 4$ mm, et $a_2 = 8$ mm.....	55
Fig III.24 : courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois chêne zeen aubier, sans entaille, avec entaille $a_1 = 4$ mm, et $a_2 = 8$ mm.....	56
Fig III.25 : courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois chêne zeen duramen, sans entaille, avec entaille $a_1 = 4$ mm, et $a_2 = 8$ mm.....	57
Fig III.26 : courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois eucalyptus obier, sans entaille, avec entaille $a_1 = 4$ mm, et $a_2 = 8$ mm.....	57
Fig III.27 : courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois eucalyptus duramen, sans entaille, avec entaille $a_1 = 4$ mm, et $a_2 = 8$ mm.....	58
Fig III.28 : schéma et photos, essai flexion trois points.....	58
Fig III.29 : interface de travail origin 7.5.....	59
Fig III.30 : tracement de la courbe et calcul de la surface sous la courbe.....	62
Fig III.31 : représentation des nœuds avec élément finis.....	62
Fig III.32 : représentation, (a) pointe de fissure, (b) les nœuds les plus proches de la pointe de fissure par outil numérique.....	65
Fig III.34 : représentation pin d'Alep, K en fonction de r $K = f(r)$	67
Fig III.35 : représentation chaîne zeen, K en fonction de r $K = f(r)$. (a) aubier, (b) duramen.....	67
Fig III.36 : représentation eucalyptus, K en fonction de r $K = f(r)$. (a) aubier, (b) duramen.....	68
Fig III.37 : Contrainte selon x , pin avec entaille $a_1 = 4$ mm.....	70
Fig III.38 : Contrainte selon x , pin avec entaille $a_1 = 8$ mm.....	70

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les six premiers pays forestiers dans le monde.....	03
Tableau I.2 : Les sept premiers pays forestiers de l'Union européenne.....	03
Tableau I.3 : Classification des essences selon la densité et la dureté.....	09
Tableau I.4 : Composition et nature des éléments de base du bois.....	10
Tableau I.5 : Classification des bois, a - selon la masse volumique. b - selon la dureté, c- selon le point de saturation des fibres.....	12
Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des bois [Tro et al].....	24
Tableau III.1 : masse volumique et densité des trois bois étudiés à 12 % d'humidité.....	45
Tableau III.2 : évolution massique des essences étudiées en fonction du temps.....	46
Tableau III.3 : variations dimensionnelles des essences (pin d'alêp, chaine zeen issu d'aubier et du duramen).....	47
Tableau III.4 : variations dimensionnelles d'eucalyptus issu d'aubier et du duramen).....	48
Tableau III.5 : gonflement longitudinal, radial et tangentiel.....	49
Tableau III.6 : évolution massique des essences étudiées en fonction du temps au cours du séchage.....	51
Tableau III.7 : variations dimensionnelles des essences (pin d'alêp, chaine zeen issu d'aubier et du duramen) au cours du séchage.....	52
Tableau III.8 : variation dimensionnelle d'eucalyptus issu d'aubier et du duramen.....	52
Tableau III.9 : retrait longitudinal, radial et tangentiel.....	54
Tableau III.10 : Valeur de s' , s'' , F' , F'' , E_L	60
Tableau III.11 : Valeur des différents modules élastiques.....	62
Tableau III.12 : les valeurs du taux de restitution d'énergie G (J/m^2).....	62
Tableau III.13 : les valeurs des abscisses des nœuds les plus proches de la pointe de fissure, les coordonnées cylindriques et les déplacements selon l'axe y obtenus par outil numérique....	65
Tableau III.14 : valeurs de K_1 ($Mpa.m^{1/2}$), G (J/m^2).....	67
Tableau III.15 : valeurs de G (KJ/m^2), jusqu'à la rupture, à la limite élastique, et celles par outil numérique.....	68

Nomenclature

E : Module d'Young ;

ε : Déformation ;

σ : Contrainte ;

$\varepsilon_R, \varepsilon_T, \varepsilon_L$: Les déformations axiales suivant les directions R, T et L ;

$\sigma_R, \sigma_T, \sigma_L$: Les contraintes normales suivant les directions R, T et L ;

$\gamma_{TL}, \gamma_{RL}, \gamma_{RT}$: Les déformations angulaires par rapport à R, T et L ;

$\tau_{TL}, \tau_{RL}, \tau_{RT}$: Les contraintes de cisaillement dans les plans TL, RL ou RT ;

Y : propriétés élastiques ;

D : Est la densité du bois ;

a et b : Sont des constantes données dans des tables pour chaque espèce de bois ;

E_1, E_2 : Sont les modules correspondant aux températures T_1 et T_2 ;

α : Le coefficient de dilatation thermique ;

E_L : Le module de Young longitudinal ;

E_R : Le module de Young radial ;

E_T : Le module de Young transversal ;

G_{RT} : Le module de cisaillement radial-transversal ;

G_{TL} : Le module de cisaillement transversal-longitudinal ;

G_{LR} : Le module de cisaillement longitudinal-radial ;

H : Humidité relative ;

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$: Sont des coefficients définis au moyen de la régression multiple à partir de résultats expérimentaux, T est la température et H la teneur en humidité ;

$D_{12\%}$: Densité à 12% d'humidité ;

T : Température ;

C : Matrice de complaisance ;

$\nu_R, \nu_{LR}, \nu_{TR}, \nu_{RT}, \nu_{LT}, \nu_{TL}$ sont les coefficients de Poisson ;

$E_{b//}$: Module de Young parallèle du bois ;

E_s : Module de Young de la paroi cellulaire ;

ρ : La densité du bois ;

$\frac{\sigma_0}{E}$: Déformation instantanée ;

σ_0 : Contrainte initiale ;

t : le Temps ;

ε_0 : Déformation initiale ;

k : La rigidité ;

η : La viscosité ;

$\varepsilon_{||}, \varepsilon_{par}$: Déformation parallèle ;

ε_{per} : Déformation perpendiculaire ;

$\vec{u}$: Champ de déplacement ;

$\vec{\sigma}$: Champ de contrainte ;

r : Rayon de fissure ;

k : Coefficient de concentration de contrainte ;

K : Facteur d'intensité de contrainte ;

L_c : Profondeur de la fissure ;

σ_m : Contrainte en tête de la fissure ;

K_I : Facteur d'intensité de contrainte en mode I ;

G : Taux de restitution d'énergie ;

W_e : Représente l'énergie de déformation élastique ;

W_{ext} : L'énergie potentielle des forces extérieures ;

J : Contour d'intégration ;

Γ : Tout contour orienté entourant la pointe de fissure ;

T = σ n : Vecteur contrainte s'exerçant sur les facettes de normale **n**, **n** étant la normale extérieure à **Γ**.

U : Vecteur déplacement ;

$w = \int_0^\varepsilon \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$: Densité volumique d'énergie de déformation ;

S : Abscisse curviligne le long de **Γ** ;

Introduction

générale :

Introduction générale :

Le bois est un matériau composite, fait de polymères naturels, qui constituent la matière première renouvelable la plus importante en quantité. Sa recyclabilité et sa biodégradabilité font de lui un matériau d'intérêt. D'un point de vue environnemental, il présente aussi l'énorme avantage d'être capable de stocker le dioxyde de carbone de l'air, considéré comme l'un des principaux gaz à effet de serre. Son utilisation pour la fabrication des outils et des logements simples est décelable à l'aube de l'humanité. Le bois a en effet été le matériau le plus utilisé dans la construction d'habitats de nombreuses civilisations anciennes du fait de ses excellentes performances mécaniques et de ses spécificités. Il est résistant aux chocs, cintrable, léger, stable et durable tel que le témoigne la présence actuelle de temples asiatiques construits en bois et ayant résisté pendant plus de 13 siècles [1].

Les éléments de structure en bois comme les poutres entaillées et les assemblages sont généralement sujets à une fissuration de cinétique complexe due principalement aux modes de sollicitation et au caractère orthotrope du matériau. Ce qui fait le calcul d'une structure doit garantir aux éléments structuraux une résistance aux efforts auxquels ils sont exposés, et assurer que les déformations structurelles ne dépassent pas les limites définies par le type d'édifice. Pour qu'une structure soit considérée comme sûre, le comportement de ses assemblages doit correspondre aux hypothèses utilisées dans le calcul, car la distribution des efforts entre les éléments structuraux et la déformation globale de la structure sont influencées par le manque de rigidité au niveau des assemblages. C'est pour cette raison, plusieurs travaux ont été réalisés dans le domaine des assemblages, essayant de comprendre leur comportement en identifiant les facteurs qui les influent [2].

L'objectif principal de notre travail est d'étudier le comportement mécanique de trois essences de bois Algériens (le pin d'Alep, le chêne zen et l'eucalyptus) présentant des fissures. Tout en déterminant le taux de restitution de l'énergie (G), par une procédure expérimentale basée sur des essais de flexion trois points sur des éprouvettes entaillées.

Notre travail est structuré de la manière suivante :

- Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur le matériau bois ;
- Le deuxième chapitre présente une étude théorique sur la mécanique de la rupture ;
- Le troisième chapitre présente la partie expérimentale, complétée par un calcul numérique ;
- Et enfin une conclusion avec différentes propositions.
- Et en fin une conclusion et des perspectives.

Chapitre I :
Généralités sur
le matériau bois

I. Introduction au matériau bois



Le bois est une structure biologique complexe contenant des substances chimiques et des cellules exerçant différentes fonctions permettant la vie de la plante par la condition de la sève des racines aux feuilles. Le soutien mécanique de la plante a conduit, au cours de l'évolution, au développement de plus de 20 000 espèces de plantes produisant du bois (Rowell 2005), chacune ayant des propriétés et par conséquent des utilisations et des capacités différentes. La compréhension des propriétés de ces essences conduit à une application bien définie. De même la connaissance de l'anatomie du bois permet d'expliquer et de comprendre les propriétés physiques du bois et doit être couplée à la connaissance de sa chimie.

Le bois a de tous temps accompagné la vie de l'homme, contribué à son développement et amélioré ses conditions de vie. Les arbres pluriséculaires des forêts nous inspirent l'émerveillement et le respect. Ces mêmes sentiments sont présents à l'esprit de l'homme qui façonne, travaille ou utilise le bois [1].

Tableau I.1 : Les six premiers pays forestiers dans le monde.

Rang	Pays	Superficie forestière en millions d'hectares	Taux de boisement	Production bois en million m ³ /an
1	Fédération de Russie	851,3	50,4 %	19,8
2	Canada	532,4	63 %	57
3	Etats-Unis d'Amérique	225,5	24,7 %	65,5
4	Chine	159,0	17,1 %	33,6
5	Congo	132,5	59,6 %	6-10
6	Indonésie	100,4	55,4 %	78

Source : Situation des forêts du monde 2005, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture(FAO).

Tableau I.2 : Les sept premiers pays forestiers de l'Union européenne.

Rang	Pays	Superficie forestière en millions d'hectares	Production bois en million m ³ /an
1	Suède	27,1	17,8
2	Finlande	21,9	12,1
3	France	15,3	13,5
4	Espagne	14,4	1,5
5	Allemagne	10,7	23,2
6	Italie	10,0	4,7
7	Pologne	9,0	7

Source : Situation des forêts du monde 2005, Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture(FAO).

I.1. Bois – Généralités

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 ligneuses, de parenchyme et de vaisseaux.

Pour compléter cette définition, la norme **NF B 50-003** définit le bois comme un "ensemble de tissus résistants secondaires (de soutien, de conduction, et de mise en réserve) qui forment les troncs, branches et racines des plantes ligneuses. Issu du fonctionnement du cambium périphérique, il est situé entre celui-ci et la moelle. Ne s'applique pas aux monocotylédones (bambous, palmiers, rotins)".

Le bois des Gymnospermes (résineux) présente une structure moins complexe que celui des Angiospermes (feuillus).

I.1.2. La formation du bois et de l'écorce

La figure (I.1) représente l'élongation et la croissance en diamètre du tronc et des racines, ainsi que des branches correspondent à deux organisations différentes. La première qu'on appelle « croissance primaire » est assurée par le fonctionnement de méristèmes primaires (ou méristèmes apicaux) situées à la tête ou au sommet du tronc, des branches et des racines. La seconde est issue des tissus appelés « assise génératrice » libéro-ligneuse qui se trouvent entre le bois et l'écorce ; celle-ci produit des cellules de méristèmes secondaires. Cette zone est désignée par la zone cambiale [2].

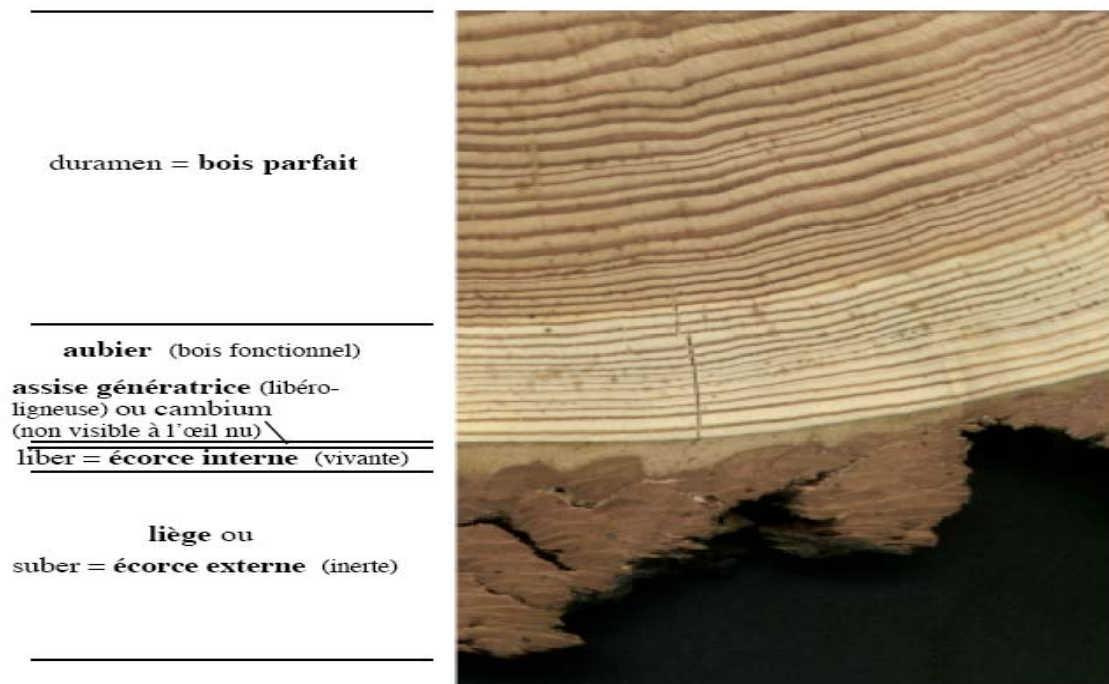


Fig I.1 : Photo d'une partie du bois et de l'écorce dans une coupe transversale d'un tronc de feuillu.

La division de cellule méristème produit de nouvelles cellules de bois ou d'écorce. Cette division qui augmente le diamètre du tronc, des branches et des racines, est appelée « croissance secondaire ». Les croissances macroscopiques primaire et secondaire d'un arbre peuvent être schématisées par la superposition des couches en forme de cône, où chaque couche représente le bois formé en un an. Un tel schéma est présenté en figure ci face, où l'on peut voir la formation du bois pendant six années consécutives.

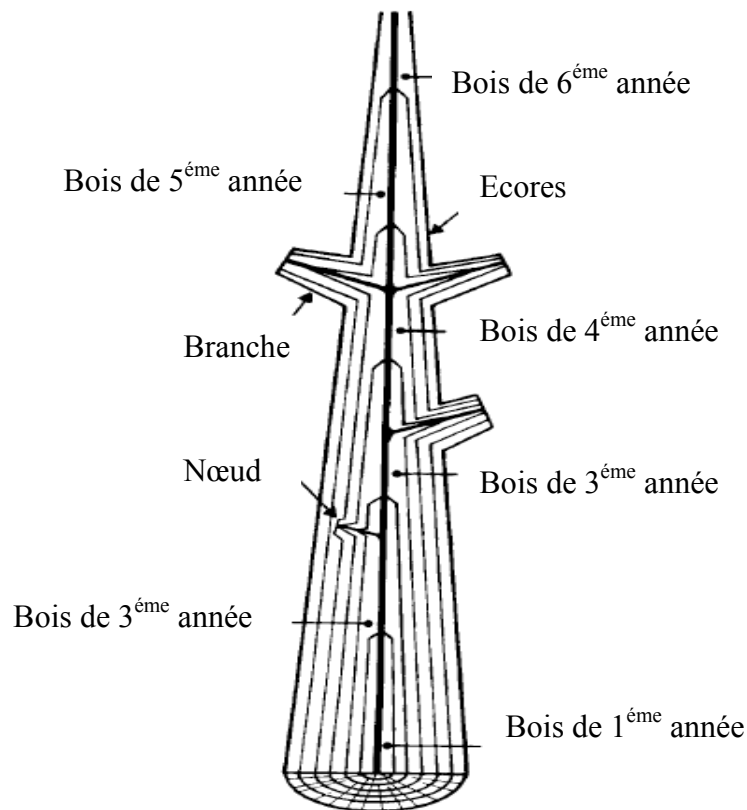


Fig I.2 : Représentation schématique de la croissance primaire et secondaire d'un arbre par la superposition successive des couches en forme de cône.

Le sommet de chaque cône représente l'emplacement du méristème apical à la fin de la saison de croissance.

Le bois est constitué de deux types de cellules : de cellules longitudinales orientées dans la direction longitudinale de la tige, des branches, des racines et de cellules radiales orientées dans la direction transversale. L'assise génératrice (ou assise cambiale) est aussi constituée de deux types de cellules initiales: de cellules initiales fusiformes (fuseau) et de cellules initiales isodiamétriques (cylindriques). Les premières donnent naissance aux cellules longitudinales du liber et du bois. Leur longueur initiale varie entre 2 et 9 mm chez les résineux et leur largeur est de l'ordre de 30 μm . Chez les feuillus, cette longueur est plus faible et varie entre 2 et 3 mm. Les cellules initiales isodiamétriques sont à l'origine de la naissance des cellules radiales (rayons ligneux et des rayons libériens), comme l'illustre la figure (I.3) [3].

Les dimensions de ces cellules initiales sont très variables suivant les espèces. Les différentes phases de développement des cellules de bois ou des cellules du liber sont les suivantes : l'assise cambiale, qui est constituée de cellules initiales, se divise indéfiniment pour former des cellules mères (cellules méristèmes cambiales). Ces cellules sont capables de se diviser un certain nombre de fois. Une cellule de méristème se divise en deux cellules ; une nouvelle cellule de méristème et une autre cellule qui se différencie en divers type de cellules

libériennes ou ligneuses. La formation de cellules filles et leur conséquence aboutissent à l'augmentation de la distance de la zone cambiale du centre de l'arbre [3].

I.1.3. Quelques caractéristiques chimiques et physiques du bois

Chimiquement, le bois se compose presque toujours de 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% d'éléments divers.

Parmi ces principaux constituants organiques, nous pouvons citer la cellulose (environ 50%) et la lignine (environ 20%).

Le bois est un matériau anisotrope : ses propriétés varient selon la direction considérée (parallèle au fil du bois, perpendiculaire,...).

I.1.4. Composition et caractéristiques principales

Le bois est une matière ligneuse élaborée par un organisme vivant au milieu d'un écosystème. L'environnement température ambiante, la pollution atmosphérique... interviennent directement sur la croissance.

L'épaisseur de l'aubier et des cernes annuels d'accroissement, la densité, le grain, la rétractabilité... marqueront définitivement cette croissance et révéleront en grande partie les qualités propres du bois.

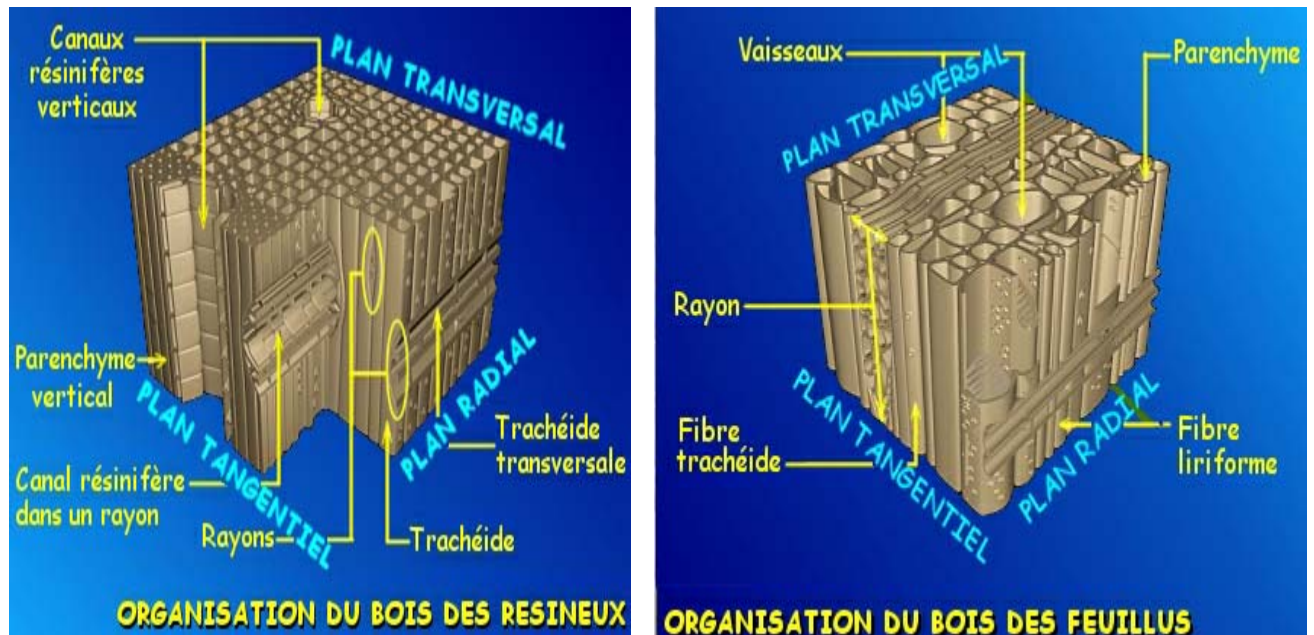


Fig I.3 : Organisation du bois résineux et feuillus.

Le bois est hétérogène, car les cellules qui le composent sont de nature et de forme différente sa densité est irrégulièrement répartie, et des singularités de croissance différencient la croissance de chaque pièce.

Anisotrope, le bois possède une structure cellulaire qui est orientée. Cet agencement cellulaire apparaît différemment selon les trois plans d'observation (transversal ou "bois de bout", radial ou tangentiel).

De même, les caractéristiques physiques et mécaniques du bois varient selon ces directions. La direction axiale ou longitudinale est celle qui est parallèle à l'axe de l'arbre. La direction radiale est celle qui passe par un rayon de l'arbre perpendiculairement aux cernes d'accroissement. La section obtenue correspond au sciage "sur quartier". La direction tangentielle est celle qui est tangente aux cernes d'accroissement à une distance variable de l'axe. Sa section correspond au sciage "sur dosse".

Hygroscopique, car le bois est susceptible de perdre ou de reprendre de l'humidité en fonction de la température et surtout de l'humidité relative de l'air ambiant.

Les caractéristiques du bois restent celles d'un matériau naturel, variables d'une essence à l'autre, ainsi qu'à l'intérieur d'une même essence, voire d'un même arbre.

Le bois issu d'arbres, qui sont constituer de :

Ecorce, cambium, aubier et du duramen.

La figure (I.4), montre les couches successives de vaisseaux qui se forment sous le cambium constituent l'aubier qui correspond au bois physiologiquement actif. Ces vaisseaux cessent peu à peu d'alimenter l'arbre après quelques années. Ils se bouchent et s'imprègnent de différentes substances : tanins, résines...

Cette transformation progressive en bois parfait, ou duramen, est appelée duraminisation [3].

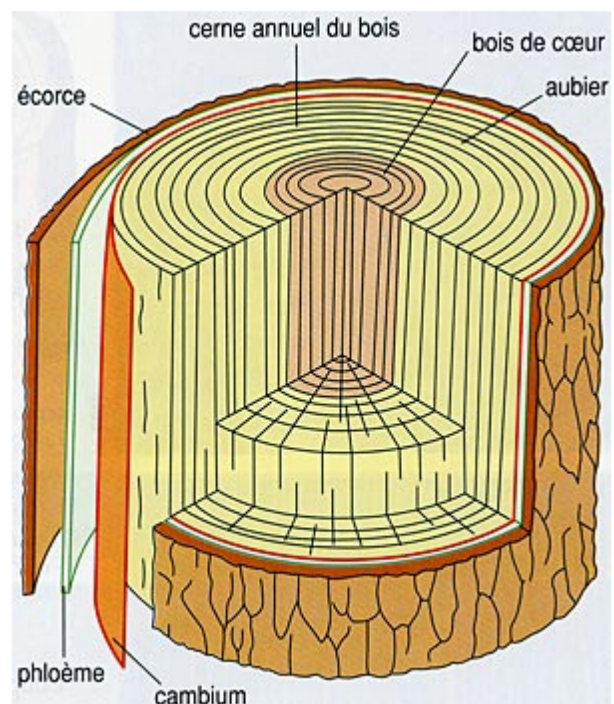


Fig I.4 : Coupe dans un tronc d'arbre.

Chez certaines essences (chêne, châtaignier, pins, douglas, mélèze...) à bois parfait distinct, l'aubier est en général plus clair que le duramen (improprement appelé "bois de cœur"), on dit alors qu'il est différencié. Il est plus ou moins imprégnable et ne résiste jamais aux champignons lignivores et aux larves xylophages. Le duramen (ou bois parfait), au contraire, possède une durabilité naturelle qui varie selon les essences ; il est, en général, peu ou pas imprégnable.

Pour d'autres essences (sapin, épicéa, peuplier, érable...), il n'y a pas de différence de coloration entre le centre et l'extérieur de la grume, et l'aubier ne se distingue pas visuellement du duramen. Sur ces essences à aubier non différencié, les différences de porosité, qui cependant se manifestent entre aubier et bois parfait, génèrent des facultés d'absorption distinctes.

L'aubier, plus poreux, offre une capacité d'absorption plus élevée que celle du duramen.

I.1.5. Densité et dureté

Les parois cellulaires sont plus ou moins épaisses, et les lumens de plus ou moins gros diamètre, selon les essences et leur vitesse de croissance. Les résineux à croissance rapide ont des cernes d'accroissement plus larges et forment un bois plus léger, par rapport aux mêmes essences à croissance lente. A l'opposé, les feuillus à croissance rapide ont des cernes d'accroissement plus larges et un bois plus dense par rapport aux mêmes essences à croissance lente.

La masse volumique (ou densité) des bois est donc très variable selon les espèces (de 350 à 1100 kg/m³) et à l'intérieur d'une même espèce (avec des variations maximales de plus ou moins (15%).

En tant que matériau hygroscopique, l'eau liée que le bois contient s'ajoute à la masse de la matière ligneuse. Sa masse volumique varie donc avec son humidité. Pour la densité, et en règle générale pour l'ensemble des caractéristiques physico-mécaniques, l'humidité de référence est de 12 %.

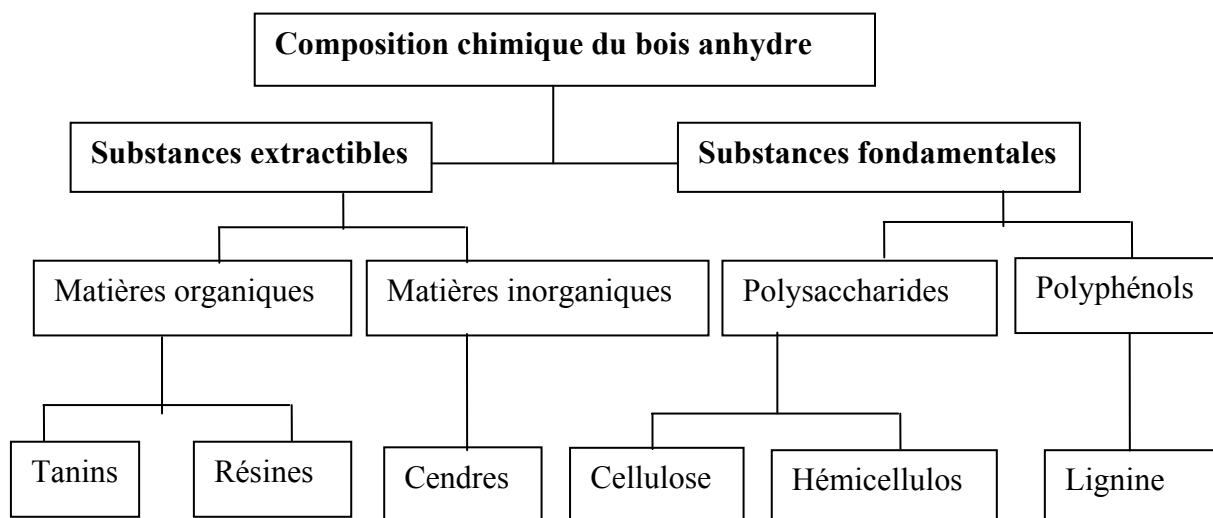
Une corrélation étroite existe entre la masse volumique et la dureté (tableau) : les bois les plus denses sont les plus durs et les bois les plus légers sont les plus tendres. L'échelle de dureté des bois est exprimée en indice Chalais-Meudon (selon la norme NF B 51-013). C'est le principal critère technique de sélection d'une essence en parquet et en escalier.

Tableau I.3 : Classification des essences selon la densité et la dureté.

Classe de densité	Densité (g/cm ³)	Duret (échelle de mohs)	Essences
Bois très lourd et très durs	0.85	9	Azobé, ipé
Bois lourds et durs	0.70 - 0.85	5 - 9	Charme, movingui, chêne dur
Bois mi-lourds et mi-durs	0.56 - 0.70	2.5 – 5	Niangon, iroko, châtaigner, chêne tendre, pins
Bois légers et très tendres	0.45 - 0.55	1.25 – 2.5	Framiré, douglas, épicéa, sapin, pins.
Bois très légers et très tendres	0.45	1.25	Western red cedar, séquoia, peuplier

I.1.6. Constituants chimiques du bois

Les principaux éléments chimiques du bois sont constitués de carbone (50% massique), d'hydrogène (6%), d'oxygène (45%), d'azote (0.1 à 1 %) et certains minéraux constituant les cendres (calcium, potassium, magnésium).

**Fig I.5 :** Organigramme montrant la composition chimique du bois anhydre[3].

Les principaux composants chimiques du bois sont la cellulose, l'hémicellulose et la lignine. Il existe en plus d'autres composants nommés les extractifs. Ces extractifs sont déposés dans la paroi de la cellule pendant la formation du bois parfait par la sécrétion. Le tableau suivant donne le pourcentage volumique de chaque composant chimique, leur nature polymérique, leur degré de polymérisation et leur fonction.

Tableau I.4 : Composition et nature des éléments de base du bois.

	Composition %	Nature polymérique	Degré de polymérisation	Monomère de base	Fonctionnement
Cellulose	45 – 50	Molécule Linéaire Semi-cristalline	5000 – 10 000	Glucose	Fibre
Hémicellulose	20 – 25	Molécule ramifiée amorphe	150 – 200	Sucre essentiellement non glucosé	Matrice
Lignine	20 – 30	Réticulé tridimensionnel amorphe	-	Phénolpropane	Matrice
Extractif	0 – 10	Molécule polymérique	-	Polyphénole	Elément de protection

I.1.7. Ultra-structure de la paroi cellulaire

Le bois est un matériau fibreux. Plus de 90 % du volume des bois résineux sont formés de fibres. Les fibres (cellules longitudinales) sont liées les unes aux autres ainsi qu'aux autres éléments constituant du bois.

Les parois des cellules possèdent essentiellement une couche intercellulaire, une paroi primaire et une paroi secondaire. La figure (I.6) ci-dessous montre une représentation schématique d'un segment d'une cellule longitudinale entourée de 6 autres cellules. On voit que la paroi secondaire est représentée par 3 couches [3].

s1: Couche 1 de la paroi secondaire
s2: Couche 2 de la paroi secondaire
s3: Couche 3 de la paroi secondaire

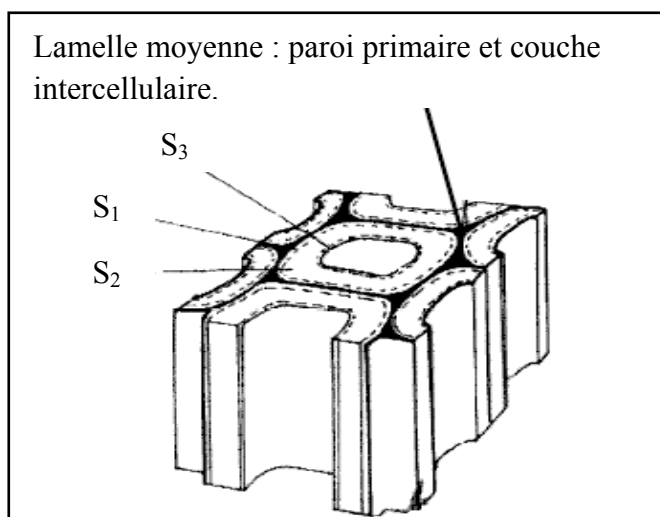


Fig I.6 : Représentation schématique d'une cellule longitudinale (trachéide) entourée de 6 autres cellules.

A l'heure actuelle, à l'aide d'un microscope polarisé, de rayons x ou d'autres moyens microscopiques optiques et électroniques, on peut détecter aisément ces différentes couches dans la paroi cellulaire. Basé sur les données de ces moyens d'observation et de l'évidence physico-chimique sur les différentes couches de la paroi d'une cellule, des schémas de l'ultra-structure d'une paroi d'une cellule est représenté aux les figures (I.7) et (I.8) ci-dessous. On constate que la paroi de la cellule est multicouche et chaque couche est un milieu composite constitué de filaments (microfibrilles de cellulose) très minces renforcés par une matrice de lignine et d'hémicellulose. Puisque le comportement mécanique et physique d'une paroi de cellule est le résultat de ses constituants chimiques et leur arrangement structurel, il est utile de donner un bref aperçu sur les constituants chimiques de la paroi avant de développer les différents aspects de son ultra-structure.

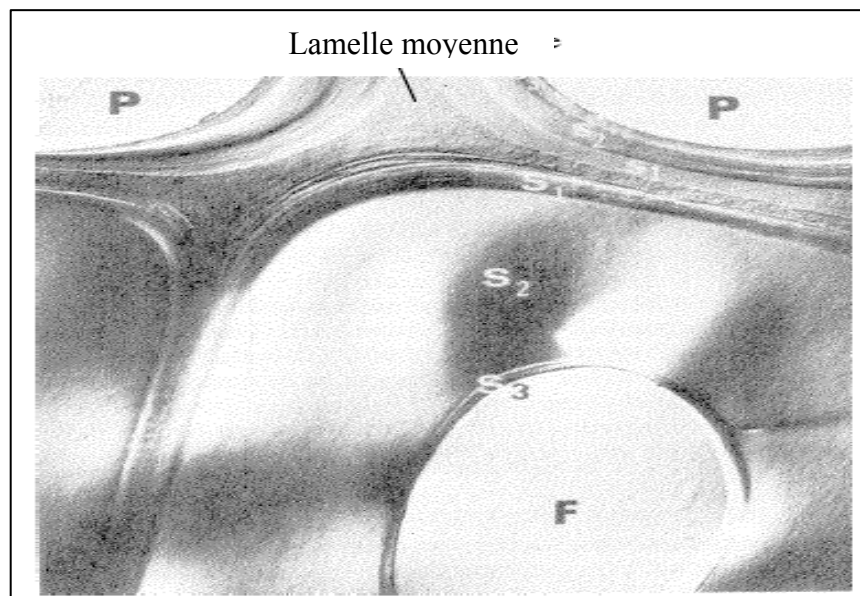


Fig I.7 : Les différentes couches de fibres (F) et cellules de parenchyme (P) sont mis en évidence au moyen d'un microscope polarisé -Thomas (1991).

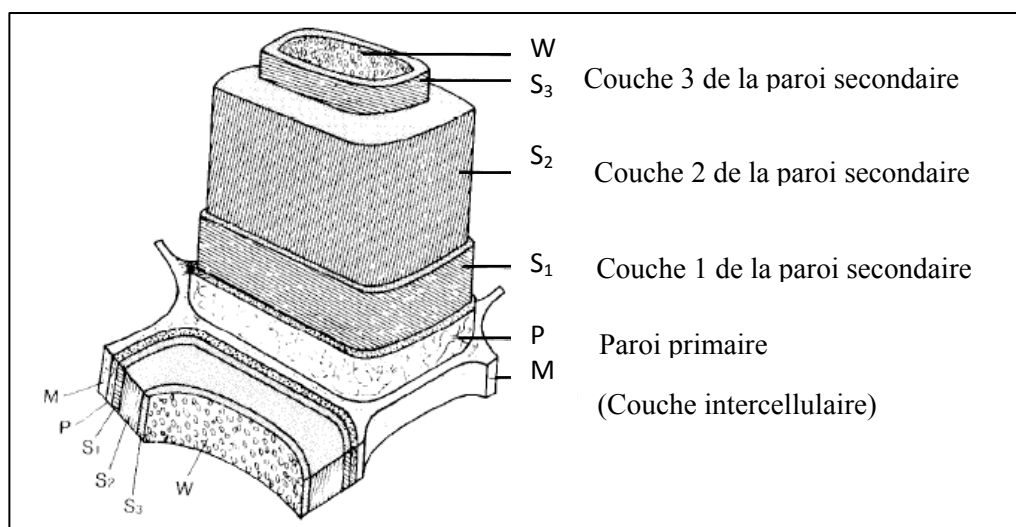


Fig I.8 : Représentation schématique des différentes couches constituant la paroi cellulaire.

I.1.8. Classification des bois

Les bois peuvent être classés selon la norme NF B 51-002 comme suit :

Tableaux I.5 : Classification des bois, a - selon la masse volumique, b - selon la dureté, c - selon le point de saturation des fibres [4].

Calasse de masse volumique	
$MV < 500 \text{ kg/m}^3$	Bois très léger
$500 \text{ kg/m}^3 < MV < 650 \text{ kg/m}^3$	Bois léger
$650 \text{ kg/m}^3 < MV < 800 \text{ kg/m}^3$	Bois mi-lourd
$800 \text{ kg/m}^3 < MV < 950 \text{ kg/m}^3$	Bois lourd
$MV > 900 \text{ kg/m}^3$	Bois très lourd

(a)

Calasse de dureté	
$D < 1,5$	Bois très tendre
$1,5 < D < 3$	Bois tendre
$3 < D < 6$	Bois mi-dur
$6 < D < 9$	Bois dur
$D > 9$	Bois très dur

(b)

Calasse de point de saturation des fibres	
$PSF < 25\%$	PSF faible
$25\% < PSF < 35\%$	PSF moyen
$PSF > 35\%$	PSF élevé

(c)

I.1.9. Motivation d'utilisation du bois

Un peu délaissé depuis plusieurs décennies, au profit de matériaux comme le béton, le plastique, le PVC, le métal ou l'acier, le bois revient en force et redevient incontestablement à la mode. Il est utilisé dans la construction (charpente, ossature, mur), dans l'aménagement intérieur (parquet, poutre, escalier) et extérieur (bardage, terrasse, clôture) ou dans l'ameublement, et ce en dépit de quelques préjugés dont il souffre : entretien contraignant, attaques d'insectes, instabilité face au climat et au feu... Alors pourquoi ce nouvel essor ?

I.1.9.1. Bois, un matériau naturel et écologique

Le bois est un des rares matériaux 100 % naturel. En effet, c'est une matière ligneuse et compacte qui compose les branches, le tronc et les racines des arbres et des arbrisseaux. Ses principaux composants chimiques sont le carbone, l'oxygène et l'hydrogène. C'est également

une matière organique principalement constituée de cellulose et de lignine renfermant un faible pourcentage d'éléments minéraux et d'une part d'humidité variable.

Le bois est aussi écologique car son utilisation permet de limiter les émissions de gaz à effet de serre et, de ce fait, de lutter efficacement contre le changement climatique.

Le bois "puits de carbone" : La production d'une tonne de bois absorbe 1,5 tonne de gaz carbonique et rejette 1,1 tonne d'oxygène dans l'atmosphère. Chaque année, près de 100 millions de tonnes de carbone sont ainsi absorbées par les forêts européennes.

Pendant sa croissance, le jeune arbre absorbe du carbone, avec lequel il fabrique les cellules bois et rejette de l'oxygène dans l'atmosphère. Le bois est un véritable **"puits de carbone"**. A la maturité de l'arbre, ce processus ralentit d'où la nécessité de replanter de jeunes arbres pour conserver cet équilibre. Enfin, le bois valorisé sous forme de meubles, parquets ou bâtiments est un stock de carbone !

A la différence d'autres produits comme le ciment, le plastique ou l'acier, le bois est un matériau qui nécessite très peu d'énergie pour sa mise en œuvre (production et fabrication). Le bois est également 100 % recyclable et biodégradable et sa durée de vie est supérieure à celle des autres matériaux.

I.1.9.2. Bois, un matériau renouvelable

Le bois est le seul matériau issu d'une ressource naturelle renouvelable : la forêt. Contrairement aux idées reçues, l'exploitation du bois n'est pas néfaste à la forêt, bien au contraire ! La récolte du bois favorise le renouvellement régulier des forêts, à conditions qu'elles soient gérées durablement comme en France et les autres pays d'Europe : on prélève et on replante. Annuellement, les forestiers ne replantent pas moins de 80 millions d'arbres pour assurer une gestion durable des forêts françaises. Ainsi, le bois devient une ressource inépuisable et de proximité.

I.1.9.3. Bois, un matériau robuste et durable

Le bois est un matériau durable et résistant quand il est utilisé dans de bonnes conditions. Ses qualités structurelles ne sont plus à prouver, comme le témoignent les centres historiques de certaines grandes villes où l'on admire encore les constructions en colombages du XII^e siècle. De nombreux meubles prestigieux ont traversé plusieurs siècles et font encore la fierté de leurs propriétaires !

La résistance du bois est très élevée : il faudrait une charge de 10 tonnes pour écraser un cube en chêne de cinq centimètres de côté.

Le bois d'ameublement ;



Les panneaux en bois ;



Le bois de construction.



Fig I.9 : Les utilisations du bois.

I.1.10. Place du bois dans le marché Algérien

L'Algérie importe chaque année plus de 300 millions de Dollars de bois. Les enjeux économiques et financiers liés à l'industrie du bois sont très importants et expliquent l'intérêt pour les entreprises françaises de se positionner sur ce marché qui absorbe entre 300 et 320 millions de dollars d'importation de bois et réalise un chiffre d'affaires d'environ 12 milliards de dinars (12 millions d'euros). Une part importante des importations de bois tendre (résineux) provient des pays nordiques (Finlande ou Suède) ou de Russie. Le chêne et le hêtre sont importés d'Europe, les bois tropicaux d'Afrique et d'Asie. Pourtant les exportations françaises de bois à destination de l'Algérie ont diminué de 29% en 2003. La France n'est aujourd'hui que le 7ème pays fournisseur de l'Algérie (moins de 5% de parts de marché) alors que les exportations françaises vers l'Algérie, tous secteurs confondus ont fait un bond de 60% depuis l'an 2000. Ce qui porte les parts de marché globales de la France en Algérie à 25%. Pour ce qui est de la production locale, il faut noter qu'elle ne peut satisfaire que 15% de la demande

nationale estimée à 1,5 millions de mètres cube par an, les importations sont appelées donc à augmenter crescendo au gré des programmes de construction de logements et des besoins locaux en meubles. Les chantiers d'habitats accaparent, à eux seuls, plus de 70% des importations de bois. Ce taux déjà fortement élevé le sera encore davantage durant les prochaines années en raison du programme de réalisation de 800.000 logements qui sera prochainement lancé. Le gaspillage ayant souvent caractérisé l'utilisation du bois de coffrage sur les chantiers de BTP, les pouvoirs publics avaient entrepris divers actions visant à sensibiliser les constructeurs sur les bienfaits de l'emploi des coffrages et étaux métalliques qui offrent des durées d'amortissement beaucoup plus longues que le bois. Ces recommandations n'ont malheureusement que très peu d'échos, sans doute en raison du mode de construction pratiqué par les entreprises algériennes de bâtiment, mais aussi des difficultés qu'éprouvent celles qui souhaitent innover et acquérir les équipements de coffrage métalliques requis. Il découle de ce fait que le bois demeurera longtemps encore un des matériaux de construction les plus demandés pour l'industrie du logement en Algérie. L'affirmation est d'autant plus vraie que le logement sous forme de chalets ou de maisonnettes en bois fait une entrée massive dans la production d'habitat. Une vingtaine de milliers a été livrée uniquement dans le cadre de la reconstruction après le séisme qui a touché l'Est d'Alger le 21 mai 2003. Les facteurs de la croissance démographique et de la pénurie de logement font de l'Algérie un pays à fort potentiel de développement dans le secteur du bois. En plus de cette demande de matière première, il convient de préciser que la demande concerne également toutes les machines et matériels pour la 1ère et la 2ème transformation du bois.

I.1.11. Défauts du bois

I.1.11.1. Introduction

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 [7].

Citons parmi ces derniers, la fissuration en surface lors du séchage trop rapide. Dans ce cas, l'intérieur de la pièce de bois est encore humide et soumis à des contraintes de traction qui favorisent l'apparition des fissures externes. Ensuite, la distribution des contraintes induites par le séchage, ne sont pas suffisamment importants pour provoquer la fissuration, un violement 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. 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, préjudiciable à l'aspect esthétique et aux caractéristiques mécaniques du matériau sont pris en compte pour 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 dans ce qui suit. La présence d'un défaut décline la qualité du bois tout en diminuant le prix du bois et imposant une diminution de la contrainte admissible. Ce fait avait été d'ailleurs reconnu en 1770 par **Buffon**, qui disait : « Et j'ai reconnu par là combien les nœuds ôtent de la force au bois, ce qu'est beaucoup au-delà de ce qu'on pouvait imaginer : un nœud qui se trouve sur une cheville qu'on mettra à la face inférieure et surtout à l'une des arrêtes, diminue quelquefois d'un quart la force de la pièce »

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.

I.1.11.2. Nœuds et les fentes

I.1.11.2.1. Nœuds : Les nœuds, présentés dans la figure (I.10), constituent des éléments de la racine des branches inclus dans le tronc, selon que la branche était vivante, morte ou dans un état intermédiaire lors du débit de l'arbre. Le nœud complètement adhérent et dans ce cas, il y'a continuité de la matière du nœud avec le bois du tronc environnant. Le nœud peut être partiellement ou non adhérent et peut alors se séparer du bois environnants [2]. La classification de nœuds peut aussi se faire selon d'autres critères tels que : la forme (rond, ovale, tec...) la disposition (isolé, double, traversant, ou non), l'état du bois environnant (sain, vicieux, résineux, fendu, éclaté, etc), la couleur et bien sûr les dimensions. Les fibres de bois subissent des déviations plus ou moins importantes au voisinage d'un nœud. Ces déviations ont des conséquences néfastes sur les caractéristiques mécaniques du bois aux alentours. Cette zone doit être prise en compte pour évaluer la taille effective du défaut.

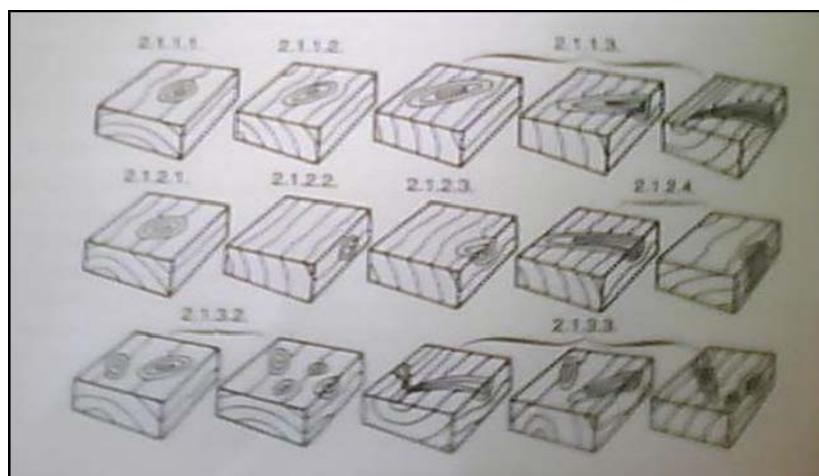


Fig I.10 : Les principales variétés de nœuds.

I.1.11.2.2. Irrégularités dans la structure des nœuds

Les fibres du bois peuvent présenter des déviations (inclinaison du fil), des ondulations (madrure et ronce). Les dispositions irrégulières conduisent fréquemment à des grumes présentant des défauts de linéarité et par ce fait quasiment inutilisables pour la confection de longue pièces.

Des excroissances, figure (I.11), peuvent apparaître lorsque la croissance de l'arbre n'est pas verticale. Ces excroissances sont dirigées vers la concavité du fléchissement pour les conifères : on dit alors que l'on a affaire à du bois de compression que l'on trouve principalement à la partie basse du tronc et des branches.

Pour le bois dur, l'excroissance est dirigée vers la convexité, c'est alors du bois de traction.

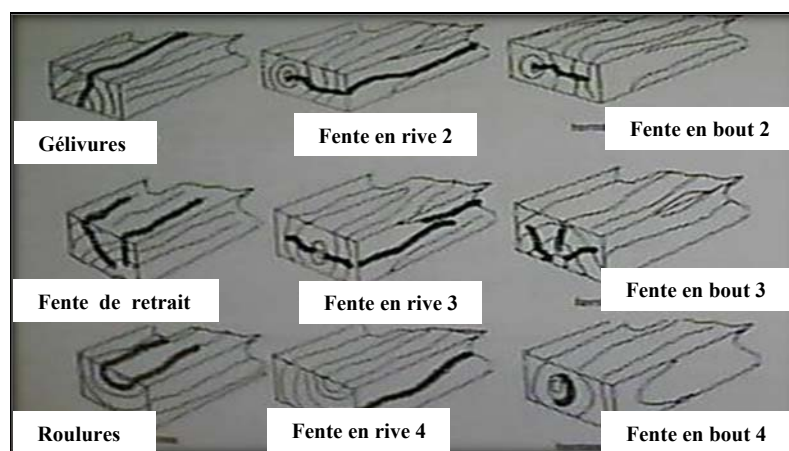


Fig I.11 : Principaux types de fentes.

I.1.11.2.3. Fentes ou gerces

Les fentes ou gerces résultent de la séparation des fibres. Elles sont classées suivant trois critères :

- Le type (de cœur, de retrait, de roulures, gélivures et cadranures) ;
- La position dans la pièce (de face, de rive, en haut) ;
- Suivant la profondeur des pénétrations (superficielles, profondes, traversantes).

Les grosses fentes internes sont appelées cavités de retrait.

I.1.12. Autres défauts naturels

Parmi les nombreux défauts naturels divers citons :

L'entre écorce qui constitue une partie d'écorce incluse entièrement ou en partie dans la masse de bois ; ce défaut peut être superficiel ou traversant [7].

Le faux cœur est une coloration anormale sombre de la partie centrale du bois normal. Cette coloration présente une teinte, une intensité et une uniformité variable. Ce défaut apparaît dans l'arbre sur pied d'espèces ayant une uniformité irrégulière (bouleau, hêtre,...). Il n'affecte pas les caractéristiques mécaniques du bois [7].

Les taches ou veines sont des colorations locales de l'aubier dont la teinte est proche de celle du cœur, elles n'affectent non plus les caractéristiques mécaniques du bois [7].

Les lunures sont constituées de couches annuelles situées dans la zone du duramen et dont la coloration et les propriétés sont voisines de l'aubier. Des colorations de surface brun rougeâtre ou brun bleuâtres de 2 à 5 mm de profondeur peuvent apparaître lors de l'oxydation du tanin dans le bois [7].

Des cavités à l'intérieur des couches annuelles et remplies de résines sont appelées **poches**. C'est bien sûr un défaut spécifique des résineux [7].

Le broussin ou brogne est une excroissance du tronc, de forme irrégulière, à surface hérissée d'aspérités coniques et formée de bois à éléments irrégulièrement enchevêtrés d'axes [7].

La loupe est une excroissance du troc de forme globuleuse à surface lisse et formée de bois madré [7].

Chapitre II :
Mécanique de
la rupture

II.1. Propriétés mécaniques du bois

Les propriétés mécaniques du bois caractérisent la rigidité et la résistance du bois face aux forces qui tendent à le déformer. En effet, le bois est un solide déformable qui réagit à l'application des charges en se déformant sous leurs effets.

II.1.1. Élasticité

L'élasticité est la propriété qu'ont certains matériaux comme le bois de reprendre leur forme ou leurs dimensions initiales lorsque la charge causant la déformation est enlevée. Ceci a lieu lorsque qu'on est en dessous de la limite proportionnelle ou élastique. Autrement, une partie de la déformation sera permanente, même après enlèvement de la charge. La limite proportionnelle est un paramètre indispensable pour distinguer le comportement élastique du comportement plastique. La courbe contrainte-déformation permet de définir le module d'élasticité E ou module d'Young. Celui-ci n'est valable que jusqu'à la limite proportionnelle comme l'illustre la figure (II.1) dans les travaux [7].

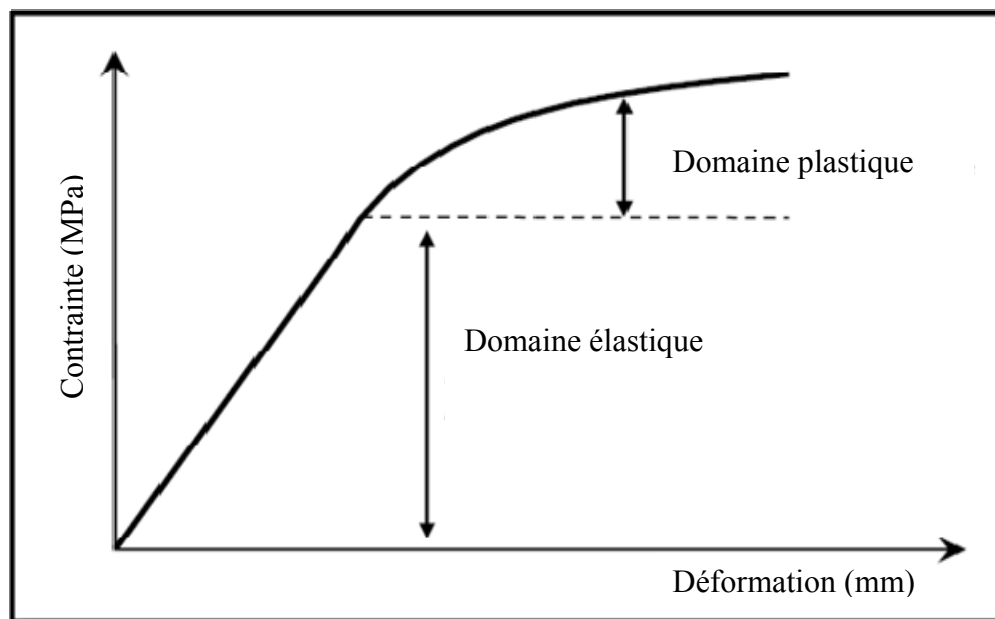


Fig II.1 : Courbe contrainte-déformation du matériau bois.

La contrainte de rupture est l'effort maximal que peut supporter une pièce. Lorsqu'un corps est soumis à des contraintes de cisaillement, on utilise le module de coulomb G pour caractériser sa résistance au cisaillement. Étant donné que tous matériaux homogènes soumis à une sollicitation présentent des déformations passives dans les directions perpendiculaires à l'application de l'effort, le coefficient de Poisson ν est utilisé.

La loi de Hooke est une relation linéaire ($\epsilon = \sigma / E$) reliant la déformation à la contrainte pour la modélisation du comportement d'un solide élastique parfait. Étant donné l'anisotropie du bois, la loi de Hooke généralisée est couramment utilisée, faisant apparaître un tenseur d'ordre 4, appelé tenseur des complaisances élastiques (Kollmann et Côté 1968, Guitard 1987) [7].

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_R \\ \varepsilon_T \\ \varepsilon_L \\ \gamma_{TL} \\ \gamma_{RL} \\ \gamma_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_R & -\nu_{RT}/E_T & -\nu_{RL}/E_L & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{TR}/E_R & 1/E_T & -\nu_{TL}/E_L & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{RL}/E_R & -\nu_{LT}/E_T & 1/E_L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_{TL} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{RL} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_{RT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_L \\ \tau_{TL} \\ \tau_{RL} \\ \tau_{RT} \end{bmatrix}$$

Où

$\varepsilon_R, \varepsilon_T, \varepsilon_L$: les déformations axiales suivant les directions R, T et L

$\sigma_R, \sigma_T, \sigma_L$: les contraintes normales suivant les directions R, T et L

$\gamma_{TL}, \gamma_{RL}, \gamma_{RT}$: les déformations angulaires par rapport à R, T et L

$\tau_{TL}, \tau_{RL}, \tau_{RT}$: les contraintes de cisaillement dans les plans TL, RL ou RT

Les valeurs des propriétés mécaniques impliquées dans l'équation (1) pour les bois résineux et les bois feuillus séchés au voisinage de l'humidité de 12% et à l'état vert sont fournies dans différentes références (Hearmon 1948; Kollmann et Côté 1968; Bodig et Jayne 1982; Mudry 1986). Parmi ces références, Bodig et Jayne (1982) présentent une excellente synthèse des propriétés mécaniques pour différentes espèces.

Les propriétés élastiques du bois sont sensibles à la variation de son état physique. Parmi les influences physiques, les paramètres principaux sont la densité, la teneur en humidité et la température. Lors du séchage du bois, l'influence de la température et de la teneur en humidité sur le comportement mécanique du bois est très marquée. La complexité du comportement du bois est multipliée par les variations de ses propriétés mécaniques avec la température et la teneur en humidité et l'interaction entre elles. Beaucoup de travaux ont été effectués sur cet aspect (Thunell 1941, Sulzberger 1953, Byvshykh 1960, Kollmann et Côté 1968, Bodig et Goodman 1973, Gerhards 1982, Bazant 1985, Koponen et al. 1991) [7].

II-1-2 : Influence de la densité :

L'influence de la densité sur les propriétés mécaniques du bois a été observée depuis longtemps. Ylinen (1942) et Bodig et Jayne (1982) ont mis en évidence que les modules de Young, les coefficients de Poisson et les coefficients de Coulomb sont fortement dépendants de la densité du bois. Bodig et Jayne (1982) relient les propriétés mécaniques impliquées dans l'équation (1) à la densité du bois par la formule suivante (2):

$$Y = AD^b \dots \dots \dots (2)$$

Où Y sont les propriétés élastiques, D est la densité du bois, a et b sont des constantes données dans des tables pour chaque espèce de bois.

Des études sur l'effet de la densité sur la limite d'élasticité ont été effectuées par Ylinen (1942) et il a été observé que la limite d'élasticité augmente proportionnellement avec la

densité et que la relation entre ces deux paramètres peut être représentée par une fonction linéaire [8].

II.1.3. Effet de la de la température et de la teneur en humidité

La résistance du bois est affectée par la teneur en humidité au-dessous du PSF et la température. La température est un paramètre physique très important qui conditionne le comportement mécanique du bois. Thunell (1941) a publié une courbe (figure II.2) [8], montrant la diminution du module d'élasticité en fonction de l'augmentation de la température entre - 20°C et 50°C. L'étude la plus détaillée de cette période est celle de Sulzberger (1953). Les résultats obtenus montrent que de façon générale, les modules E de plusieurs espèces diminuent lorsque la température augmente. L'auteur y proposait de représenter la relation entre la température et le module d'élasticité comme suit :

$$E_2 = E_1 [1 - \alpha (T_2 - T_1)] \dots \dots \dots (3)$$

Où E_1 et E_2 sont les modules correspondant aux températures T_1 et T_2 et α le coefficient de dilatation thermique.

Hearmon (1948) remarquait qu'il est juste de présumer un lien linéaire entre le module d'élasticité et la différence de température tel que présenté à l'équation (1.3). Sano (1961) a observé la même tendance suite à des essais expérimentaux sur différentes espèces de bois et a utilisé l'équation (3) pour toutes les composantes de la matrice de complaisance. Le travail expérimental de Hisada (1981) traitant de l'influence de la température sur les propriétés mécaniques conclut à une relation linéaire de la forme de l'équation (3).

La même tendance a été rapportée par Gerhards (1982) qui a réalisé une synthèse des différentes études sur l'effet de la température et de la teneur en humidité sur les propriétés élastiques de différentes espèces [8].

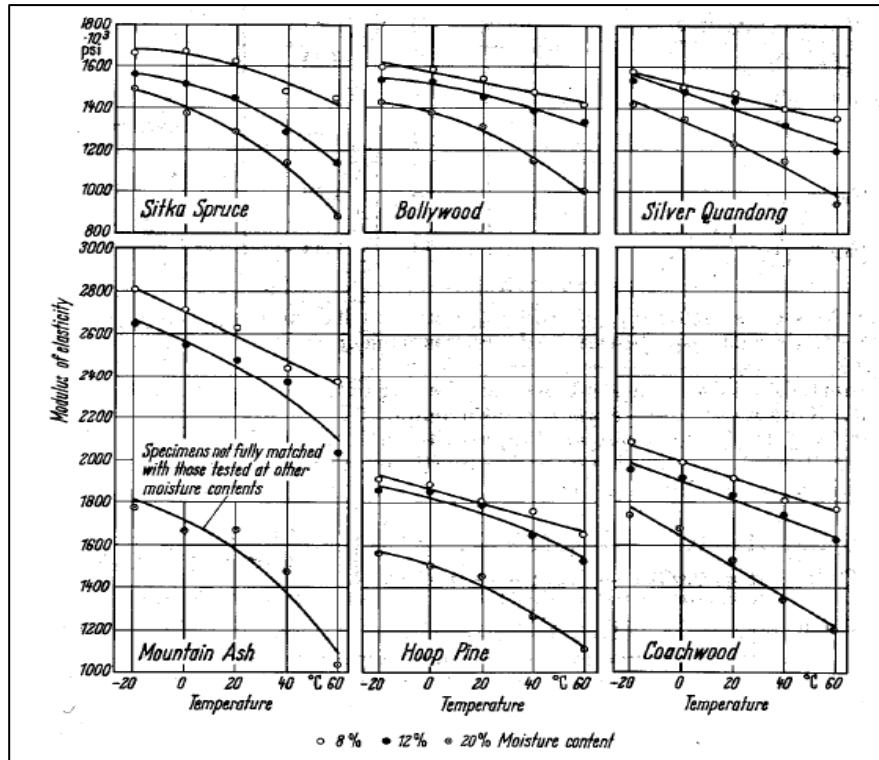


Fig II.2 : Effet de la température sur les modules d'élasticité pour différentes espèces (d'après Sulzberger 1953).

Sur le plan pratique, pour les fluctuations de la teneur en humidité au voisinage de 12% H, dans la plage de 6 à 20%, Guitard (1987) proposait d'adopter les corrections suivantes sur les principales propriétés élastiques [12].

$$\begin{cases} E_L = E_L^{12} [1 - 0.015(H - 12)] \\ E_R = E_R^{12} [1 - 0.030(H - 12)] \\ E_T = E_T^{12} [1 - 0.015(H - 12)] \end{cases} \begin{cases} G_{RT} = E_{RT}^{12} [1 - 0.030(H - 12)] \\ G_{TL} = E_{TL}^{12} [1 - 0.030(H - 12)] \\ G_{ELR} = E_{LR}^{12} [1 - 0.015(H - 12)] \end{cases}$$

En plus d'affecter les modules élastiques, la teneur en humidité affecte fortement la limite d'élasticité et la contrainte de rupture. La teneur en humidité est le paramètre le plus critique affectant la limite d'élasticité. Les travaux faits par Schlyter et Winberg (1929) ont permis d'observer une diminution linéaire de la limite d'élasticité de 10% H jusqu'au point de saturation des fibres (PSF).

Les auteurs ont montré que 1% d'augmentation de la teneur en humidité résulte en une diminution de 3% de la limite d'élasticité dans la direction longitudinale.

Schniewind (1962) a étudié le module d'élasticité et la résistance maximale à la traction du chêne de Californie dans les directions radiale et tangentielle aux teneurs en humidité de 6, 12, 20% et à l'état vert. Les résultats ont démontré que le module d'élasticité et la résistance maximale à la traction sont sensiblement plus grands en direction radiale que dans la direction tangentielle. La relation entre la teneur en humidité et les propriétés de résistance à la traction

perpendiculaire au grain est essentiellement linéaire dans la gamme de teneurs en humidité de 6% jusqu'au point de saturation des fibres.

Bryan et Schniewind (1965) ont constaté que l'effet direct de la teneur en humidité est très prononcé sur le module de rupture et le module d'élasticité de panneaux de particules de sapin Douglas. Les valeurs à 5% de teneur en humidité sont environ 25 à 50% plus grandes qu'à la teneur en humidité de 15% [8].

II.1.4. Effet de couplage des paramètres physiques

Une connaissance plus complète de l'influence des paramètres physiques sur le comportement du bois peut être obtenue en considérant l'effet de couplage entre eux, le séchage du bois étant d'ailleurs un mécanisme couplé. Des résultats indicatifs à cet effet sont disponibles à partir des essais de Sulzberger (1953), Youngs (1957) et Ashworth (1977) pour la correction du module d'élasticité de certaines espèces. La figure (II.3) par exemple démontre bien le couplage entre ces deux paramètres [12].

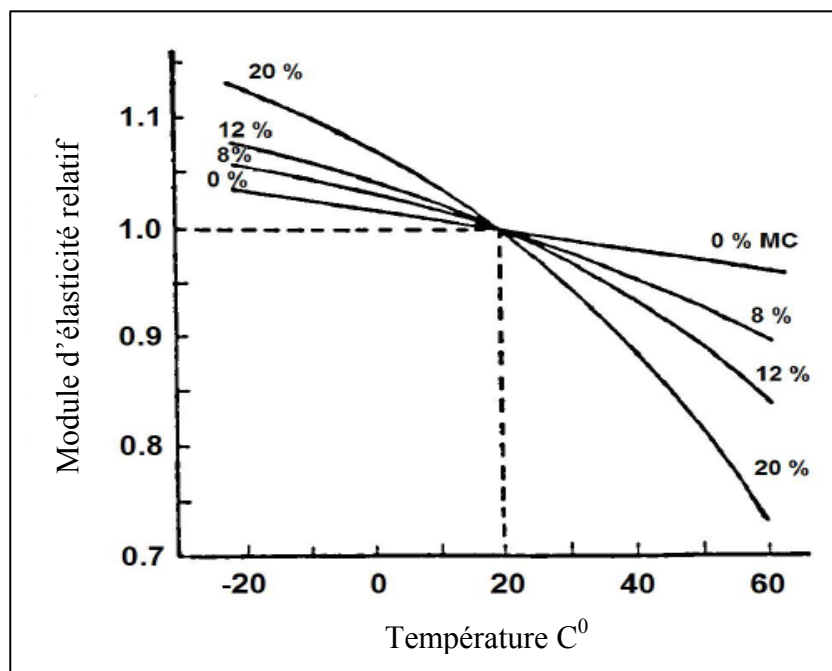


Fig II.3 : Module élastique en fonction de la température.

Effet couplé de l'humidité et de la température sur le module d'élasticité relatif (d'après Sulzberger 1953), Parallèlement à la mesure expérimentale des effets de la température et de la teneur en humidité sur le comportement mécanique du bois, certains chercheurs ont aussi tenté de déterminer une expression explicite. Lessard (1978) a proposé une formule pour prédire le module et également la limite d'élasticité du bois de la forme suivante:

$$Y = a_0 + a_1 T + a_2 H + a_3 H^2 + a_4 TH + a_5 TH^2$$

Où a_i ($i = 0, \dots, 5$) sont des coefficients définis au moyen de la régression multiple à partir de résultats expérimentaux, T est la température et H la teneur en humidité.

Ranta-Maunus (1992) a défini le module d'élasticité en fonction de la densité, de la teneur en humidité et de la température, comme suit:

$$E = 520 \cdot D_{12\%} [1 + 2.2 (D_{12\%} - 0.45) - 5.0 (H - 0.12) - 0.01(T - 60) - 18(D_{12\%} - 0.45) (H - 0.12) - 0.01(T - 60) - 18(D_{12\%} - 0.45) (H - 0.12) - 0.001(T - 60)^2 (H - 0.12) - 0.04 (D_{12\%}) (T - 60)] \quad [8].$$

II.2. Comportement mécanique du bois

II.2.1. Propriétés mécaniques du bois

Toutes les propriétés du bois dépendent dans une certaine mesure de la quantité d'eau qu'il recèle. Le bois vert peut contenir jusqu'à 50% d'eau. Par séchage à l'air (entre 2 et 10 ans) ou par étuvage (quelques jours), cette quantité descend aux environs de 14%. Le bois subit alors un retrait, son module et sa résistance augmentent. Pour limiter le gonflement dû à l'humidité, il faut sécher le bois jusqu'au degré d'humidité qui assurera l'équilibre avec l'atmosphère dans laquelle il sera utilisé.

Les caractéristiques mécaniques des diverses espèces du bois sont données dans le Tableau (II.1), citer dans les travaux (Tro et al) [8].

Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des bois [Tro et al].

Bois	Masse volumique Mg/m ³	Module de young GPa		Résistance, MPa // aux fibres		Ténacité MPa $\sqrt{m}$	
		// aux fibres	⊥ aux fibres	Traction	Compression	// aux fibres	⊥ aux fibres
Balsa	0.1-0.3	4	0.2	23	12	0.05	1.2
Acajou	0.53	13.5	0.8	90	46	0.25	6.3
Sapin	0.55	16.4	1.1	70	42	0.34	6.2
Pin	0.55	16.3	0.8	89	47	0.35	6.1
Bouleau	0.62	16.3	0.9	-	-	0.56	-
Frêne	0.67	15.8	1.1	116	53	0.61	9.0
Chêne	0.69	16.6	1.0	97	52	0.51	4.0
Hêtre	0.75	16.7	1.5	-	-	0.95	8.9

II.2.1.1. Comportement élastique

Le bois est un matériau anisotrope. Sous contrainte, il subit une déformation élastique immédiate suivie d'un fluage lent. A degré d'humidité donné, le module d'un bois dépend en premier lieu de sa masse volumique et de l'angle entre la direction de sollicitation et les fibres. Le bois peut être localement considéré comme un matériau orthotrope qui possède trois directions principales, longitudinale, radiale et circonférentielle ou transversale.

La loi de HOOKE généralisée pour un orthotrope s'écrit de la façon suivante : $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{C} \boldsymbol{\sigma}$, où ; $\boldsymbol{\varepsilon}$ est le vecteur de déformation, $\boldsymbol{\sigma}$ est le vecteur de contrainte et $\mathbf{C}$ est la matrice de complaisance. Elle est symétrique avec neuf coefficients indépendants :

$$\begin{aligned} C_{11} &= \frac{1}{E_L}; C_{22} = \frac{1}{E_R}; C_{33} = \frac{1}{E_T} \pi r^2; C_{12} = C_{21} = -\frac{\nu_{RT}}{E_R} = -\frac{\nu_{RL}}{E_L} \\ C_{23} &= C_{32} \frac{1}{E_L} = -\frac{\nu_{TR}}{E_T} = -\frac{\nu_{RT}}{E_R}; C_{13} = C_{31} = -\frac{\nu_{LT}}{E_L} = -\frac{\nu_{TL}}{E_T} \\ C_{44} &= \frac{1}{G_{LR}} = C_{55} = \frac{1}{G_{LT}} = C_{66} \frac{1}{G_{RT}} \end{aligned}$$

Les paramètres E_L , E_R , E_T sont les modules d'élasticité dans les trois directions orthotropes ; G_{LR} ; G_{LT} et G_{RT} sont les modules de cisaillement dans les plans orthotropes respectifs ; et ν_R , ν_{LR} , ν_{TR} , ν_{RT} , ν_{LT} , ν_{TL} sont les coefficients de Poisson.

Le module axial (dans la direction parallèle aux fibres) est une fonction linéaire de la densité, et les autres sont à peu près proportionnels au carré de la densité. Cela a pour conséquence que l'anisotropie du bois (le rapport entre le module axial et le module perpendiculaire aux fibres) augmente lorsque la densité diminue.

La structure du bois permet d'expliquer son module. Sous contrainte axiale, les cellules sont étendues ou comprimées. Le module $E_{b//}$ du bois est celui d'une paroi cellulaire, E_s , ramené à la surface réellement occupée par les parois cellulaires dans une section axiale. Si la densité double, la surface double, et donc le module aussi. On en déduit immédiatement :

$$E_{b//} = E_s \rho / \rho_s$$

Le module transversal $E_{b\perp}$ est plus faible parce que cette structure expansée est intrinsèquement anisotrope à cause de la forme des cellules. Dans le bois sollicité dans la direction perpendiculaire aux fibres, les parois de cellules fléchissent. Le matériau se comporte comme une mousse pour laquelle : $E_{b\perp} = E_s (\rho / \rho_s)^2$

L'anisotropie élastique est : $E_{b//} / E_{b\perp} = \rho_s / \rho$

Il est clair que plus la masse volumique globale ρ sera faible, plus l'anisotropie élastique est importante.

La résistance et la rigidité du bois sont considérablement plus importantes dans la direction longitudinale que dans la direction transversale. Cela peut être aisément expliqué par le fait

que presque 90-95% des fibres sont orientées dans la direction longitudinale. Bien que les modules d'élasticité varient avec certains facteurs comme le type d'espèce, les conditions de croissance de l'arbre, l'humidité et la température, ils sont généralement reliés par les rapports suivants :

$$\begin{aligned} E_L : E_R : E_T &\approx 20 : 1.6 : 1 ; \\ G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} &\approx 10 : 9.4 : 1 ; \\ E_L : G_{LR} &\approx 14 : 1. \end{aligned}$$

La rigidité et la résistance du bois dépendent fortement de la densité : si la densité est grande, la résistance et la rigidité vont augmenter. C'est évident car la densité est une fonction du rapport de l'épaisseur de la paroi cellulaire et du diamètre de la cellule. En plus, la densité varie considérablement entre le bois cœur et le bois externe, leurs propriétés mécaniques sont sensiblement différentes. Cela explique que la rigidité et la résistance sont beaucoup plus importantes pour le bois externe que le bois cœur [8].

II.2.1.2. Comportement non-élastique

Quand le bois est chargé au dessus de la région élastique, cela conduit aux changements irréversibles dans le matériau. Les limites de proportionnalité à la compression et à la traction sont différentes. Au dessus de la limite d'élasticité le bois ne se comporte pas linéairement, son comportement est influencé par des divers facteurs (la densité, l'humidité, la température et la durée de chargement). La Figure (II.4) montre des courbes typiques de contrainte-déformation dans les conditions humides de chargement, travaux Tro et al [8]. On observe que l'allongement à rupture en traction est relativement faible. La contrainte ultime était très petite dans les directions R et T. En compression le comportement dans les trois directions est similaire, avec un plateau correspondant au flambement des parois des cellules, suivi d'une remontée de la contrainte lorsque ces parois viennent en contact. La limite élastique longitudinale est beaucoup plus élevée que celle dans les directions radiale et tangentielle et la région du plateau est dentelée.

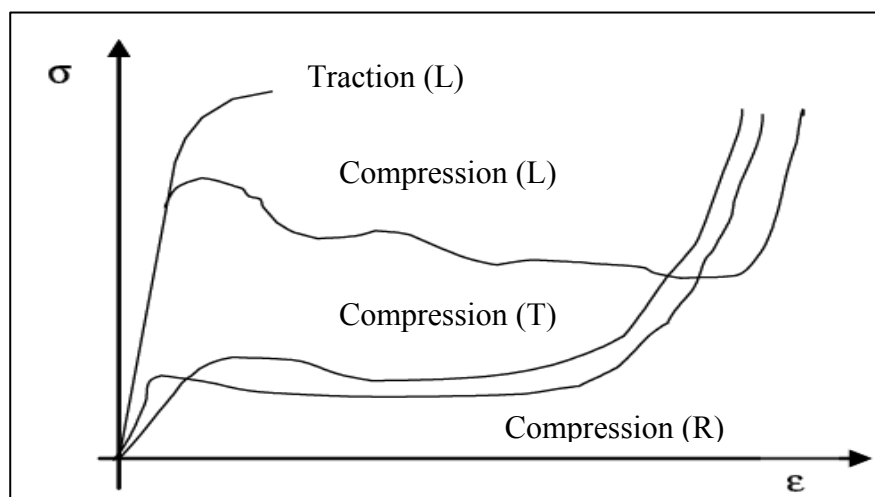


Fig II.4 : Courbes typiques de contrainte- déformation pour le bois [Tro et al].

Pour la compression perpendiculaire aux cellules des fibres, on peut distinguer trois systèmes basiques de la rupture qui dépendent de l'orientation des anneaux de croissance par rapport la direction du chargement.

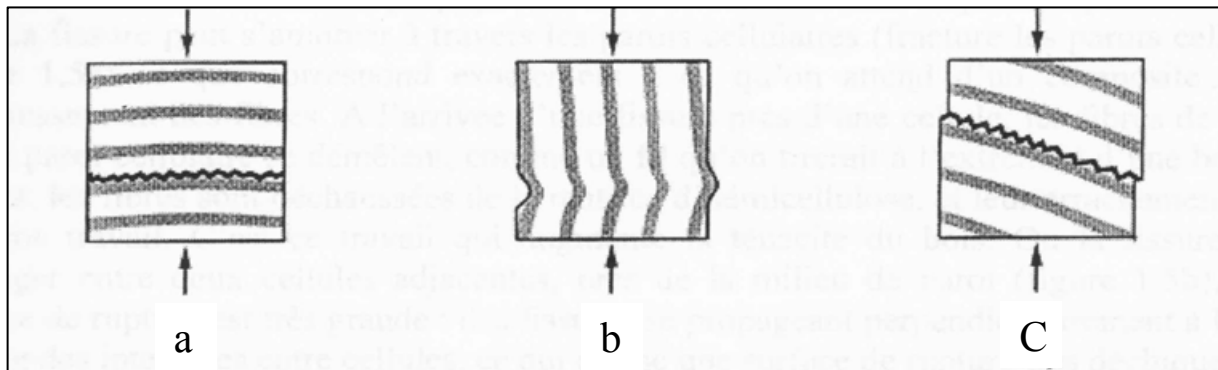


Fig II.5 : Types de rupture à la compression perpendiculairement aux grains du bois.
(a) compression radiale ; (b) compression tangentielle et (c) compression sous angle [Tro et al.].

Pour la compression radiale (a) une rupture écrasante se produit dans la zone du bois de cœur, la compression tangentielle (b) résulte des boucles des anneaux de croissance. Les plis apparaissent habituellement aux endroits où les cellules se courbent pour laisser place à un rayon ligneux, et la bande de flambement se forme à un angle de 45 à 60°, Comme le montre la figure (II.5). A cause de ce plissement, la résistance à la compression est plus faible (d'un facteur 2 environ) que la résistance à la traction. C'est une caractéristique des composites. Le cisaillement se produit souvent par un chargement sous l'angle des anneaux de croissance (c).

Comme le module, la résistance à la traction et à la compression dépendent principalement de la masse volumique. La résistance axiale varie linéairement avec la densité, pour la même raison que le module axial lui même varie linéairement ; elle mesure la résistance d'une paroi cellulaire, ramenée à la section occupée par les parois, soit :

$$\sigma_{//} = \sigma_s \rho / \rho_s$$

Où : σ_s est la limite d'élasticité d'une paroi cellulaire.

La résistance transversale à l'écrasement (compression) $\sigma_{\perp}$ est proportionnelle :

$$\sigma_{\perp} = \sigma_s (\rho / \rho_s)^2$$

L'explication est presque la même que pour le module transverse : les parois cellulaires fléchissent comme des poutres, et l'effondrement se produit lorsque ces poutres atteignent leur contrainte d'effondrement plastique. Enfin, la résistance à l'écrasement est fonction de l'humidité et de la température.

II.2.2. Résistance à la propagation de fissures

La résistance à la propagation de fissures (la ténacité) du bois est un facteur important : il permet de dire si une structure est susceptible de rompre soudainement et à l'improviste par la propagation rapide d'une fissure. Dans la structure du bois, le défaut initial peut être un nœud du bois, une coupure de scie ou des cellules endommagées par une manipulation trop brutale. On peut identifier huit cas principaux de fissuration dans le bois. Pour chacun d'eux la fissure se propage par trois modes différents :

- **Mode I** qui présente l'ouverture de fissure symétrique, perpendiculaire à la surface de fissuration.

- **Mode II et III** qui impliquent la séparation antisymétrique par le cisaillement.

Si la fissure se propage dans une direction perpendiculaire au grain, la ténacité est nettement plus importante que dans le cas d'une fissuration parallèle du grain. . Au niveau microstructural, la propagation de fissure par le mode I peut se produire par de deux façons :

La fissure peut s'amorcer à travers les parois cellulaires Figure (II.6.a) ce qui correspond exactement à ce qu'on attend d'un composite : c'est le déchaussement des fibres. A l'arrivée d'une fissure près d'une cellule, les fibres de cellulose d'une paroi cellulaire se démêlent, comme un fil qu'on tirerait à l'extrémité d'une bobine. Ce faisant, les fibres sont déchaussées de la matrice d'hémicellulose, et leur arrachement absorbe un gros travail. C'est ce travail qui augmente la ténacité du bois.

La fissure peut se propager entre deux cellules adjacentes, près du milieu de la paroi, figure (II.6.b), donc la surface de rupture est très grande. Les fissures se propagent perpendiculairement à l'entaille au long des interfaces entre les cellules, ce qui donne une surface de rupture très déchiquetée. [Tro et al.] [8]

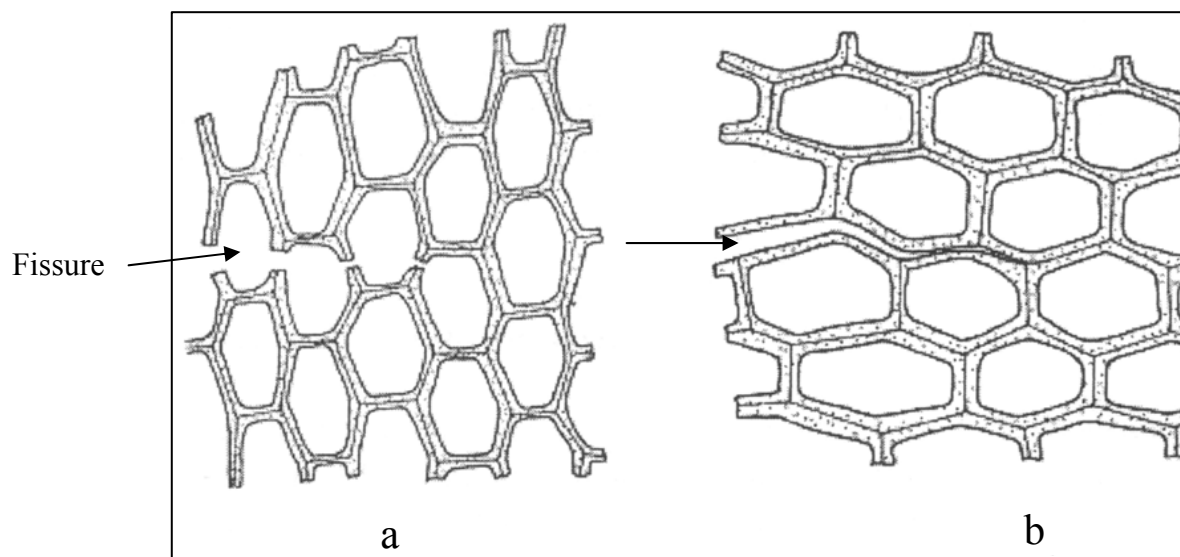


Fig II.6 : fissuration au niveau microstructural pour le mode I de chargement a) fracture des parois cellulaires ; b) fissuration par la séparation des cellules adjacentes. [Tro et al.]

II.3. Modèle élastique

Il est plus facile d'utiliser le modèle élastique dont tous les paramètres nécessaires sont relativement bien connus. D'ailleurs, ce type de comportement a été le plus fréquemment utilisé et a donné lieu à divers modèles: celui de Barkas et Hearmon (1953) avec le gel élastique et des modèles classiques basés sur la symétrie isotrope (Youngs et Bendtsen 1964) et l'orthotropie cylindrique du bois (Hsu et Tang 1975). Ce modèle a aussi été considéré par Johnson et al. (1978) et Sales (1984). Tauchert et Hsu (1977) ont présenté une technique d'assimilation du bois à un composite multicouche qui semble utiliser des éléments de Hooke en parallèle pour simuler la réponse de l'hétérogénéité du bois.

Néanmoins les résultats obtenus avec le modèle élastique, dans l'ensemble, ne restituent qu'en partie les observations expérimentales du comportement du bois. Par contre, Echenique-Manrique (1969) remarquait que cette approche n'était pas complète pour identifier le comportement mécanique du bois. Salin (1987) a utilisé un modèle unidimensionnel pour la modélisation de la distribution de contraintes pour du bois séché en pile et à basse température (26,7 °C). Dans son analyse, il a adopté le modèle élastique avec un module d'élasticité E , fonction de la température et de la teneur en humidité pour comparer avec le modèle viscoélastique. En utilisant le modèle élastique, la contrainte maximale obtenue correspondait à 200 % de la limite en traction impliquant l'existence de fissures très importantes dans le bois qui n'existent pas dans la réalité. Il a également été démontré que ce modèle ne permet pas de simuler l'inversion des contraintes pendant le séchage. Il a conclu que le modèle élastique n'est pas approprié pour prédire la distribution des contraintes dans le bois au cours du séchage. Les résultats de Welling (1988), de Felix et Morlier (1992) et de Lin et Cloutier (1996) démontrent aussi l'insuffisance du modèle élastique pour la prédiction des contraintes de séchage. Toutefois, ils ont obtenu de meilleurs résultats en ajoutant la plasticité et la viscosité aux modèles de contraintes. [8]

II.4. Modèle élastoplastique

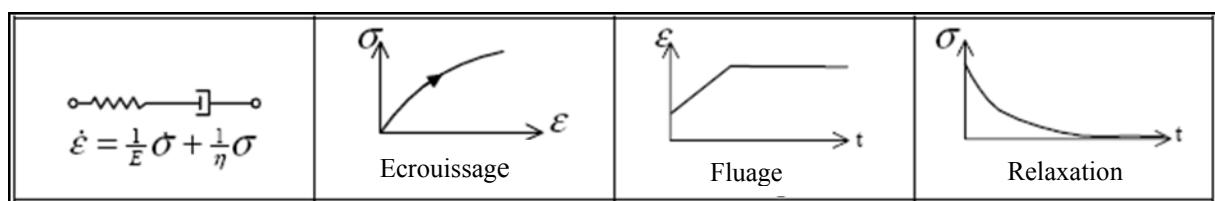
Le modèle de comportement élastoplastique a été mis en oeuvre dans le contexte du séchage des résineux par Lesse et Kingston (1972) et Ashworth (1977). Lessard et al. (1982) l'ont utilisé dans leur modèle unidimensionnel pour simuler la distribution des contraintes d'une planche à la condition que la température soit stable et le gradient de teneur en humidité dans un sens soit plus grand que dans les deux autres sens. Leur modèle permet de considérer le renversement des contraintes et la variation de la rigidité et la viscosité du bois en fonction de la teneur en humidité et de la température pendant le séchage. La rigidité du bois est déterminée d'après la température et la teneur en humidité en utilisant le polynôme expérimental de Youngs (1957). Ils ont conclu que le modèle de contrainte basé seulement sur la composante élastique et la composante plastique est assez précis pour la prédiction de la distribution et le temps du renversement des contraintes. Toutefois, les contraintes au début du séchage sont surestimées.

La difficulté essentielle soulevée par ce modèle est la détermination de la fonction seuil F et du seuil plastique σ_s (contrainte seuil plastique) car ces derniers dépendent de la température et de l'humidité. Les informations à ce sujet, aussi bien expérimentales que théoriques, sont pratiquement inexistantes. Les considérations évoquées dans la littérature restent généralement très philosophiques et confuses et l'approche utilisée s'apparente finalement à celle de l'élasticité non linéaire en utilisant des lois unidimensionnelles. Bien que cette approche soit envisageable dans le cas de la viscoplasticité pour les déformations irréversibles, elle est difficilement envisageable pour le séchage du bois étant donné les effets de la teneur en humidité et de la température sur les paramètres impliqués (Lemaitre et Chaboche 1988). [8]

II.5. Modèle viscoélastique

Le modèle viscoélastique est de loin le modèle le plus utilisé pour la modélisation du comportement mécanique du bois. Le modèle de comportement viscoélastique est basé généralement soit sur le modèle de Maxwell, le modèle de Kelvin-Voigt ou le modèle de Burger.

Modèle de maxwell :

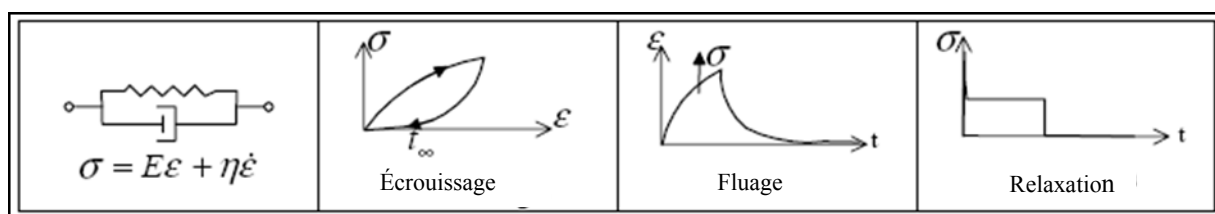


Pour l'essai de fluage $\sigma = \sigma_0 \longrightarrow \epsilon = \frac{\sigma_0}{n} t + \frac{\sigma_0}{E}$, $\frac{\sigma_0}{E}$: représente une déformation instantanée.

$\sigma = 0 \longrightarrow \epsilon = \text{cte} = \epsilon_1$ fluage illimité.

L'essai de relaxation $\epsilon = \epsilon_0 \longrightarrow \sigma = E\epsilon_0 e^{-\frac{kt}{n}}$ relaxation complète. [9]

Modèle de Kelvin-Voigt :



Pour l'essai de fluage $\sigma = \sigma_0 \longrightarrow \epsilon = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{kt}{n}} \right)$

$$\sigma = 0 \longrightarrow \varepsilon = \varepsilon_1 e^{\frac{kt}{n}} \text{ fluage limité dans le temps.}$$

II.6. Mécanique de la rupture

II.6.1. Historique

Grâce aux progrès réalisés dans le domaine de la mise en forme des métaux durant les trois derniers siècles, le fer et l'acier ont progressivement remplacé le bois et le ciment comme matériaux structuraux de base. Malgré leurs hautes caractéristiques, les structures réalisées à partir de ces matériaux ont connu des accidents importants dès le milieu du 19ème siècle. L'origine de ces accidents était la rupture inattendue de composants critiques de ces structures [10].

L'un des premiers incidents enregistré sur une structure importante fut la rupture d'une chaîne du pont suspendu Montrose en Mars 1830 en Grande Bretagne. Depuis, il y a eu un nombre important d'effondrements de ponts, dont le King's Bridge à Melbourne (1962) ou encore le Point Pleasant Bridge en Virginie (1967). Les accidents ferroviaires dus à une rupture brutale des essieux, des roues ou encore des rails ont également été très nombreux. Entre 1860 et 1870, le nombre de personnes victimes d'accidents de train en Grande Bretagne s'élevait environ à 200 par an. De nombreux accidents intervinrent également sur des pipelines, des pétroliers, ou encore sur des avions. En 1950, 2 avions Comet se sont brisés à haute altitude à cause d'un problème de rupture par fatigue sur les trous des rivets près des hublots, lesquels étaient de forme carrée [10].

Ces risques d'accidents étaient d'autant plus grands que l'utilisation d'alliages à hautes caractéristiques mécaniques (ténacité, rigidité...), permettant la réalisation de structures de plus en plus complexes et sollicitées, a énormément augmenté. En fait, les estimations de tenue des structures, fondées sur les caractéristiques mécaniques classiques, ne tenaient pas compte de la ténacité des matériaux en conditions réelles de service, et les chercheurs étaient alors incapables d'expliquer le phénomène de rupture brusque sous des sollicitations bien inférieures à celles de la limite d'élasticité [10].

Si Griffith est souvent cité comme le premier chercheur à avoir introduit la mécanique de la rupture (en tant que science), ces travaux restent basés sur des études antérieures. On peut notamment citer l'article de Wieghardt, paru en 1907 et récemment traduit en anglais [Wieghardt 1995], dans lequel l'existence de la singularité du champ des contraintes en pointe de fissure dans un matériau élastique linéaire fut reconnue [10].

A partir de ces résultats, Griffith [Griffith 1920] s'est intéressé en 1920 au problème de la rupture, dans un milieu élastique fissuré, d'un point de vue énergétique. Il a ainsi mis en évidence une variable (appelée plus tard **taux de restitution d'énergie**) caractérisant la rupture, et dont la valeur critique est une caractéristique du matériau [10].

Vinrent ensuite les premiers développements théoriques d'analyse des champs de contraintes et de déformations au voisinage d'une fissure en élasticité. Ces études, menées notamment par Sneddon en 1946 [Sneddon 1946], puis Irwin [Irwin 1957] en 1957, ont permis de définir les

facteurs d'intensité de contraintes, caractérisant l'état de sollicitation de la région dans laquelle la rupture se produit. Entre 1960 et 1980, la mécanique de la rupture connaît un grand succès scientifique, avec notamment l'apparition de la mécanique non linéaire de la rupture qui a permis de mieux prendre en compte le comportement plastique des matériaux. De nombreux travaux sont publiés à cette période ; on peut citer par exemple Rice [Rice 1968] et Bui [Bui 1973] qui introduisent la notion d'**intégrales indépendantes du contour** telles que l'intégrale J, dont les propriétés ont permis de caractériser la ténacité d'un matériau lorsque la plasticité n'est plus confinée à la pointe de fissure. C'est également à cette période que les premiers travaux concernant la mécanique de la rupture dans les matériaux multicouches sont réalisés (Sih(1964), Erdogan (1965) et Comninou (1977)).

Tous les développements théoriques réalisés à cette époque ont permis de déterminer la forme exacte de la singularité, et des champs asymptotiques en pointe de fissure nécessaires à l'analyse et à l'interprétation des résultats expérimentaux. De plus, ils représentent une solution précise à de nombreux problèmes de géométries simples, et peuvent donc être utilisés comme solutions approchées pour des problèmes plus complexes.

L'apparition de la méthode des éléments finis a permis d'étudier la mécanique de la rupture d'un point de vue numérique, proposant ainsi des solutions plus précises à des problèmes plus complexes. Apparurent alors une multitude de méthodes permettant de calculer les facteurs d'intensité de contraintes, le taux de restitution d'énergie, ou encore de découpler les différents modes de rupture. Parmi ces nombreuses méthodes, les plus facilement implémentables donnent bien souvent des résultats approchés, ou dépendants du maillage, alors que les autres nécessitent des techniques éléments finis avancées [10].

II.7. Endommagement et mécanique de la rupture

Lorsqu'une pièce est soumise à des efforts d'origines variées, il existe des limites, en contraintes ou en déformations, qu'elle ne doit pas dépasser, sous peine d'endommager le matériau et de provoquer sa rupture. Suivant que l'on s'intéresse à la dégradation du matériau d'un point de vue micromécanique ou macro-mécanique, deux approches peuvent être utilisées [12].

La mécanique de l'endommagement propose de décrire continûment la dégradation progressive du matériau due à l'apparition, à la croissance, puis à la coalescence de microfissures ou de microcavités présentes dans le matériau. Cette approche, initialement introduite par Kachanov, a été reprise et développée par de nombreux auteurs tels que Chaboche, Lemaitre [Lemaitre 1988], Bui [Bui et al. 1981], Ehrlacher [Ehrlacher 1985], Gurson [Gurson 1977], Tvergaard, Needleman [Needleman et al. 1987], Rousselier [Rousselier 1987], etc... Lorsque les microfissures, les microcavités créées par croissance ou par coalescence des défauts sont de taille assez grande, cette façon d'aborder le problème n'est plus valable, et il faut alors utiliser la mécanique de la rupture [12].

La mécanique de la rupture a pour objet l'étude du comportement mécanique d'un matériau en présence de fissures macroscopiques. Cela revient notamment à déterminer le champ des contraintes et des déformations au voisinage de la pointe d'une fissure. L'étude de ces champs mécaniques permettant ensuite de juger de la stabilité ou non d'une fissure. Il est également possible, comme nous le verrons par la suite, d'aborder la mécanique de la rupture à travers une étude énergétique du solide fissuré.

Le choix de l'approche dépend essentiellement de l'étude que l'on désire effectuer. Dans certains procédés de mise en forme des matériaux, l'endommagement est souvent critique, et il n'est donc pas nécessaire d'étudier la propagation de fissures. Par contre, dans d'autres procédés (usinage, découpage) et en génie civil, l'étude des fissures se propageant dans le matériau est nécessaire et est basée sur la mécanique de la rupture.

De plus, la capacité du code de calcul utilisé à permettre la propagation d'une fissure à travers un maillage est un paramètre important. En effet, en mécanique de l'endommagement, on ne modélise pas réellement les étapes d'amorçage et de propagation de fissures. Ces étapes se produisent naturellement lorsque l'adoucissement dû à la croissance des cavités l'emporte sur l'écrouissage du matériau. Il se produit alors une instabilité mécanique traduite notamment par la chute des contraintes dans la zone endommagée. La fissure correspond alors aux zones qui ne transmettent plus d'efforts normaux. Cette approche présente donc l'avantage de ne pas significativement modifier la topologie du maillage en introduisant une fissure mais reste approximative dans la mesure où la précision sur le chemin de propagation est directement lié à la finesse du maillage. De plus, en grandes déformations, la dégénérescence des éléments correspondant aux zones les plus endommagées peut rapidement entraîner la fin du calcul. Dans la suite du manuscrit, nous nous intéresserons spécifiquement à la mécanique de la rupture, en effectuant de temps en temps quelques parenthèses concernant l'endommagement.

II.8. Fissures statiques, quasi-statiques, dynamiques

Les premiers travaux réalisés en mécanique de la rupture visaient à établir, de façon précise, les champs mécaniques au voisinage d'une fissure statique. La difficulté d'une telle étude réside dans la prise en compte de la singularité introduite par la pointe d'une fissure. Le calcul précis de paramètres mécaniques tels que les facteurs d'intensité des contraintes, ou le taux de restitution d'énergie réside en grande partie dans la bonne prise en compte de cette singularité [11].

Ces paramètres mécaniques ainsi calculés, il est possible de prévoir la propagation ou non de la fissure. Suivant le type de matériau étudié, et le chargement appliqué, la propagation pourra être qualifiée de stable (la fissure a besoin de plus d'énergie pour reprendre sa progression) ou d'instable (la fissure poursuit sa progression jusqu'à la ruine de la structure, sans nécessiter d'énergie supplémentaire).

II.9. Modes de rupture : La fissuration se manifeste par la séparation irréversible d'un milieu continu en deux parties, appelées lèvres de la fissure, ce qui introduit une discontinuité

au sens des déplacements. Les mouvements possibles des lèvres de chaque fissure sont des combinaisons de trois modes indépendants, comme la montre la figure (II.7) :

Mode I : ouverture (ou clivage) ;
 Mode II : cisaillement plan ;
 Mode III : cisaillement anti-plan.

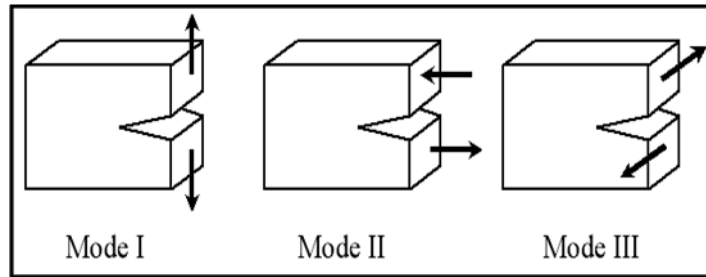


Fig II.7 : Mode de rupture.

Le mode I est le plus dangereux pour l'extension d'une fissure ; cependant, une fois amorcée et pour des sollicitations mixtes ou des géométries complexes, la fissure a tendance à bifurquer, et reste donc rarement rectiligne (2D) ou plane (3D).

II.10. Mécanique linéaire, et non-linéaire de la rupture

II.10.1 : Module d'Young et coefficient de Poisson

Vers 1800 Young, médecin de formation, s'intéresse à l'élasticité de la cornée. En procédant à des essais de traction uniaxiale, il constate que la déformation ($\epsilon_{//}$) parallèle mesurée selon l'axe de traction est proportionnelle à la contrainte σ appliquée. Il définit le coefficient de proportionnalité $E = \sigma / \epsilon_{//}$.

Poisson complète l'analyse en constatant que l'allongement dans la direction de l'axe de traction s'accompagne d'un raccourcissement plus faible proportionnel dans les directions perpendiculaires. Il définit positif le coefficient de proportionnalité $\mu = \epsilon_{\perp} / \epsilon_{//}$

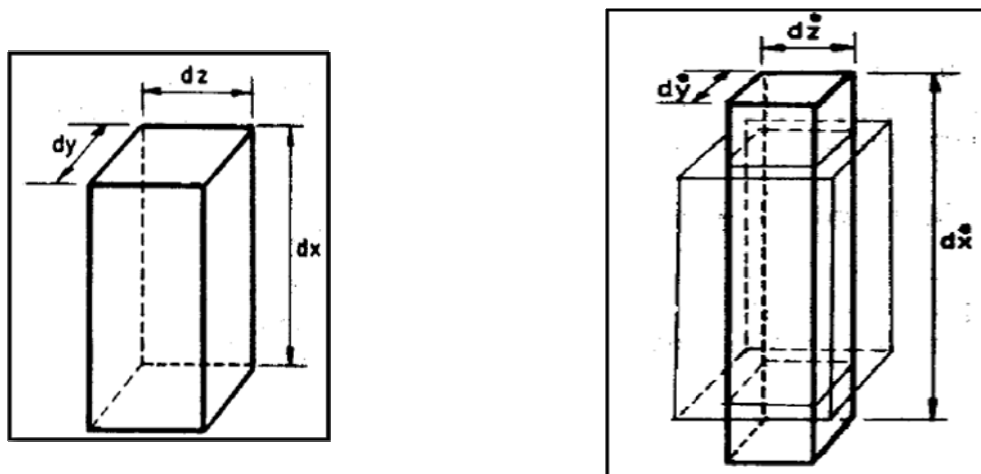


Fig II.8 : Allongement et contraction latérale (effet de Poisson).

Le Module d'Young E a la dimension d'une contrainte, et se mesure généralement en GPa. Il représente la contrainte qu'il faudrait appliquer pour obtenir une déformation unitaire soit doubler la longueur initiale, comme l'illustre la figure (II.9) [12]. Aucun matériau ne répond linéairement à une telle contrainte, la plupart ont cède bien avant.

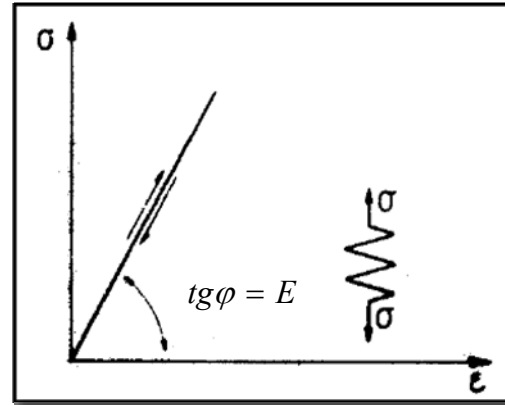


Fig II.9 : Courbe contrainte déplacement Loi de Hooke.

Le Coefficient de Poisson est un nombre sans dimension compris dans l'intervalle $[0,0.5]$ l'exception des élastomères comme le caoutchouc dont le coefficient de Poisson $\mu = 0.5$. La plupart des matériaux isotropes continus ont un coefficient de Poisson compris dans l'intervalle $[0.25, 0.35]$.

La mécanique de la rupture se propose de décrire les étapes d'amorçage et de propagation de la fissuration. Selon le comportement du matériau durant la propagation d'une fissure, on peut être confronté à deux types de rupture :

II.11. Rupture

II.11.1. Rupture fragile, en l'absence de déformation plastique significative (mécanique linéaire de la rupture) ;

II.11.2. Rupture ductile, en présence de déformation plastique non négligeable (mécanique non linéaire de la rupture). Dans ce cas, suivant l'étendue de la zone plastique en pointe de fissure, on différencie le cas de la plasticité confinée, de celui de la plasticité étendue.

II.12. Etude d'un milieu élastique fissuré

Dans un **milieu élastique** fissuré, la région proche de la pointe de fissure peut être décomposée en trois zones, comme le montre la figure (II.12) [Zhang 1992] [12] :

1. La **zone d'élaboration** : au voisinage direct de la pointe de fissure, l'étude de cette zone (considérée comme ponctuelle d'un point de vue mécanique) est très complexe dans la mesure où les contraintes tendent vers l'infini (d'un point de vue théorique) à la pointe de fissure ;
2. La **zone singulière** : dans cette zone, le champ de contrainte présente une singularité en $r^{-1/2}$;
3. La **zone des champs lointains** : extérieure aux deux précédentes, elle raccorde la zone singulière aux conditions aux limites de chargement et déplacement.

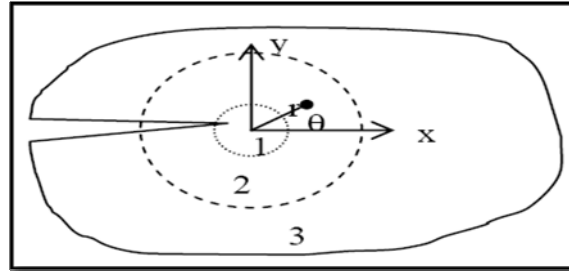


Fig II.10 : Les zones de champs mécaniques.

II.13. Phases de chargement

II.13.1. Phase d'ouverture : pendant laquelle, la fissure immobile s'ouvre, les lèvres s'écartant sans changement géométrique de la surface S . Cette phase se poursuit jusqu'à un chargement critique autorisant la fissure à se propager en s'agrandissant. A ce chargement critique correspond la condition d'amorçage [13].

II.13.2. Phase de propagation : Au delà du chargement critique d'amorçage, la fissure s'agrandit (avance) soit dans le plan tangent à S soit dans d'autres directions (branchement), c'est la phase de propagation qui pourra être contrôlée (propagation dite stable) ou non (propagation dite instable conduisant à la rupture brutale ou catastrophique) [13].

II.14. Hypothèses du modèle de rupture fragile

Le matériau est supposé homogène, isotrope à comportement élastique linéaire jusqu'à rupture.

La courbe de traction de la structure macroscopique présente un comportement linéaire jusqu'à rupture ; On parle alors de rupture fragile à l'échelle macroscopique ce qui n'exclut pas l'existence d'une ductilité à plus petite échelle au voisinage de la fissure pour autant que la plastification reste strictement confinée au voisinage de la fissure.

On néglige les forces de volume et les accélérations, la rupture dynamique étant exclue.

On se restreint aux problèmes bidimensionnels (d'épaisseur) en contrainte plane (cas des plaques minces) et en déformation plane (cas des plaques épaisses). L'origine O étant prise en tête de fissure, l'axe Ox_1 sera pris dans le prolongement de la fissure, comme l'illustre la figure (II.11) [13].

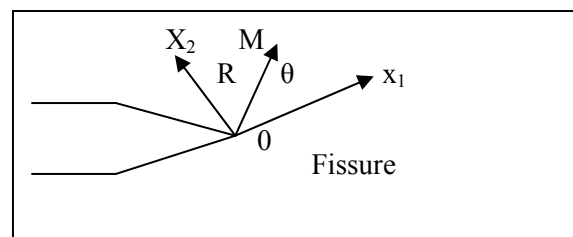


Fig II.11 : Ouverture et propagation d'une fissure.

On s'attend donc à ce que le modèle présente une divergence des contraintes physiquement sans signification au voisinage de la tête de fissure, mais la solution représentera bien l'évolution spatiale du champ de contrainte induit par la fissure au delà d'un petit rayon r_0 .

II.14.1. Modèle de rupture fragile

Le résultat essentiel en élasticité linéaire a été établi par Irwin. Le premier terme du développement limité du champ de contrainte au voisinage d'une fissure est le même pour tous les problèmes (chargement et géométrie de fissure) correspondant à un mode d'ouverture donné. Pour chaque mode, ce premier terme est connu à un facteur multiplicatif près noté K facteur d'intensité de contrainte. La solution d'un problème de fissure se ramène donc en élasticité linéaire à la détermination du facteur K qui ne dépend que de la géométrie de la fissure et du type de chargement. Dans un problème réel, la solution sera souvent une combinaison linéaire des trois modes, combinaison rendue possible en raison du principe de superposition des solutions en élasticité linéaire. Le mode I est cependant physiquement le mode le plus important puisque l'ouverture de la fissure conduit assez facilement à la rupture. Les autres modes ne sont pas toujours faciles à contrôler, en particulier en présence de frottement des lèvres. En mode I la fissure se propage dans son propre plan par raison de symétrie. On s'intéressera donc essentiellement au mode I [13].

$$\text{Champ de déplacement : } \vec{\mu} = \frac{k}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \vec{f}(k, \theta) \quad [13]$$

$$\text{Champ de contrainte } \vec{\sigma} = \frac{k}{\sqrt{2\pi r}} \vec{f}(\theta) \quad [13]$$

Étant le coefficient de Poisson, et η le module de cisaillement, $K = 3 - 4\eta$ en déformation plane et $K = 3 - \eta / 1 + \eta$ en contrainte plane $\sigma_{33} = \eta (\sigma_{11} + \sigma_{22})$ en déformation plane et $\sigma_{33} = 0$ en contrainte plane [13].

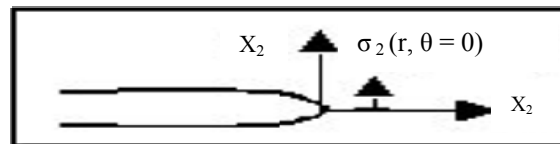


Fig II.12 : Traction en tête de fissure.

Les facteurs d'intensité de contraintes sont aussi des facteurs de discontinuité des déplacements.

Cette interprétation appliquée à K_I dégage une condition de compatibilité importante, n'apparaissant pas de façon évidente en termes de contrainte, à savoir $K_I \geq 0$. En conséquence la contrainte $\sigma_{22}(r; \theta = 0)$ juste en avant de la fissure est toujours ≥ 0 . En mode I la tête de fissure travaille toujours en traction (travail à l'ouverture). Il ne faut cependant pas oublier que ces champs correspondent seulement au premier terme du développement limité. Dès que l'on s'éloigne de la fissure, d'autres termes réguliers interviennent. On peut seulement affirmer qu'ils seront négligeables devant $1/\sqrt{r}$ lorsque $r \rightarrow 0$ [13].

II.15. Coefficients de concentration k et facteur d'intensité K

Il est important de ne pas confondre le coefficient de concentration de contrainte k qui ne donne qu'une information locale à la pointe même de la fissure et le facteur d'intensité de contrainte K qui décrit l'ensemble de la singularité spatiale du champ de contrainte. Si k est sans dimension, K est le produit d'une contrainte par la racine carrée d'une longueur

$$[K] = \sigma [L]^{1/2} \text{ et se mesure en } \text{MPa} \sqrt{m}.$$

Le passage à la limite permettant de définir une fissure comme la limite d'un trou elliptique complètement aplati conduit naturellement à une relation entre les deux grandeurs, la longueur intervenant dans K étant reliée à la taille c du défaut par la relation d'Irwin :

$$K = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_m \sqrt{r}$$

σ_m étant la contrainte en tête de la fissure elliptique et r son rayon de courbure.

La figure (II.13) [13] représente une fissure elliptique aplatie de longueur 2c dans une plaque infinie (en pratique de dimensions grandes devant c) soumise à une traction σ , $\sigma_m = k\sigma$ avec $k = 2\sqrt{c/2}$, le passage à la limite conduit $K_I = \sigma\sqrt{\pi c}$.

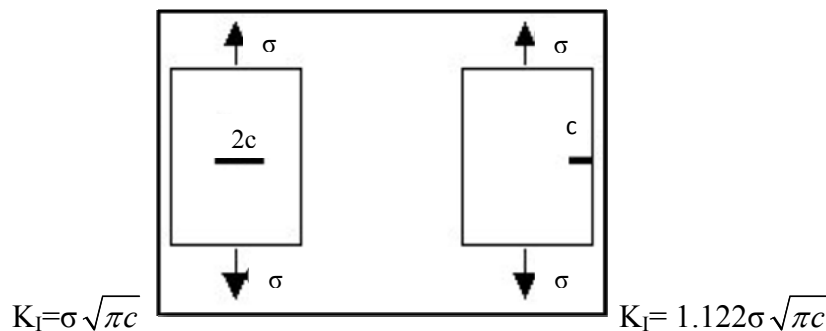


Fig II.13 : Facteur d'intensité de contrainte.

II.16. Approche globale ou énergétique

La propagation de fissure est un phénomène dissipateur d'énergie. Dans la théorie de Griffith, l'énergie consommée est la différence entre l'état énergétique du système avant et après fissuration. Cette énergie peut s'assimiler à une énergie de surface, et Griffith a postulé que c'était une caractéristique intrinsèque du matériau.

II.17. Taux de restitution d'énergie

Noté G, le taux de restitution d'énergie représente l'énergie nécessaire pour faire progresser la fissure d'une longueur unité. Elle correspond à la décroissance de l'énergie potentielle totale $\mathcal{W}_p$ pour passer d'une configuration initiale avec une longueur de fissure a, à une autre où la fissure s'est propagée d'une longueur da.

$$\left\{ \begin{array}{l} G = -\frac{\partial w_p}{\partial e} \\ w_p = w_{p+} w_{ext} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} w_e = a^2 + b^2 = c^2 \int \sigma : \varepsilon \\ w_{ext} = \int_{\Omega} f u \end{array} \right.$$

Où W_e représente l'énergie de déformation élastique, W_{ext} l'énergie potentielle des forces extérieures f , et ∂A l'incrément de surface correspondant à l'extension de la fissure.

En utilisant le champ des contraintes dans la zone singulière et la loi de comportement élastique linéaire, il est possible de relier le taux de restitution d'énergie aux facteurs d'intensités de contraintes.

$$G = \frac{k_I^2 + k_{II}^2}{E'} + \frac{k_{III}^2}{2\mu}$$

$$\text{Ou : } \left\{ \begin{array}{l} E' = E \\ E = \frac{E}{1-\nu^2} \\ \mu = \frac{E}{2(1-\nu^2)} \end{array} \right.$$

Où E est le module d'Young et ν le coefficient de poisson.

Remarque : Il est également possible de relier G à la complaisance C de la structure par

$$G = \frac{p^2}{2b} \frac{\partial C}{\partial A}$$

La courbe (Force/Déplacement) représentée dans figure (II.14) ci-dessous, OA correspond à une fissure de longueur a , et OB à une fissure de longueur $a+\delta a$. G représente l'aire située dans le triangle OAB pour un essai effectué à charge imposée ou dans le triangle OAC pour un pilotage en déplacement imposé [12].

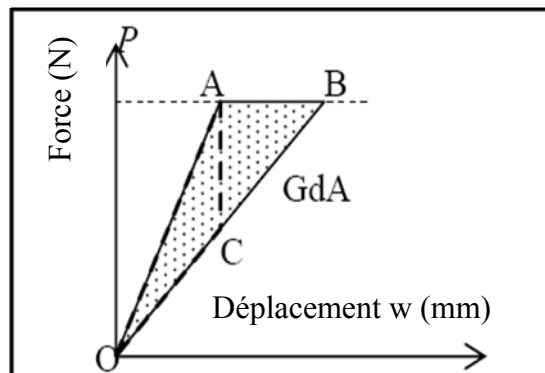


Fig II.14 : Méthode de calcul du taux de restitution d'énergie G .

II.17.1. Intégrales de contour

La singularité du champ des contraintes au voisinage de la pointe d'une fissure peut également être étudiée grâce à certaines intégrales de contour déduite de la loi de conservation de l'énergie [Eshelby 1968]. Ces intégrales ont la particularité d'être équivalentes au taux de restitution d'énergie, et d'être indépendantes du contour d'intégration choisi. Parmi les plus connues, on peut citer l'intégrale J de Rice [Rice 1968], l'intégrale duale I de Bui [Bui 1973], l'intégrale hybride s'appuyant sur le super-élément de Tong et Pian [Zhang 1992] ou encore les intégrales T et A proposées par Bui et Proix [Bui et al. 1985] et mises en œuvre et étudiées par Zhang [Zhang 1992].

La figure (II.15) schématise l'intégrale de Rice, on considère un milieu bidimensionnel fissuré, dont la fissure sera supposée rectiligne. Le contour C est un contour ouvert, orienté dont les extrémités se trouvent sur les faces supérieure et inférieure de la fissure.

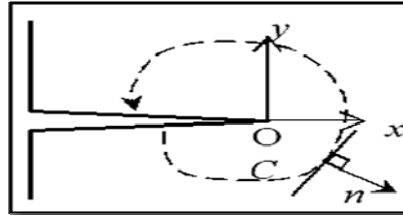


Fig II.15 : Contour d'intégration J.

$$J = \int_{\Gamma} W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \quad \text{ou} : \Gamma : \text{Tout contour orienté entourant la pointe de fissure.}$$

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} : \text{Densité volumique d'énergie de déformation.}$$

$\mathbf{T} = \boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}$: Vecteur contrainte s'exerçant sur les facettes de la normale $\mathbf{n}$, $\mathbf{n}$ étant la normale extérieure à c. Ou $\mathbf{U}$: Vecteur déplacement, et $\mathbf{S}$: Abscisse curviligne le long de c.

L'intégrale J est indépendante du contour (à condition qu'il n'y ait pas de forces de surface sur les lèvres de la fissure, que l'on soit en conditions isothermes, et en quasi-statique); W_p

✓ L'intégrale J représente le taux de décroissance de l'énergie potentielle :

$$J = - \frac{\partial W_p}{\partial A} = G$$

✓ L'intégrale J permet, dans certaines conditions, de décrire le champ des contraintes et des déformations à la pointe de la fissure à travers le champ HRR.

Dans les cas où la plasticité est importante, on effectue une analogie avec un matériau élastique non linéaire. Cette hypothèse est valable à condition qu'il n'y ait pas de brusques variations dans la direction du chargement appliqué, et donc, pas de déchargement. En effet,

le déchargement en élasticité non linéaire s'effectue suivant la même courbe qu'à la montée, ce qui n'est pas le cas en élastoplasticité. Dans ce cadre, l'intégrale J est étendue au cas des matériaux élastiques non linéaires, et permet ainsi d'intégrer le champ des contraintes et des déplacements à la pointe de la fissure. Ayant ainsi fait l'analogie entre l'élastoplasticité et l'élasticité non linéaire, l'intégrale J peut être obtenue, comme précédemment, par la méthode de la complaisance :

$$J = - \int_0^w \left(\frac{\partial p}{\partial a} \right) w dw = \int_0^p \left(\frac{\partial p}{\partial a} \right) (2.2)$$

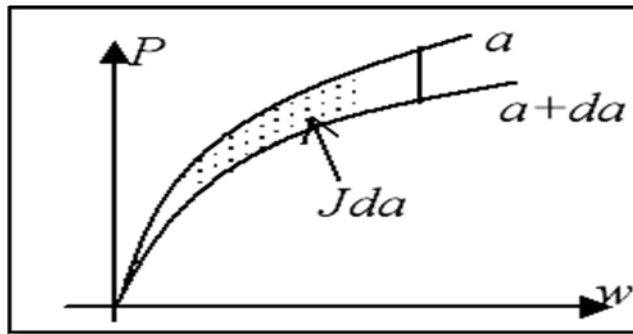


Fig II-16 : Détermination du J par la méthode de complaisance.

II.17.2. Calcul du taux de restitution d'énergie

Ces méthodes sont particulièrement bien adaptées aux calculs éléments finis car on se place relativement loin de la pointe de fissure, de façon à ne pas faire intervenir les singularités. Par contre, elles présentent souvent le désavantage de ne pas permettre le découplage des différents modes. Ces méthodes étant très nombreuses, nous nous restreindrons à celles qui sont les plus utilisées.

II.17.3. Calcul par avancée réelle de fissure

En travaillant à force imposée, on peut calculer G en calculant l'évolution de l'énergie élastique lors d'un petit incrément de longueur de la fissure. G s'obtient alors par lissage de la quantité : $\Delta w_{el} / \Delta a$.

Dans la pratique, la méthode consiste donc à effectuer deux ou trois calculs élastiques successifs à partir d'un maillage identique, mais sur lequel on relâche un ou plusieurs nœuds en fond de fissure entre les différents calculs. On peut travailler avec des éléments quadratiques courant, mais il ne faut surtout pas positionner la pointe de fissure sur un nœud milieu. Il est préférable de réaliser au moins deux déterminations (3 calculs) puis d'évaluer G par extrapolation quand $r \rightarrow 0$. Cette méthode, basée sur un raisonnement physique, a l'avantage de bien s'adapter aux codes, tout en n'utilisant pas d'éléments spéciaux. Elle nécessite cependant un maillage fin en pointe de fissure et est très coûteuse en temps de calcul, puisqu'elle requiert au moins deux calculs pour une longueur de fissure donnée.

Chapitre III :
Partie pratique

III. Partie expérimentale

Notre partie expérimentale se résume en trois volets essentiels, le prélèvement, la préparation des éprouvettes selon la norme (NA.604/1990), et réalisation des essais physico-mécanique sur les éprouvettes préparées.

III.1. Matières premières : les bois utilisés sont, le pin d'Alep, le chêne zen, et l'eucalyptus. Pour le pin d'Alep est ramené de l'entreprise trans-bois de Bejaia, sous forme d'éprouvettes de dimension (40*40*400mm). Le pin d'Alep est d'origine des massif de beni kessilla, et d'akfadou.



Fig III.1: Images satellite Google earth 2009.

III.1.2. Provenance de la matière

Pour les bois, chêne zen et l'eucalyptus sont prélevé du massif d'Akfadou. Les arbres prélevés sont coupé à l'aide d'une scie à chaîne, à une hauteur de 30 cm de la terre, ayant un diamètre de 40 cm et une hauteur 20m. Les deux arbres coupés du (chêne zen et eucalyptus) sont coupés sous forme de grumeaux, et misent en aire libre pendant une semaine, afin de d'éliminer une certaine humidité naturelle. Les grumeaux et les éprouvettes du pin d'Alep sont misent dans un bassin d'eau pour éviter l'altération des différents bois par les bactéries et

les champignons, qui peuvent provoquer les moisissures et la détérioration de la qualité des bois.

Le massif d'akfadou (est de la wilaya de Tizi Ouzou) repose sur une terre composée d'une quantité importante de calcaire, il est connu aussi par son climat froid et de une pluviométrie importante. Les conditions climatiques (chaleur, pluies, humidité et vent) et la composition chimique des terres dont les arbres croient, déterminent et influent sur la qualité et les propriétés physico-mécaniques des bois. Car un climat tropical favorise la croissance rapide des arbres, ce qui rend la forêt plus productive en terme de bois, aussi une terre composée de silicates peut influencée les étapes de transformation en usinant le bois, en produisant beaucoup de poussière. Ainsi que une influence directe sur les propriétés physiques, mécaniques du bois tel que la dureté, la densité, aussi les résistances mécaniques.

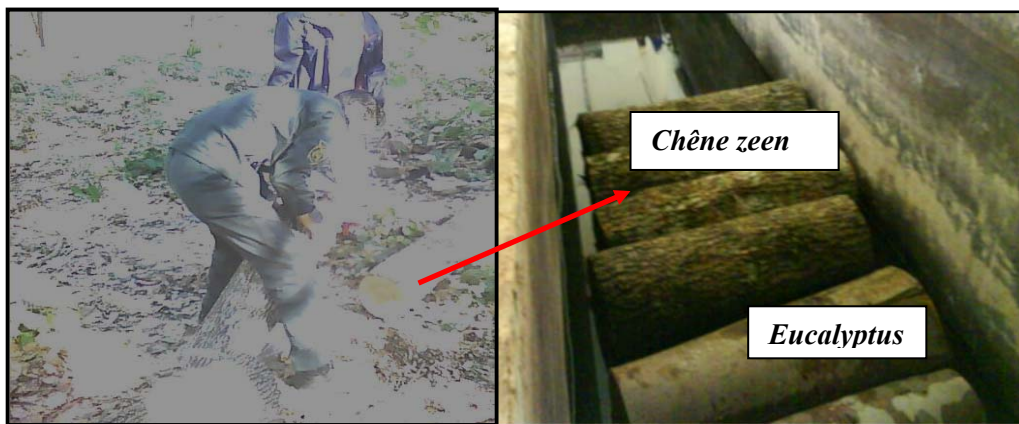


Fig III.2 : Prélèvement et conservation des grumeaux du chêne zeen et d'eucalyptus.

III.1.3. Préparation des éprouvettes :

Après avoir retiré les troncs d'arbre du bassin et le laisser sécher en air libre, on a découpé les troncs en deux d'une façon longitudinal en utilisant une chaine à scie. Puis raboter en raboteuse pour obtenir des surfaces améliorées. Et en fin on va les éprouvettes seront finies en scie à ruban, on obtenant ainsi des éprouvettes de dimensions (20*20*340 mm). La préparation des éprouvettes a été réalisée au niveau de l'atelier bois ex-INIL.

Fig III.3: Photos Google earth atelier bois (UMBB).





Fig III.4: Étape de préparation des éprouvettes (coupe et rabotage).



Fig III.5 : Finition des éprouvettes (20*20*340).

Après avoir réalisé les éprouvettes (20*20*340 mm), on procède à la réalisation des éprouvettes entaillées avec 4 et 8 mm successivement, au niveau des ateliers INGM, en utilisant la machine de fraisage avec un outil de coupe circulaire de 1 mm d'épaisseur.



Fig III.6 : Préparation éprouvettes entaillées (4 et 8 mm).

III.2. Essais physiques

III.2.1. Détermination des masses volumiques des trois bois [14]

Mode opératoire : La masse volumique d'un matériau est le rapport de sa masse par rapport à son volume.

Les éprouvette des trois essences à étudiées ayant les dimensions (20*20*20mm) sont pesées en utilisant une balance électronique, puis mesurées par un pied à coulisse numérique à une humidité de 12%, comme le dicte la norme française NF B 51-122 (1989). En utilisant le formule : $M_v = M(g) / V (cm^3)$

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Masse volumique et densité des trois bois étudiés à 12 % d'humidité.

Espèces de bois	Masse volumique (g/cm ³)	densité
Pin d'Alep	0,57	0,57
Chêne zeen aubier	0,80	0,80
Chêne zeen duramen	0,78	0,78
Eucalyptus aubier	0,65	0,65
Eucalyptus duramen	0,62	0,62

III.2.2. Détermination du gonflement longitudinal, radial et transversal de chaque espèce

Mode opératoire : Après avoir préparé des éprouvettes de dimension (20*20*20) pour chaque essences,

- 10 éprouvettes prélevées du pin d'Alep,
- 10 éprouvettes prélevées du chêne zeen dont 5 d'aubier et 5 du duramen,
- 10 éprouvettes prélevées d'eucalyptus, dont 5 d'aubier et 5 du duramen.

Toutes les éprouvettes sont misent en eau après les avoir mesurées et pesées ainsi que un marquage dans les trois directions (longitudinal, radial et transversale) pour faciliter la poursuite de l'essai. Et on a suivie l'évolution des dimensions longitudinal, radial et transversale ainsi que leur poids pendant 12 jours,

Fig III.7 : Détermination des dimensions et poids des éprouvettes (20*20*20).

Les résultats de la variation de



masse et des dimensions sont mentionnés dans les graphes suivants :

Les éprouvettes mises en eau, sont chaque jour repêchée, pesée et mesurée, pendant 12 jours (jusqu'à obtention d'une masse constante), ce qui signifie la saturation en eau.

L : direction longitudinale.

R : direction radiale.

T : direction tangentielle.

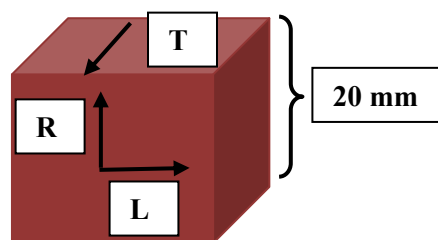


Fig III.8 : Éprouvette de bois (20*20*20).

Les graphes suivants présentent la variation massique et dimensionnelle dans les trois directions (longitudinal, radial et transversale), des trois bois étudiés, le pin d'Alep, le chêne zeen (aubier et duramen) et l'eucalyptus (aubier et duramen), en fonction du nombre du temps en jours (séjours dans l'eau).

Tableau III.2 : Evolution massique des essences étudiées en fonction du temps.

essence Temps (jours)	Masse pin d'Alep (g)	Masse chaîne zeen aubier (g)	Masse chaîne zeen duramen (g)	Masse eucalyptus aubier (g)	Masse eucalyptus duramen (g)
1	4,168	8,37	7,72	9,85	5,26
2	6,198	8,87	8,5	10,41	7,07
3	6,518	9,23	8,73	10,72	7,92
4	6,743	9,46	8,89	10,97	8,37
5	6,875	9,61	9,1	11,1	8,68
6	7,013	9,79	9,18	11,22	8,98
7	7,125	10,05	9,37	11,27	9,18
8	7,232	10,03	9,4	11,31	9,4
9	7,38	10,09	9,41	11,38	9,45
10	7,478	10,12	9,41	11,42	9,52
11	7,534	10,13	9,47	11,46	9,59
12	7,638	10,18	9,47	11,46	9,59

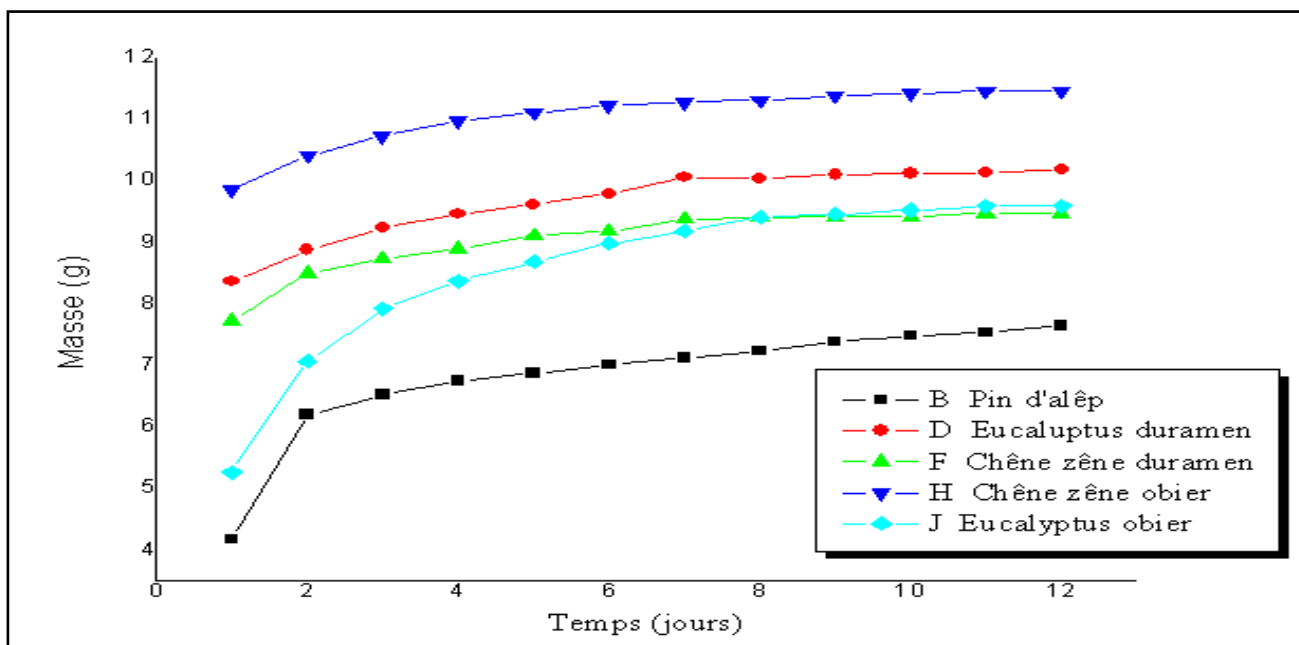


Fig III.9 : Evolution de la masse des trois essences en fonction du temps (absorption).

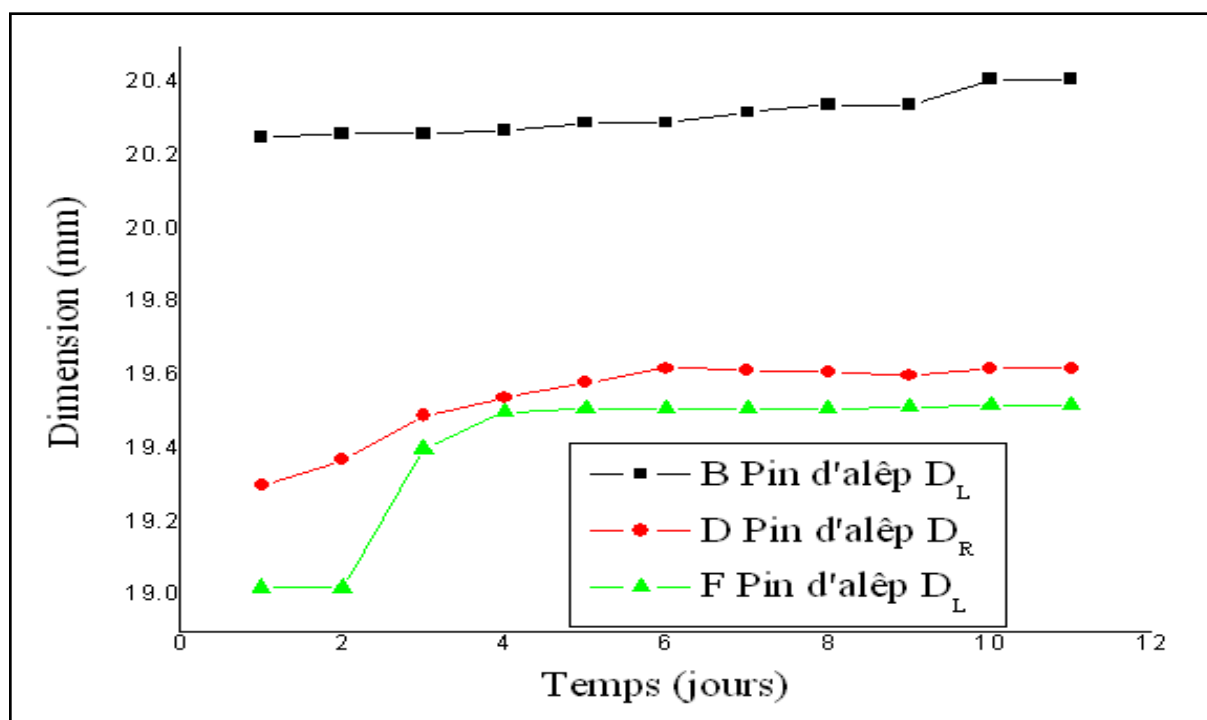
Le tableau suivant représente la variation dimensionnelle dans les trois directions principales (longitudinale, radiale et tangentielle) des trois essences en fonction du temps de séjours dans l'eau.

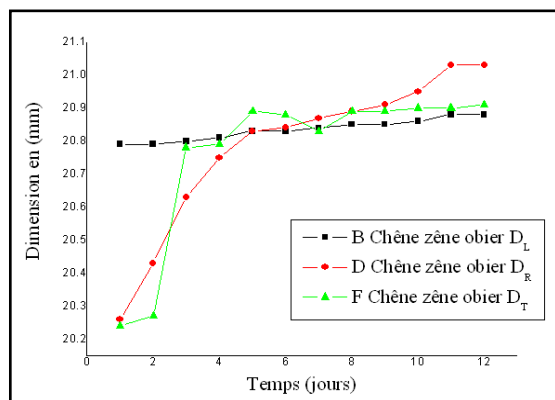
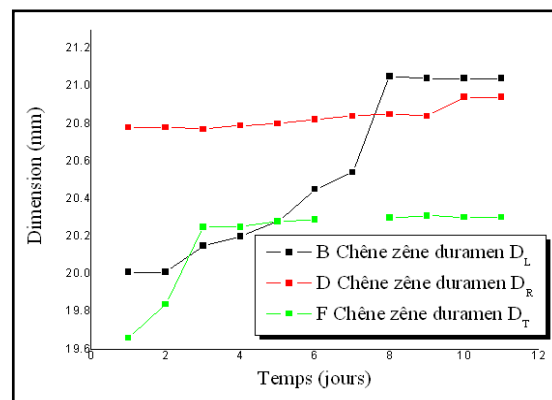
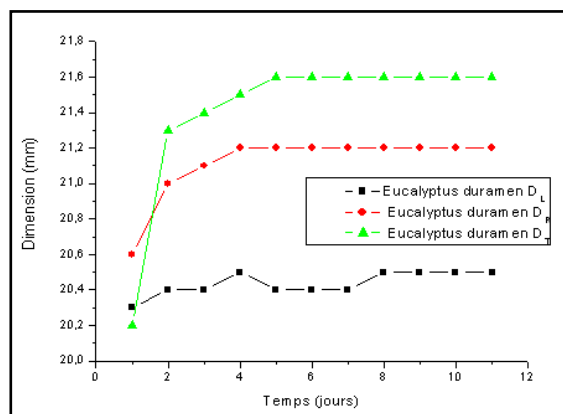
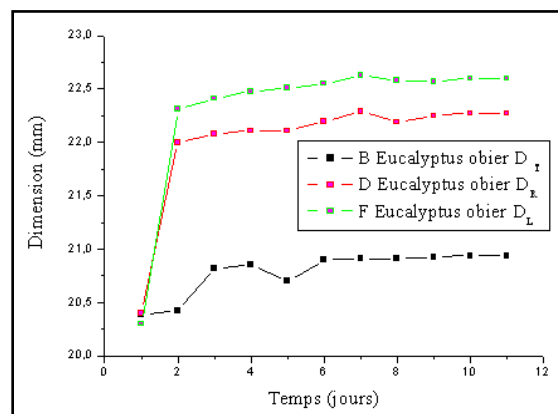
Tableau III.3 : Variations dimensionnelles des essences (pin d'Alep, chêne zen issu d'aubier et du duramen).

Essences	Pin D _L (mm)	Pin D _R (mm)	Pin D _T (mm)	Cz aubier D _L (mm)	Cz aubier D _R (mm)	Cz aubier D _T (mm)	CZ duramen D _L (mm)	CZ duramen D _R (mm)	CZ duramen D _T (mm)
Temps (j)									
1	20,25	19,3	19,02	20,79	20,26	20,24	20,01	20,78	19,66
2	20,26	19,37	19,02	20,79	20,43	20,27	20,01	20,78	19,84
3	20,26	19,49	19,4	20,8	20,63	20,78	20,15	20,77	20,25
4	20,27	19,54	19,5	20,81	20,75	20,79	20,2	20,79	20,25
5	20,29	19,58	19,51	20,83	20,83	20,89	20,28	20,8	20,28
6	20,29	19,62	19,51	20,84	20,87	20,83	20,45	20,82	20,29
7	20,32	19,614	19,51	20,85	20,89	20,89	20,54	20,84	20,29
8	20,34	19,61	19,51	20,85	20,91	20,89	21,05	20,85	20,3
9	20,34	19,6	19,514	20,86	20,95	20,9	21,04	20,84	20,31
10	20,41	19,62	19,52	20,88	21,03	20,9	21,04	20,94	20,302
11	20,41	19,62	19,52	20,88	21,03	20,91	21,04	20,94	20,302

Tableau III.4 : Variations dimensionnelles d'eucalyptus issu d'aubier et du duramen).

Essences	EC aubier D_L (mm)	EC aubier D_R (mm)	EC aubier D_T (mm)	EC duramen D_L (mm)	EC duramen D_R (mm)	EC duramen D_T (mm)
Temps (j)						
1	20,39	20,4	20,3	20,28	20,61	20,18
2	20,42	22	22,31	20,44	20,96	21,3
3	20,82	22,08	22,41	20,44	21,1	21,43
4	20,85	22,11	22,48	20,47	21,16	21,47
5	20,7	22,11	22,51	20,45	21,17	21,56
6	20,9	22,194	22,55	20,44	21,19	21,57
7	20,91	22,29	22,63	20,45	21,2	21,57
8	20,91	22,19	22,58	20,47	21,2	21,58
9	20,92	22,25	22,57	20,48	21,2	21,59
10	20,94	22,27	22,6	20,52	21,21	21,61
11	20,94	22,27	22,6	20,52	21,21	21,61

**Fig III.10 :** Dimension (D_L, D_R, D_T) pin d'alêp.


Fig III.11: Dimension (D_L, D_R, D_T) chêne zeen aubier.

Fig III.12: Dimension (D_L, D_R, D_T) chêne zeen duramen.

Fig III.13 : Dimension (D_L, D_R, D_T) eucalyptus aubier.

Fig III.14: Dimension (D_L, D_R, D_T) eucalyptus duramen.

Ce tableau représente les résultats du gonflement longitudinal, radial et transversal des trois essences étudiées :

Tableau III.5 : Gonflement longitudinal, radial et tangential.

Bois	Gof _L (%)	Gof _R (%)	Gof _T (%)
Pin d'Alep	0,79	1,65	2,62
Chêne zeen aubier	0,43	3,80	3,90
Chêne zeen duramen	5,14	0,76	3,26
Eucalyptus aubier	2,69	9,16	11,33
Eucalyptus duramen	1,18	2,91	7,08

III.2.2.1. Remarque

D'après les résultats obtenus et représentés graphiquement on remarque :

- Les trois espèces de bois (pin d'Alep, chêne zeen et l'eucalyptus) ont augmenté en poids.
- De même en termes de dimension dans les trois directions (longitudinales, radiales et transversales).
- L'allure de la variation massique et dimensionnelle, varie d'une espèce à une autre, aussi de l'obier au duramen d'une même espèce.
- L'allure de variation est importante au début, et s'affaiblie vers la fin de l'essai.

III.2.2.2. Interprétation des résultats

L'augmentation du poids des éprouvettes des trois essences est due à l'absorption de l'eau dont ils ont été immergés. Ce qui confirme le caractère hydrophobe du matériau bois. Cela est relié directement à la masse volumique et la densité du bois, car dans notre cas le pin ayant une masse volumique de $0,57 \text{ g/cm}^3$, a augmenté en poids de presque de 48% de son poids avant immersion dans l'eau.

La variation dimensionnelle dans les trois directions, est expliquée par le caractère orthotrope du matériau bois, car le matériau bois est un matériau fibreux, qu'est un ensemble de fibres naturelles tissées dans les trois directions, selon des ongles différentes d'une direction à une autre. Cela aussi sous l'influence des propriétés physique telle que la masse volumique, aussi la zone dans le bois est issue (soit de l'obier ou du duramen de l'arbre).

Pour l'allure qu'est rapide en début de l'essai, est due à une absorption rapide de l'eau à travers les pores du matériau. Et par la suite une diminution de cette allure jusqu'à arriver une stabilité de masse et de dimension, cela est expliqué par la presque saturation du matériau en eau.

III.3. Détermination du retrait longitudinal, radial et transversal de chaque espèce

Après avoir obtenu des masses constantes des éprouvettes ($20 \times 20 \times 20$), ces dernières sont mises dans une étuve de séchage à 100 C^0 . On a suivi l'évolution massique et dimensionnelle des éprouvettes après chaque jour de séchage, jusqu'à obtention des masses et des dimensions inchangées, ce qui correspond à une évacuation de l'eau libre absorbée par les éprouvettes.



Fig III.15: Éprouvettes de bois ($20 \times 20 \times 20$) dans l'étuve de séchage.

Les résultats obtenus sont représentés dans le graphique suivant, qui mentionne l'évolution massique des éprouvettes qu'ont subi un séchage à 100 C° dans une étuve de séchage, la perte de masse des trois essences sont représentées dans les tableaux suivants :

Tableau III.6 : Evolution massique des essences étudiées en fonction du temps au cours du séchage.

essence Temps (jours)	Masse pin d'Alep (g)	Masse chêne zeen aubier (g)	Masse chêne zeen duramen (g)	Masse eucalyptus aubier (g)	Masse eucalyptus duramen (g)
1	7,638	10,18	9,47	11,38	9,59
2	3,633	5,86	5,38	4,668	4,363
3	3,617	5,861	5,279	4,69	4,365
4	3,617	5,849	5,279	4,69	4,35
5	3,628	5,846	5,125	4,69	4,35
6	3,614	5,833	5,156	4,68	4,35
7	3,6	5,55	5,17	4,68	4,35
8	3,59	5,541	5,069	4,68	4,35
9	3,603	5,545	5,07	4,67	4,35
10	3,6	5,25	5,079	4,66	4,35
11	3,6	5,07	5,074	4,65	4,35
12	3,6	5,07	5,07	4,65	4,35

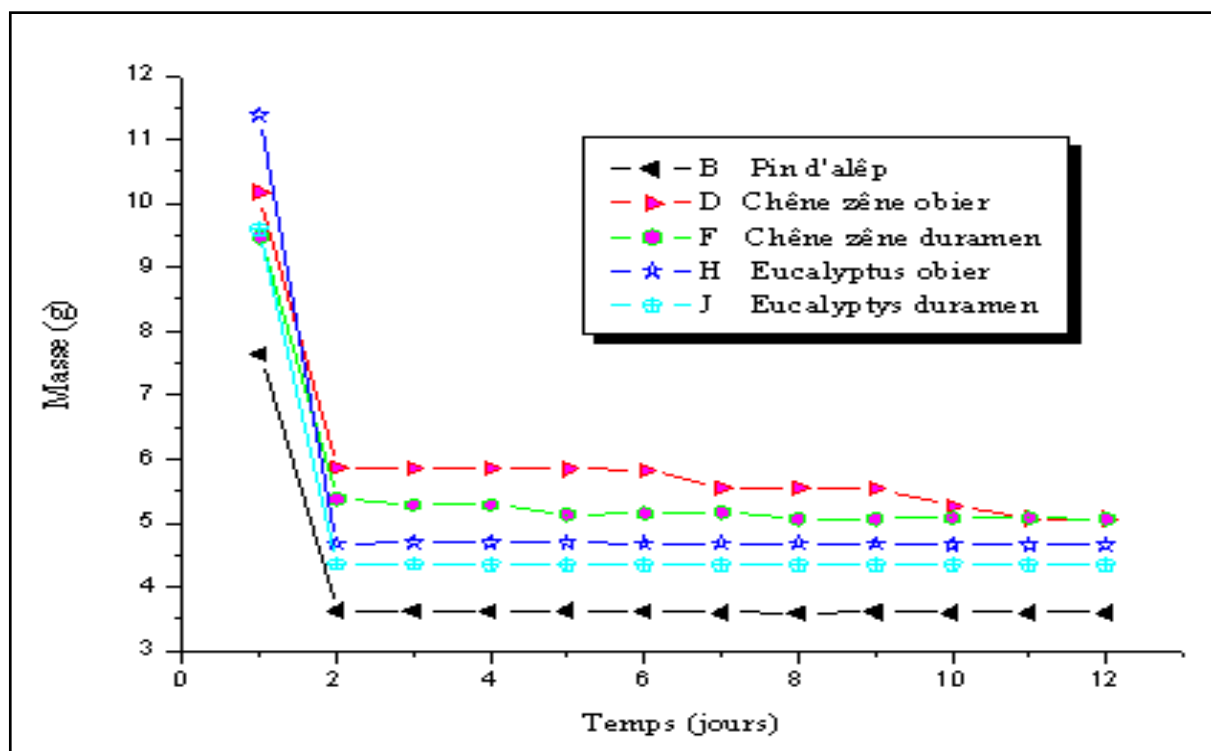


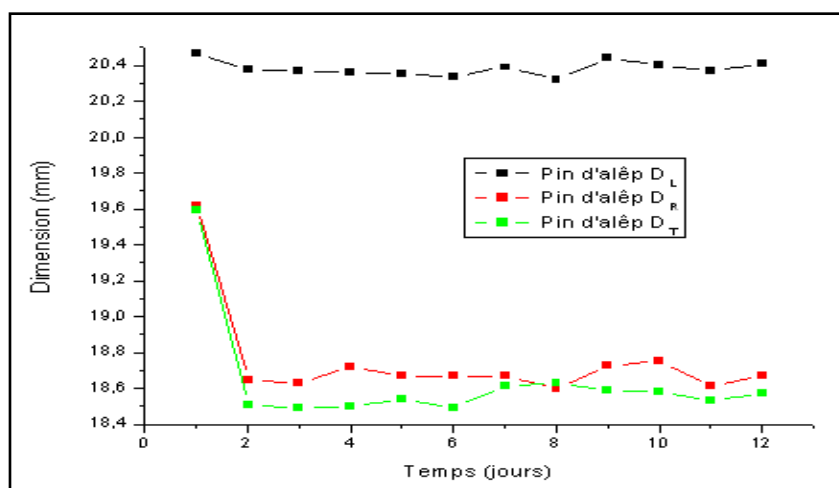
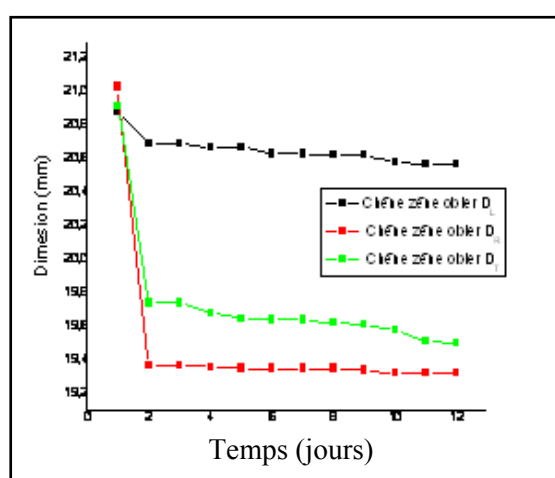
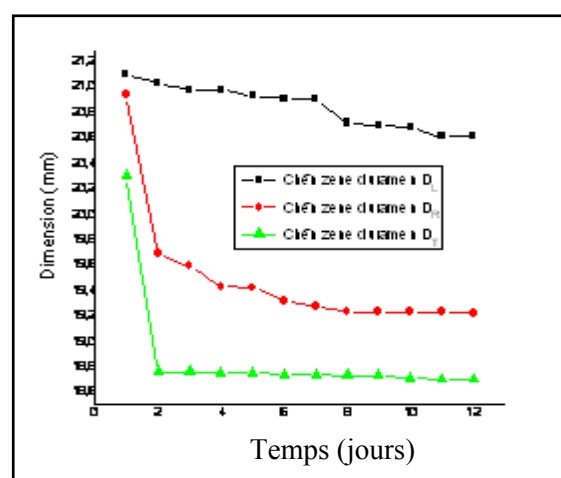
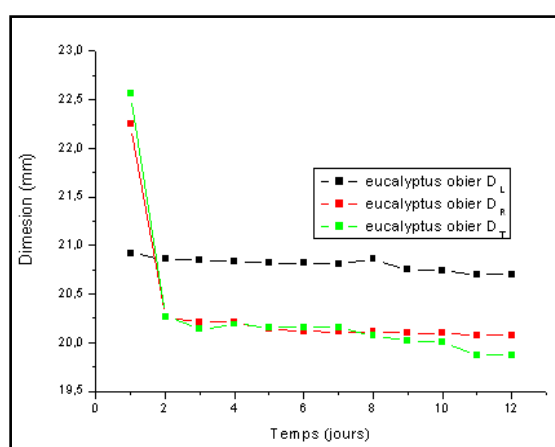
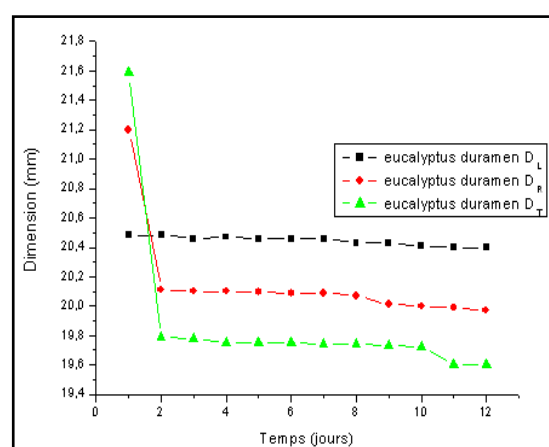
Fig III.16 : Evolution massique en fonction du temps (lors du séchage).

Tableau III.7 : Variations dimensionnelles des essences (pin d'Alep, chêne zeen issu d'aubier et du duramen) au cours du séchage.

Essences	Pin D _L (mm)	Pin D _R (mm)	Pin D _T (mm)	Cz Aubier D _L (mm)	Cz Aubier D _R (mm)	Cz Aubier D _T (mm)	CZ Duramen D _L (mm)	CZ Duramen D _R (mm)	CZ Duramen D _T (mm)
Temps (j)									
1	20,47	19,62	19,59	20,88	21,03	20,91	21,1	20,94	20,302
2	20,38	18,65	18,51	20,69	19,37	19,74	21,03	19,69	18,76
3	20,37	18,63	18,49	20,69	19,37	19,74	20,98	19,59	18,76
4	20,36	18,72	18,5	20,67	19,36	19,68	20,98	19,43	18,75
5	20,35	18,67	18,54	20,67	19,35	19,65	20,93	19,42	18,75
6	20,34	18,67	18,49	20,63	19,35	19,64	20,91	19,32	18,74
7	20,39	18,67	18,61	20,63	19,35	19,64	20,91	19,28	18,74
8	20,32	18,6	18,63	20,62	19,35	19,62	20,72	19,23	18,73
9	20,44	18,73	18,59	20,62	19,34	19,61	20,7	19,23	18,73
10	20,4	18,75	18,58	20,58	19,32	19,58	20,68	19,23	18,71
11	20,37	18,61	18,53	20,57	19,32	19,51	20,61	19,23	18,7
12	20,41	18,67	18,57	20,57	19,32	19,5	20,61	19,22	18,7

Tableau III.8 : Variation dimensionnelle d'eucalyptus issu d'aubier et du duramen.

Essences	EC Aubier D _L (mm)	EC Aubier D _R (mm)	EC Aubier D _T (mm)	EC Duramen D _L (mm)	EC Duramen D _R (mm)	EC Duramen D _T (mm)
Temps (j)						
1	20,92	22,25	22,57	20,48	21,2	21,59
2	20,86	20,26	20,27	20,48	20,11	19,79
3	20,85	20,21	20,14	20,46	20,1	19,78
4	20,84	20,21	20,19	20,47	20,1	19,75
5	20,82	20,14	20,16	20,46	20,096	19,75
6	20,82	20,12	20,16	20,46	20,09	19,75
7	20,81	20,11	20,16	20,46	20,09	19,74
8	20,86	20,11	20,07	20,43	20,07	19,74
9	20,75	20,1	20,02	20,43	20,01	19,73
10	20,74	20,1	20,01	20,41	20	19,72
11	20,7	20,08	19,87	20,4	19,99	19,6
12	20,7	20,08	19,87	20,4	19,97	19,6

Fig III.17 : Dimension (D_L, D_R, D_T) pin d'Alep.Fig III.18 : Dimension (D_L, D_R, D_T) chêne zeen aubier.Fig III.19 : Dimension (D_L, D_R, D_T) chêne zeen duramen.Fig III.20 : Dimension (D_L, D_R, D_T) eucalyptus aubier.Fig III.21 : Dimension (D_L, D_R, D_T) eucalyptus duramen.

Ce tableau représente les résultats du retrait longitudinal, radial et transversal des trois essences étudiées :

Tableau III.9 : Retrait longitudinal, radial et tangentiel.

Bois	R _L (%)	R _R (%)	R _T (%)
Pin d'Alep	0,29	4,84	5,20
Chêne zeen aubier	1,48	8,13	6,74
Chêne zeen duramen	2,32	8,21	7,89
Eucalyptus aubier	1,05	9,75	11,96
Eucalyptus duramen	0,39	5,80	9,21

III.3.1. Remarque

D'après les résultats obtenus sur les éprouvettes ayant subi un séchage, on note :

- Une perte de masse pour les trois type de bois, d'une façon importante dans le premier jour d'essai, car le pin d'Alep a perdu 52,42% de sa masse, 42,43% pour le chêne zeen obier, 38,05 pour le duramen, pour l'eucalyptus obier et duramen 59,05%, 54,53% successivement.
- Le retrait des trois type de bois est plus important dans les directions tangentielle, radiale que dans la direction longitudinale.
- Présence des valeurs aberrantes dans les graphiques.

III.3.2. Interprétation

La perte de masse des éprouvettes ayant subi un séchage, est du à la perte d'eau libre absorbée, qu'est présente dans les pores de la structure des éprouvettes, ce qui confirme le caractère de libération d'eau lorsque le bois subi un séchage.

Les retraits des trois bois n'est pas le même dans les trois directions, il est important dans les directions tangentielle et radiale que dans la direction longitudinale, cela est expliquer par l'anisotropie du matériau bois, qui n'a pas les propriétés dans les trois directions (la direction des fibres de bois, la distance entre les fibres).

L'apparition des valeurs aberrantes dans les graphes est du, à l'absorption d'eau de l'humidité de l'air, lorsque on retire les éprouvettes de l'étuve de séchage.

III.4. Détermination des modules de Young

Essais de flexion trois points : Les essais de flexion trois points sont effectués selon la norme (NA.604/1990) [14], réalisés sur les trois types d'éprouvettes (sans entaille, avec entaille ($a_1 = 4 \text{ mm}$, $a_2 = 8 \text{ mm}$), issues des trois essences étudiées (le pin d'alép, le chêne zeen et l'eucalyptus) au niveau du laboratoire des matériaux minéraux et composite (LMMC).



Fig III.22 : Image du labo à partir de l'espace, éprouvettes et réalisation de l'essai flexion trois points.

III.4.1. Résultats

Les résultats obtenus à partir des essais de flexion trois points sur les trois types de bois étudiés 'ayant pas une entaille et les entailles a_1 et a_2 sont représentés sur les graphes suivants :

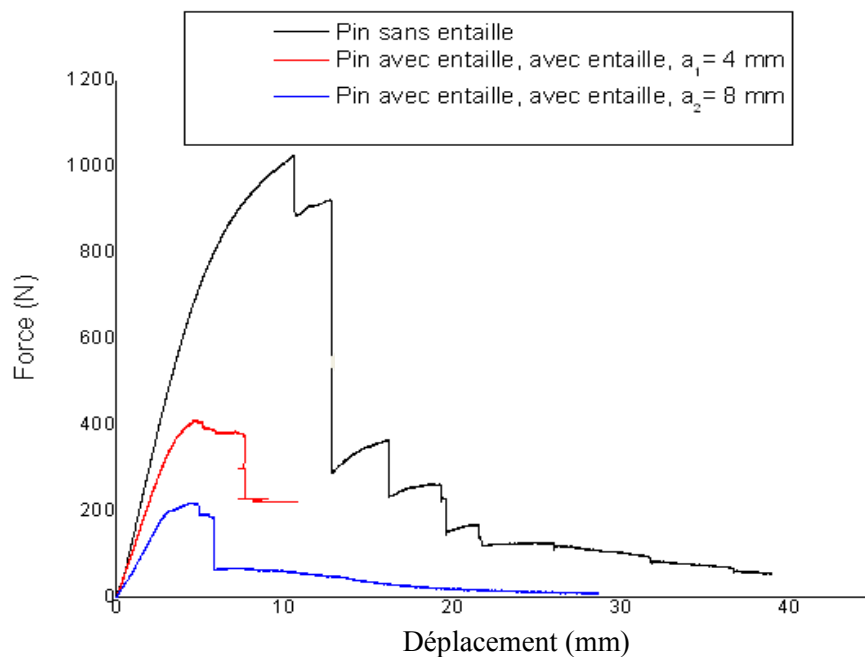


Fig III.23 : Courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois pin d'Alep sans entaille, avec entaille $a_1 = 4 \text{ mm}$, et $a_2 = 8 \text{ mm}$.

III.4.2. Remarque

- La force maximum de la rupture est de 1010,51 N, pour l'éprouvette sans entaille, qui diminue de 60,71%, pour l'éprouvette avec $a_1 = 4$ mm, et de 79,07% pour l'éprouvette avec une entaille $a_2 = 8$ mm, par rapport à l'éprouvette sans entaille.
- On constate une partie qui est presque linéaire (domaine élastique), suivie d'une chute de la force appliquée (domaine non linéaire).
- Une légère augmentation de la force appliquée dans le domaine non linéaire.

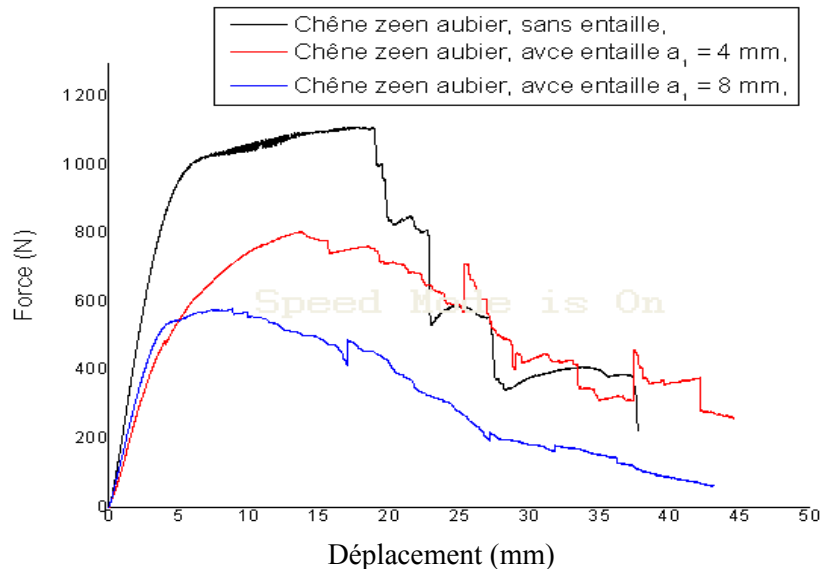


Fig III.24 : Courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois chêne zeen aubier, sans entaille, avec entaille $a_1 = 4$ mm, et $a_2 = 8$ mm.

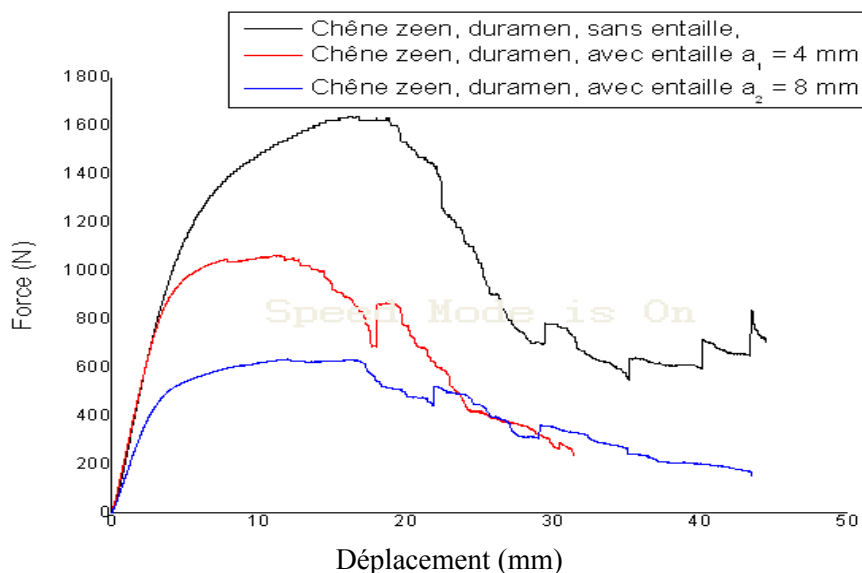


Fig III.25 : Courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois chêne zeen duramen, sans entaille, avec entaille $a_1 = 4$ mm, et $a_2 = 8$ mm.

III.4.3. Remarque

- La force maximum de la rupture est de 1113,18 N, pour l'éprouvette du chêne zeen issue de l'obier sans entaille, qui diminue de 27,67%, pour l'éprouvette avec $a_1 = 4$ mm, et de 47,9% pour l'éprouvette avec une entaille $a_2 = 8$ mm comparant à celle sans entaille, et pour ceux issues du duramen le force maximum de la rupture est de 1640N, qui chute de 35,11% pour celle ayant une entaille $a_1 = 4$ mm, et 61,27% pour celle ayant une entaille de $a_2 = 8$ mm, par rapport à l'éprouvette non fissurée.
- On constate une partie qui est presque linéaire (domaine élastique), suivie d'une chute de la force appliquée (domaine non linéaire).
- Une légère augmentation de la force appliquée dans le domaine non linéaire.

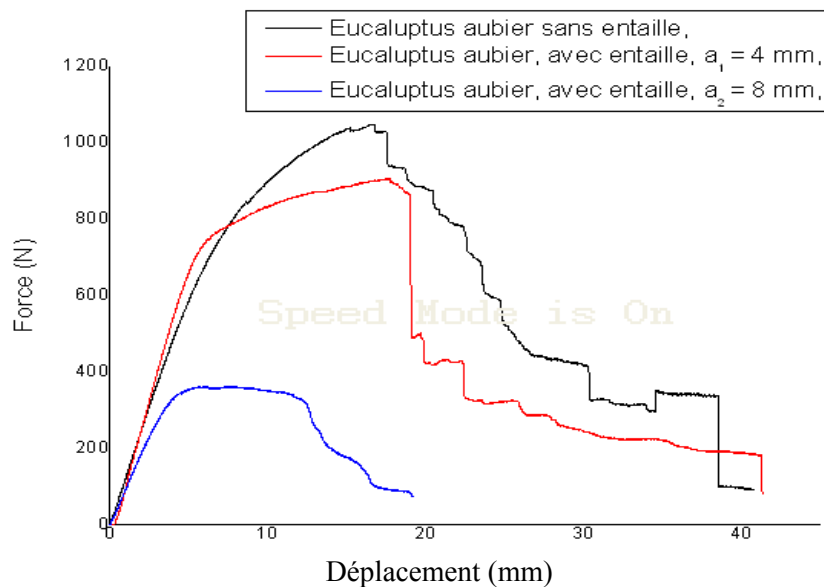


Fig III.26 : Courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois eucalyptus aubier, sans entaille, avec entaille $a_1 = 4$ mm, et $a_2 = 8$ mm.

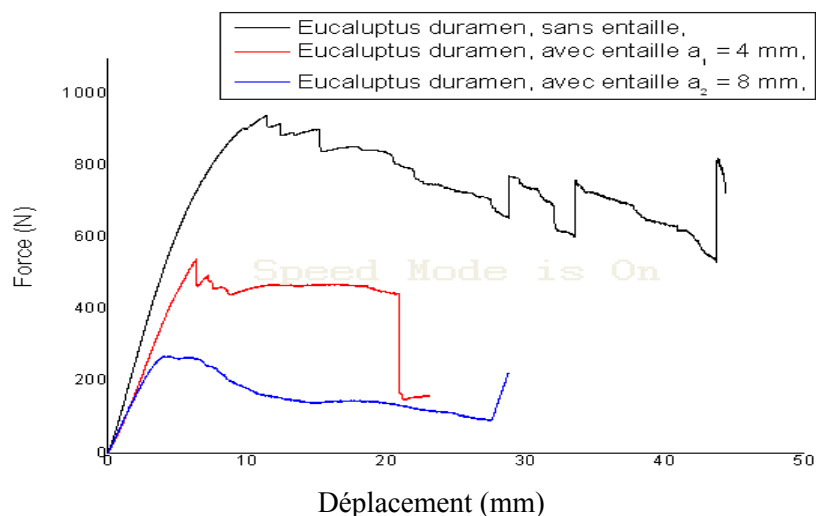


Fig III.27 : Courbes flexion trois points force en fonction du déplacement du bois eucalyptus duramen, sans entaille, avec entaille $a_1 = 4$ mm, et $a_2 = 8$ mm

III.4.4. Remarque

- La force maximum de la rupture est de 1047,69 N, pour l'éprouvette sans entaille issue de l'obier, diminuant de 13,57%, pour l'éprouvette avec $a_1 = 4$ mm, et de 65,55% pour l'éprouvette avec une entaille $a_2 = 8$ mm.
- On constate une partie qui est presque linéaire (domaine élastique), suivie d'une chute de la force appliquée (domaine non linéaire).
- Une légère augmentation de la force appliquée dans le domaine non linéaire.

III.4.5. Interprétation

D'après les résultats obtenus à partir des essais de flexion trois points sur les différentes éprouvettes réalisées, la diminution de la force à la rupture en fonction de l'augmentation de la profondeur de l'entaille, est expliquée par la présence de l'entaille qui affaiblit la structure en diminuant le nombre de fibres qui participent à la résistance de l'éprouvette, c'est-à-dire les fibres de bois qui donnent la résistance mécanique du bois se trouvent diminuées dans une éprouvette avec entaille $a_1 = 4$ mm, par rapport à l'éprouvette sans entaille, ce qui fragilise la structure de plus en plus que la profondeur de l'entaille augmente.

Aussi on peut dire que le bois a un comportement linéaire, ce qui est noté dans la partie linéaire de la courbe force déplacement, et dans la partie non linéaire, un autre comportement qui est mou, ne se rompt pas rapidement.

III.5. Calcul des modules de Young, selon la norme (ISO 14125:1998) (F) [15]

En exploitant les graphes force déplacements, obtenus à partir des éprouvettes sans entailles des trois types de bois étudiés (pin d'Alep, chêne zen issu de l'obier et du duramen, ainsi que l'eucalyptus issu de l'obier et du duramen) on essaye de calculer les modules de Young des différents types de bois.

Dans l'essai de flexion trois points :

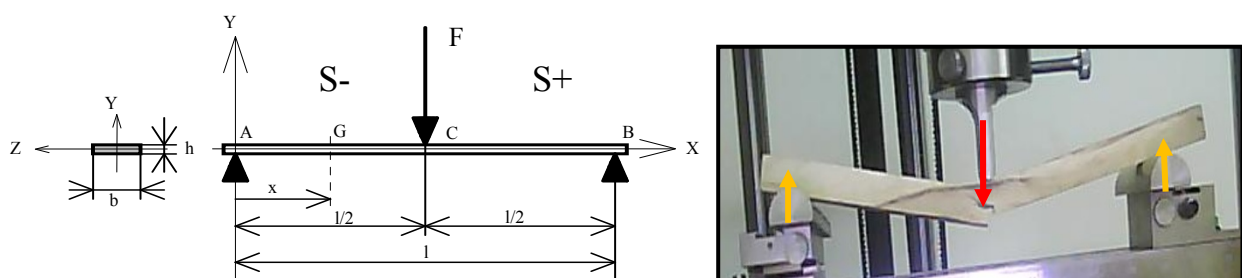


Fig III.28 : Schéma et photos, essai flexion trois points.

Pour le mesurage du module en flexion, calculer les flèches s' et s'' , exprimées en millimètres, de la poutre en son milieu correspondant aux valeurs données de déformation en flexion $s'f = 0,0005$ et $s''f = 0,0025$, à l'aide de l'équation suivante:

$$S' = \frac{\varepsilon_f' L^2}{6h} \text{ et } S'' = \frac{\varepsilon_f'' L^2}{6h} \dots\dots\dots(1) \quad [15].$$

Où :

S' et S'' sont les flèches, en millimètres, de la poutre en son milieu;

ε_f' et ε_f'' sont les déformations en flexion, dont les valeurs sont données ci-dessus.

Calculer le module d'élasticité en flexion E_f , exprimé en méga pascals, à l'aide de l'équation (2) suivante :

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{\Delta F}{\Delta S} \right) \dots\dots\dots(2) \quad [15]$$

Où :

L : distance entre les appuis ;

B : épaisseur de l'éprouvette ;

H : hauteur de l'éprouvette ;

Δs est la variation de flèche entre S'' et S' ;

ΔF est la variation de force entre F'' pour la flèche s'' et F' pour la flèche s'.

En exploitant les courbes force déplacements, obtenus de l'essai flexion trois points des éprouvettes non entaillées.

Le calcul de s' et s'', à partir de l'équation (1) précédente on trouve :

$$S' = 0,326 \text{ mm}, S'' = 1,633 \text{ mm}.$$

A partir des courbes force déplacement, obtenues à partir de l'essai flexion trois points sur éprouvettes du pin d'Alep, les valeurs s' et s'' correspondent aux forces :

$$F' = 36,57 \text{ N}, F'' = 249,03 \text{ N}.$$

On remplace les valeurs dans l'équation (2), on obtient le module de Young par flexion suivant :

$E_L = 5575,65 \text{ Mpa}.$

Les valeurs des modules de Young, des trois essences sans entaille, pin d'Alep, eucalyptus (obier et le duramen), et le chêne zen (aubier et duramen) sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau III.10 : Valeur de s' , s'' , F' , F'' , E_L .

	s' (mm)	s'' (mm)	F' (N)	F'' (N)	Module de Young I E_L (Mpa)
Pin sans entaille	0,326	1,633	36,57	249,03	5575,65
Chêne zeen aubier sans entaille	0,326	1,633	59,207	380,05	8419,98
Chêne zeen duramen sans entaille	0,326	1,633	57,7	422	9560,43
Eucalyptus aubier sans entaille	0,326	1,633	38,42	204,29	4352,97
Eucalyptus duramen sans entaille	0,326	1,633	35,69	209,93	4565,54

III.5.1. Remarques : Les modules de Young obtenus sont compris entre 4352,97 et 9560,43 Mpa.

D'après la littérature (thèse doctorale de l'institut national des sciences appliquées de Lyon présentée par Tawfik Mahmoud ayant le thème (étude de matériaux renforcé par des fibres organique en vue de leurs utilisation dans le renforcement et la réparation des ouvrages tels que les ponts), y'a une relation approximative, qui relie le module de Young longitudinal et les autres modules, radiales et transversales, qu'est la suivante :

$$E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1.6 : 1 ; G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9.4 : 1 ; E_L : G_{LR} \approx 14 :$$

Tableau III.11. Valeur des différents modules élastiques.

Bois	E_L(Mpa)	E_R(Mpa)	E_T(Mpa)	G_{LR}(Mpa)	G_{LT}(Mpa)	G_{RT}(Mpa)
Pin d'Alep	5575,65	446,05	420,99	398,26	5241,11	557,56
Chêne zeen (aubier)	8419,98	673,59	420,99	601,42	7914,78	841,99
Chêne zeen (duramen)	9560,43	764,83	478,02	682,88	8986,80	956,04
Eucalyptus (aubier)	4352,97	348,23	217,64	310,92	4091,79	435,29
Eucalyptus (duramen)	4565,54	365,24	228,27	326,11	4291,60	456,55

III.6. Détermination des énergies de rupture J (N*m)

On exploitant les courbes force déplacement obtenues, lors des essais de flexion trois points des trois essences ayant une entaille $a_1 = 4\text{mm}$, $a_2 = 8\text{mm}$, on calculant la surface située entre les deux courbes force déplacement. Pour se faire un outil de calcul graphique à été utilisé (**origin 7.5**). Il permet de calculer l'aire en utilisant l'option (analyses, calculat, intégral).

	A[M]	B[M]	C[M]	D[M]	E[M]	F[M]	G[M]	H[M]	I[M]
1	Course trav	Force stand							
2	mm	N							
3	1,46E-5	1,26E-8							
4	0,86E-5	-0,43538							
5	0,00186	1,30613							
6	0,00364	1,26E-8							
7	0,00519	-0,43538							
8	0,00682	0,87075							
9	0,00852	1,30613							
10	0,01015	0,87075							
11	0,01178	2,61226							
12	0,01356	3,04764							
13	0,01504	2,17688							
14	0,01681	2,61226							
15	0,01837	2,61226							
16	0,02014	1,74151							
17	0,02184	3,48301							
18	0,02355	3,48301							
19	0,02517	3,48301							
20	0,02688	4,78914							
21	0,0285	5,22452							
22	0,03021	3,48301							
23	0,03183	5,6599							
24	0,03354	5,6599							
25	0,03516	4,78914							
26	0,03679	6,09528							
27	0,03857	6,96603							

Fig III-29 : Interface de travail origin 7.5.

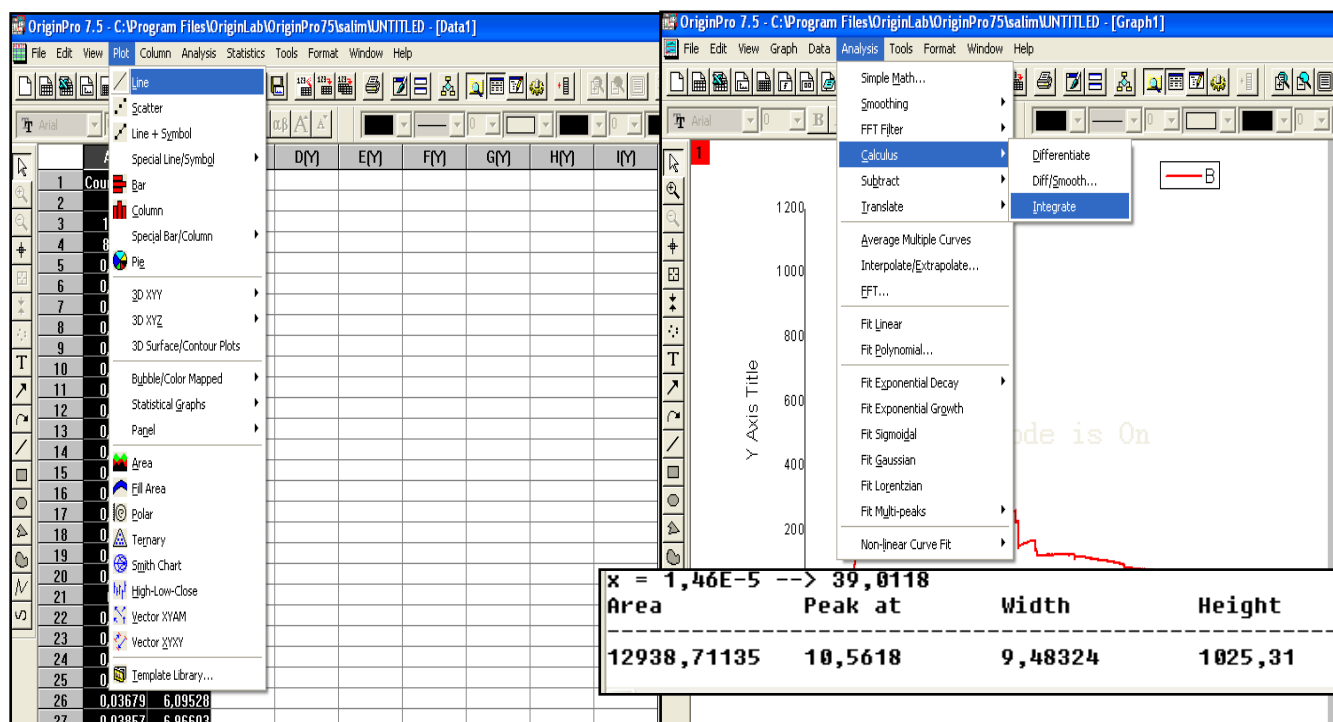


Fig III.30. Tracemet de la courbe et calcul de la surface sous la courbe force déplacement.

Les résultats obtenus sont en (N*mm), c'est les valeurs de J (énergie de rupture), on la divise sur l'épaisseur de l'éprouvette ($e = 20\text{mm}$) fois la profondeur de l'entaille, qui donne le taux de restitution d'énergie G en (joule/mm^2). les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

$G = (U_1 - U_2) / e * (a_2 - a_1)$, ou : U_1 : énergie de rupture de l'éprouvette avec entaille $a_1 = 4\text{mm}$, U_2 : énergie de rupture de l'éprouvette avec entaille $a_2 = 8\text{mm}$, e : épaisseur de l'éprouvette (20mm), a_1 , a_2 : profondeur d'entaille (4 et 8mm successivement).

Tableau III.12. Les valeurs du taux de restitution d'énergie G (J/m^2).

Bois	U en (N*mm)	ΔU entre a_1 et a_2 en (J/m^2)	ΔU entre a_1 et a_2 en (KJ/m^2)
Pin d'Alep sans entaille	12938,71	1589,40	1,58
Pin d'Alep $a_1=4\text{mm}$	2889,32		
Pin d'Alep $a_2=8\text{mm}$	1617,80		
CZ aubier SE	27494,54	12158,849	12,158
CZ aubier $a_1=4\text{mm}$	23736,54		
CZ aubier $a_2=8\text{mm}$	14009,46		
CZ Duramen SE	45673,06	5357,65	5,35
CZ Duramen $a_1=4\text{mm}$	22460,94		
CZ Duramen $a_2=8\text{mm}$	18174,82		
EC aubier SE	24027,02	18441,81	18,44
EC aubier $a_1=4\text{mm}$	19468,94		
EC aubier $a_2=8\text{mm}$	4715,49		
EC duramen SE	31319,48	5333,98	5,33
EC duramen $a_1=4\text{mm}$	8854,28		
EC duramen $a_1=8\text{mm}$	4587,09		

III.6.1. Remarque

On note que :

L'énergie de rupture est proportionnellement inversée à la profondeur de l'entaille.

Le taux de restitution d'énergie des bois chêne zen et l'eucalyptus issus de l'aubier sont supérieur que celle issus du duramen.

III.6.2. Interprétation

L'énergie de rupture est inversement proportionnelle à la profondeur de l'entaille, car il faut moins d'énergie pour rompre une éprouvette entaillée, ou une énergie moindre pour rompre une éprouvette ayant un entaille plus profond que l'autre, d'autre part, les éprouvettes ayant des profondeurs d'entaille de 8 mm, se trouvent moins cohésives, ce qui implique une énergie de cohésion moindre, par apport à celles ayant des profondeurs d'entaille de 4 mm.

L'énergie de rupture, pour les éprouvettes issues de l'aubier du bois se trouve élevée que celle trouvée pour les éprouvettes issues du duramen, cela est du à la structure de l'obier qu'est plus résistante que celle du duramen.

III.7. Calcule numérique [16]

III.7.1. Formules de calcul : En extrapolant les déplacements obtenus par EF :

On a: $K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{u}{K+1} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \right) \langle u_y \rangle$, Avec $k = 3-\nu$ en cas de déformation plane. Et

$u = \frac{E}{2(1+\nu)}$, E : module de Young ; ν : coefficient de poisson ; r : les coordonnées cylindrique des nœuds, et $\langle u_y \rangle$ est le déplacement nodal.

Et $\langle u_y \rangle = u_y(r, \pi) - u_y(r, -\pi)$ Déplacement d'ouverture de fissure

$$\text{Soit : } K_I = \frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \langle u_y \rangle$$

On calcul K_I aux deux points de fissure situant le plus proche du centre (nœud ayant comme abscisse 0.09E-01m) pour les éprouvettes avec entaille $a_2 = 9$ mm de la fissure et une abscisse de $a_1 = 4$ mm.

Voici un tableau des résultats obtenus :

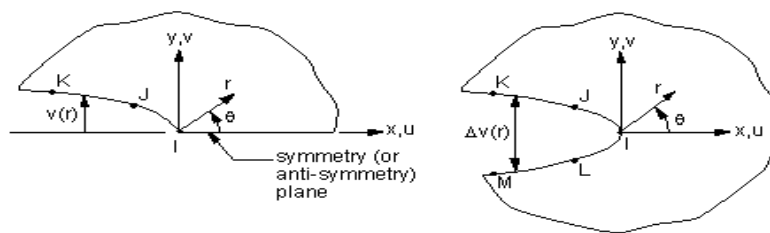


Fig III.31 : Représentation des nœuds avec élément finis.

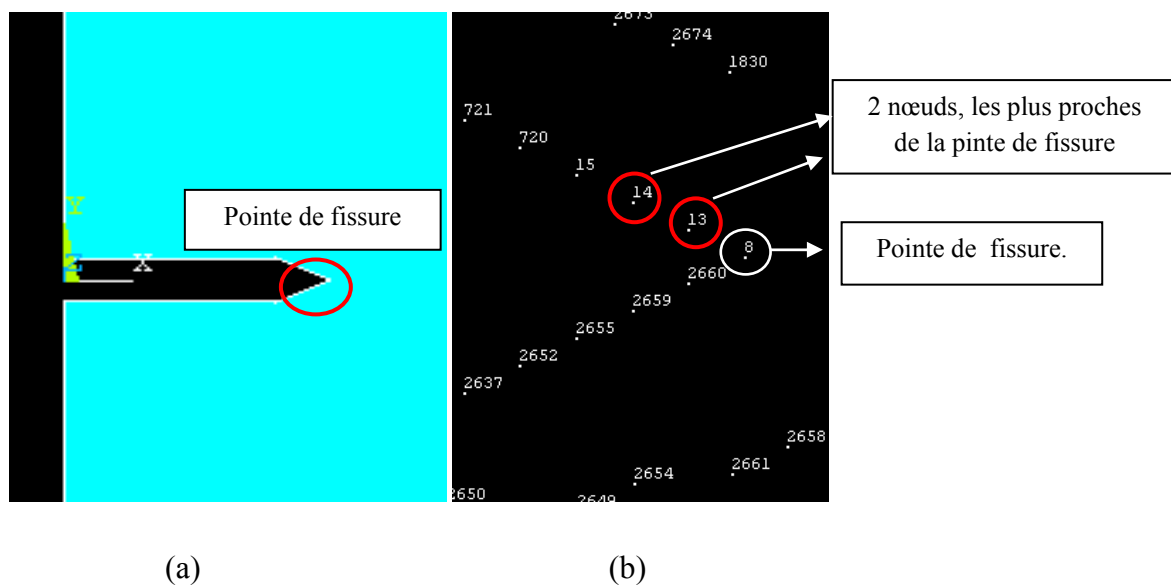


Fig III.32 : Représentation, (a) pointe de fissure, (b) les nœuds les plus proches de la pointe de fissure par outil numérique.

Tableau III.13 : Les valeurs des abscisses des nœuds les plus proches de la pointe de fissure, les coordonnées cylindriques et les déplacements selon l'axe y obtenus par outil numérique.

	Nœuds les plus proche du fond de la fissure	Abscisse nodale (m)	$R = x_2 - x_i$ (m)	u_y (m)	$[u_y] = 2 u_y$ (m)	K_I (Mpa.m ^{1/2})
Pin d'Alep 8mm	114	$0.89 \cdot 10^{-2}$	$0.63 \cdot 10^{-4}$	$0.34 \cdot 10^{-2}$	$0.68 \cdot 10^{-2}$	1660.07
Pin d'Alep 8mm	115	$0.88 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-3}$	$0.36 \cdot 10^{-2}$	$0.72 \cdot 10^{-2}$	1250
Pin d'Alep 4mm	13	$0.49 \cdot 10^{-2}$	$0.62 \cdot 10^{-4}$	$0.28 \cdot 10^{-2}$	$0.56 \cdot 10^{-2}$	1377.87
Pin d'Alep 4mm	14	$0.48 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-3}$	$0.29 \cdot 10^{-2}$	$0.59 \cdot 10^{-2}$	1023.9
Chêne zeen aubier 8 mm	114	$0.89 \cdot 10^{-2}$	$0.63 \cdot 10^{-4}$	$0.58 \cdot 10^{-2}$	$1.16 \cdot 10^{-2}$	4242.65
Chêne zeen aubier 8 mm	115	$0.88 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-2}$	$0.61 \cdot 10^{-2}$	$1.23 \cdot 10^{-2}$	1429.42
Chêne zeen aubier 4 mm	106	$0.49 \cdot 10^{-2}$	$0.62 \cdot 10^{-4}$	$0.79 \cdot 10^{-2}$	$0.15 \cdot 10^{-1}$	5818.72
Chêne zeen aubier 4 mm	107	$0.48 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-3}$	$0.80 \cdot 10^{-2}$	$0.16 \cdot 10^{-1}$	4155.41
Chêne zeen duramen 8 mm	114	$0.89 \cdot 10^{-2}$	$0.62 \cdot 10^{-4}$	$0.57 \cdot 10^{-2}$	$0.11 \cdot 10^{-1}$	4799.91
Chêne zeen duramen 8 mm	115	$0.88 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-3}$	$0.61 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-1}$	3601.56
Chêne zeen duramen 4 mm	13	$0.49 \cdot 10^{-2}$	$0.62 \cdot 10^{-4}$	$0.45 \cdot 10^{-2}$	$0.91 \cdot 10^{-2}$	3820.03
Chêne zeen duramen 4 mm	14	$0.48 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-3}$	$0.47 \cdot 10^{-2}$	$0.95 \cdot 10^{-2}$	2819.55
Eucalyptus aubier 8 mm	114	$0.89 \cdot 10^{-2}$	$0.62 \cdot 10^{-4}$	$0.70 \cdot 10^{-2}$	$0.14 \cdot 10^{-1}$	2654.82
Eucalyptus aubier 8 mm	115	$0.88 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-3}$	$0.74 \cdot 10^{-2}$	$0.14 \cdot 10^{-1}$	1992.34
Eucalyptus aubier 4 mm	106	$0.49 \cdot 10^{-2}$	$0.62 \cdot 10^{-4}$	$0.19 \cdot 10^{-2}$	$0.38 \cdot 10^{-1}$	7280.76
Eucalyptus aubier 4 mm	107	$0.48 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-3}$	$0.18 \cdot 10^{-2}$	$0.22 \cdot 10^{-1}$	3013.77
Eucalyptus duramen 8 mm	114	$0.89 \cdot 10^{-2}$	$0.62 \cdot 10^{-4}$	$0.53 \cdot 10^{-2}$	$0.10 \cdot 10^{-1}$	2127.62
Eucalyptus duramen 8 mm	115	$0.88 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-3}$	$0.56 \cdot 10^{-2}$	$0.11 \cdot 10^{-1}$	1596.66
Eucalyptus duramen 4 mm	106	$0.49 \cdot 10^{-2}$	$0.62 \cdot 10^{-4}$	$0.11 \cdot 10^{-1}$	$0.22 \cdot 10^{-1}$	4398.76
Eucalyptus duramen 4 mm	107	$0.48 \cdot 10^{-2}$	$0.12 \cdot 10^{-3}$	$0.11 \cdot 10^{-1}$	$0.15 \cdot 10^{-1}$	2230.96

A partir du tableau, en utilisant la formule suivante, on calcul les valeurs du coefficient de concentration de contrainte, qui sont représentés dans le tableau suivant :

Pour chaque nœud on aura deux valeurs de K :

En considérant que K suit une loi linéaire en fonction de r de type $K=a.r + B$ on pourra trouver K pour $r=0$. Soit $K=B$, en utilisant l'affichage de la courbe de tendance sur Excel [17].

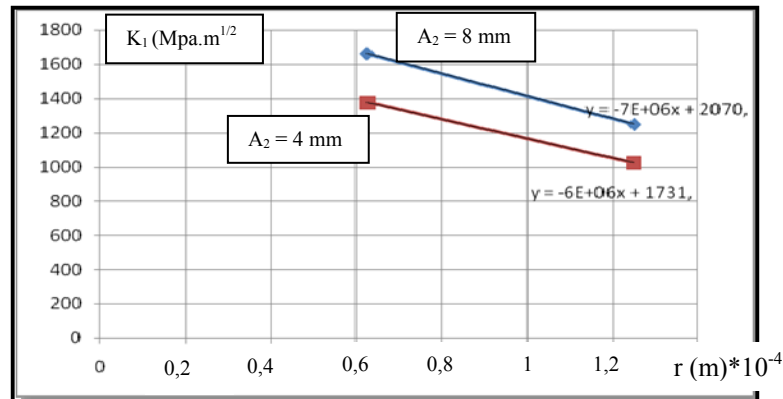
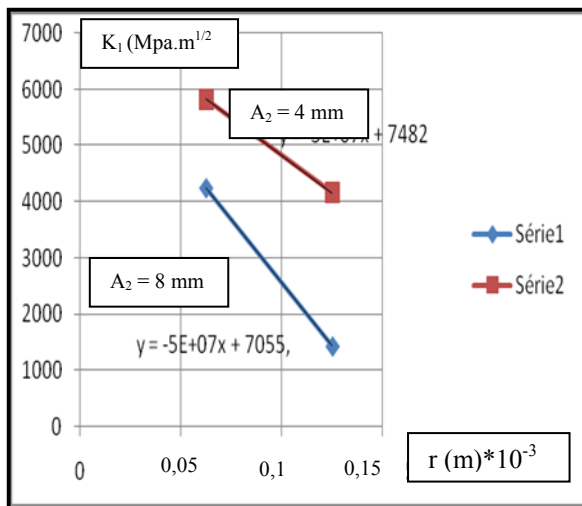


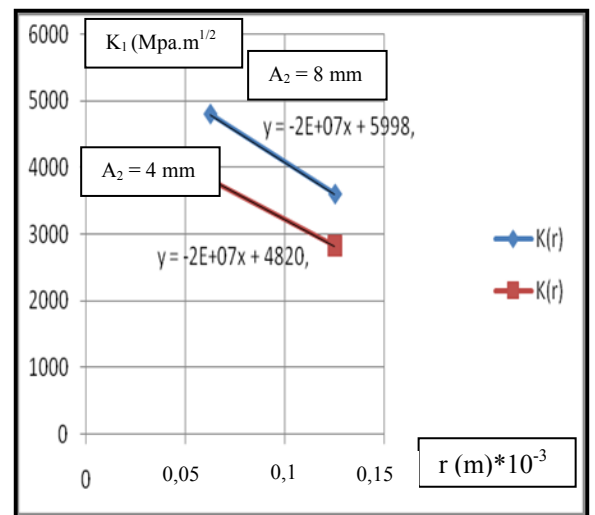
Fig III.34 : Représentation pin d'Alep, K en fonction de r $K=f(r)$.

En calculant K pour $r=0$ on trouve :

$K = 2070 \text{ Mpa.m}^{1/2}$. pour l'essence du pin d'Alep ayant une profondeur d'entaille de $a_2 = 8 \text{ mm}$.



(a)



(b)

Fig III.35 : Représentation chaîne zen, K en fonction de r $K=f(r)$. (a) aubier, (b) duramen.

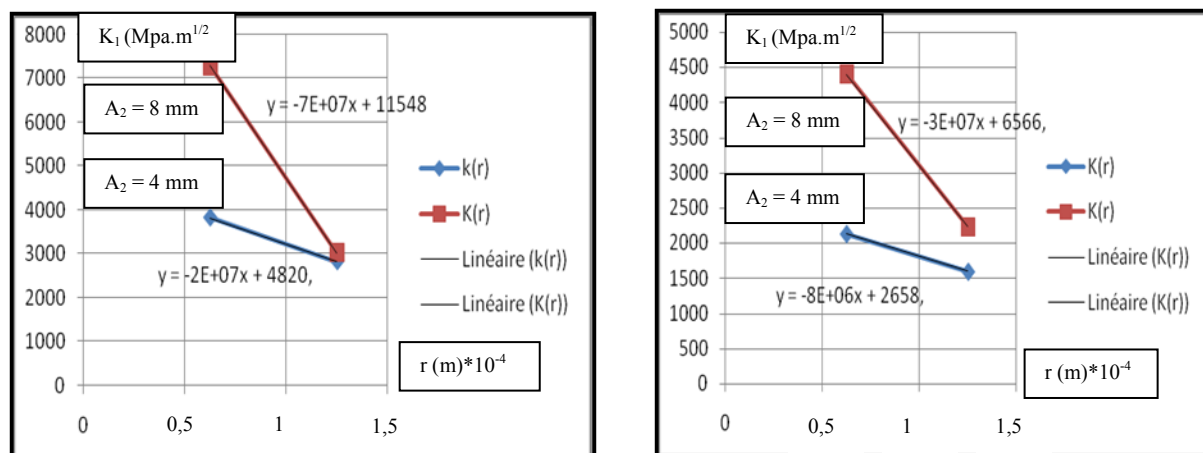


Fig III.36 : Représentation eucalyptus, K en fonction de r $K = f(r)$. (a) aubier, (b) duramen.

Le coefficient de concentration de contrainte K est donné aussi en fonction du taux de restitution d'énergie G, par la relation suivante $G = \frac{K^2}{E_L}$, E_L : le module de Young longitudinale.

Les valeurs du coefficient de concentration de contraintes de chaque essence en fonction de la profondeur d'entaille sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.14 : Valeurs de K_1 (Mpa.m^{1/2}), G (J/m²).

	K (Mpa.m^{1/2})	G (KJ/m²)
Pin d'Alep 8mm	2070	0,23
Pin d'Alep 4mm	1731	
Chêne zeen aubier 8 mm	7055	1,28
Chêne zeen aubier 4 mm	7782	
Chêne zeen duramen 8 mm	5598	0,84
Chêne zeen duramen 4 mm	4820	
Eucalyptus aubier 8 mm	3317	28,11
Eucalyptus aubier 4 mm	11548	
Eucalyptus duramen 8 mm	6566	0,84
Eucalyptus duramen 4 mm	2658	

Dans le tableau suivant on résumé les résultats expérimentaux et numériques du taux de restitution d'énergie G, jusqu'à la rupture et ceux à la limite élastique :

Tableau III.15 : Valeurs de G (KJ/m^2), jusqu'à la rupture, à la limite élastique, et celles par outil numérique.

	G (KJ/m^2) jusqu'à la rupture.	G (KJ/m^2) à la limite élastique	G (KJ/m^2) obtenu par outil numérique.
Pin d'Alep	1,58	0,72	0,23
Chêne zen aubier	12,15	4,78	1,28
Chêne zen duramen	5,35	4,58	0,84
Eucalyptus aubier	18,44	13,28	28,11
Eucalyptus duramen	5,33	1,33	7,89

III.7.2. Interprétation des résultats

Lors du calcul numérique du coefficient de concentration de contrainte des différentes essences étudiées, on obtenu des résultats comparables aux résultats trouver dans la littérature, on peut citer les valeurs du taux de restitution d'énergie obtenu par TRIBOULOT et PLUVINAGE, dans leurs travaux sur la détermination du taux de restitution d'énergie G , qui se situent entre (0.3 et 6.2) KJ/m^2 [1], dans notre travaille on a trouvé des valeurs entre 1.58 et 5.35 KJ/m^2 , sauf le cas des éprouvettes du chaine zen et l'eucalyptus issues de l'aubier, sont de 12.15 KJ/m^2 , 18.44 KJ/m^2 respectivement. Cela nous induit à dire que lors de la comparaison des résultats on peut juste se prononcer sur la grandeur des ces dernier, vu la différence notée dans les protocoles d'essais (conditions, nature de la matière, la géométrie des éprouvettes).

Pour les résultats obtenus par l'outil numérique du taux de restitution d'énergie, qui sont plus comparable dans le domaine élastique, car dans le domaine non linéaire la mécanique élastique de la rupture cesse d'être utilisée, laissant la place aux relations de la mécanique non linéaire, l'outil numérique donne les coefficients de concentration de contrainte dans le domaine élastique, qui se rapproche des résultats obtenus expérimentalement. Aussi cet outil nous donne axé à plusieurs valeurs telles que les déplacements, les contraintes dans les trois directions, ainsi que des schémas colorés représentant les différentes constantes mécaniques.

Autres résultats

L'outil de numérique, nous donne accès à plusieurs constantes, qui peuvent être visionnées sous plusieurs formes, numérique ou image, même comme vidéo.

Les images suivantes représentent la distribution des contraintes des éprouvettes sans entaille, avec entaille $a_1 = 4 \text{ mm}$ et $a_2 = 8 \text{ mm}$, selon les axes x et y :

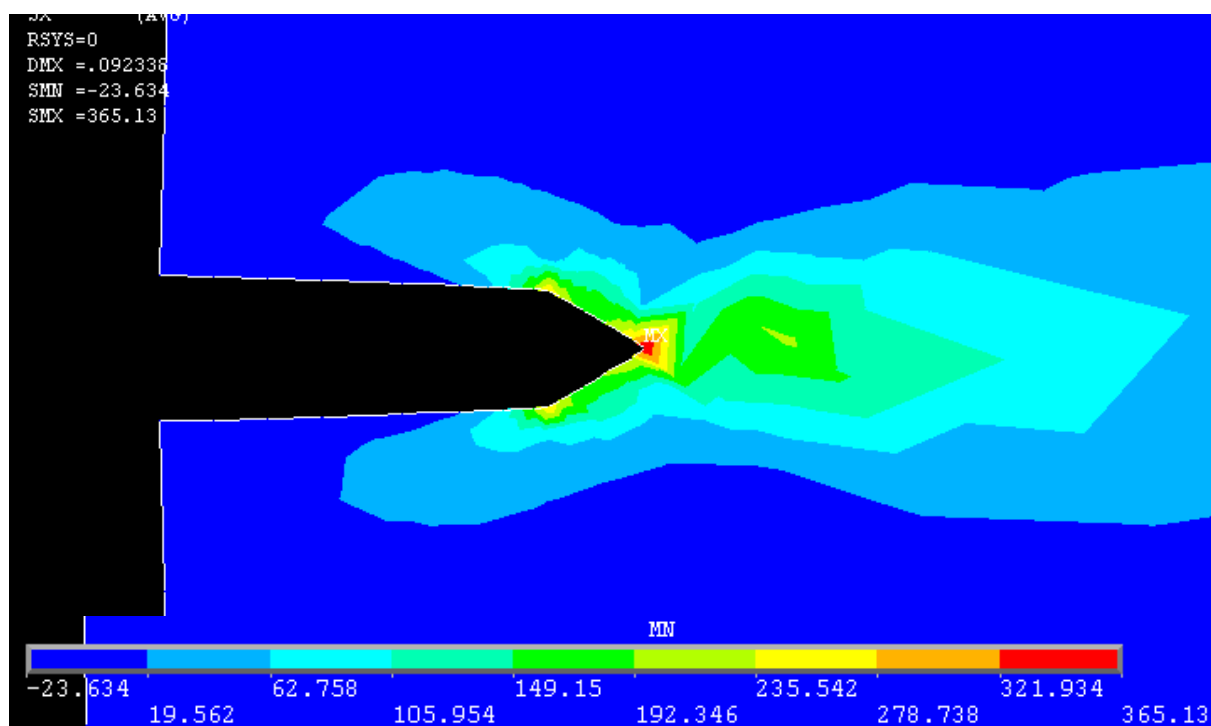


Fig III.37 : Contrainte selon x, pin avec entaille $a_1 = 4$ mm.

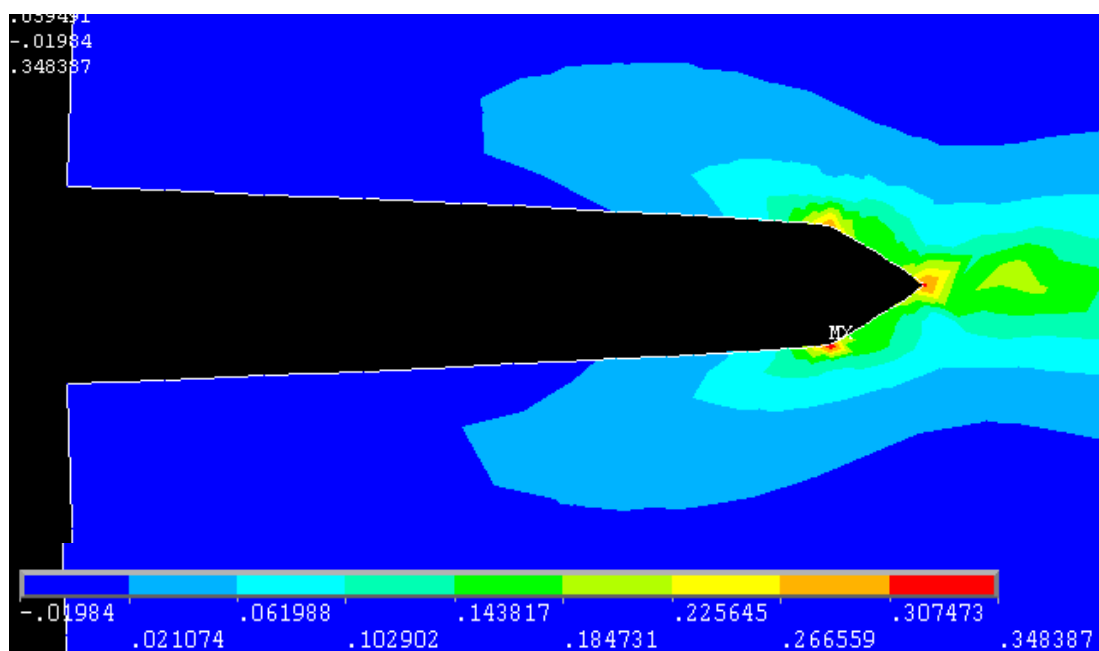


Fig III.38 : Contrainte selon x, pin avec entaille $a_1 = 8$ mm.

Conclusion :

Ce travail nous a permis, de :

Caractériser physiquement, les trois essences Algériennes à savoir le pin d'Alep, le chêne zen et l'eucalyptus, dont la masse volumique du pin d'Alep est de $0,57 \text{ g/cm}^3$, $0,8 \text{ g/cm}^3$, pour le chêne zen, et $0,65 \text{ g/cm}^3$ pour l'essence d'eucalyptus, et des gonflements

De suivre une démarche expérimentale, du prélèvement à la réalisation des éprouvettes sous différentes formes, destinées aux essais mécaniques. Les essais de flexion trois points effectués sur éprouvettes normalisées ($20 \times 20 \times 340 \text{ mm}$) nous a permis de calculer le module de Young longitudinal des trois essences de bois étudiés.

Les essais de flexion trois points, sur éprouvettes entaillées, nous ont permis, d'une part de constater, l'influence de la profondeur d'entaille sur le comportement mécanique des essences étudiées, car la limite de rupture diminue en fonction de l'augmentation de la profondeur de la fissure. Aussi l'exploitation des courbes forces-déplacement obtenues, nous a permis de quantifier les énergies induisant, la déformation plastique, jusqu'à la rupture.

Les valeurs du taux de restitution d'énergie (G) en (J/m^2) obtenues, varient de 1,58 à 5,35 KJ/m^2 , Dont leurs superpositions aux résultats trouvés dans la littérature, (travaux de TRIBOULOT et PLUVINAGE) sur la détermination du taux de restitution d'énergie du matériau bois, sont comparables à leurs résultats (0,3 et 6,2) KJ/m^2 .

Le paramètre du taux de restitution d'énergie (G), est comparé aux forces de frottement empêchant l'avancement de la fissure pour la création de nouvelles surfaces, sous l'effet des contraintes extérieures. Car pour le pin d'Alep on a obtenu 1,58 KJ/m^2 , ce qui signifie ; pour créer une surface de 1 m^2 , il faut fournir une énergie de 1580 joule.

Le calcul du taux de restitution d'énergie (G), par l'outil numérique obtenu par la notation des déplacements nodaux, ainsi que les abscisses des deux nœuds les plus proches de la pointe de fissure réalisée dans la structure. Nous a permis de faire les constats suivants :

Les valeurs, sont plus proches des valeurs obtenues dans le domaine élastique, ce qui permet de dire, d'après la littérature sur la mécanique de la rupture, que l'outil numérique donne les valeurs du taux de restitution d'énergie dans le domaine élastique. Et au-delà d'autres formules régissant le domaine non linéaire seront appliquées.

*Conclusion
générale et
perspectives*

Conclusion générale :

Ce travail nous a permis de :

Caractériser physiquement, les trois essences de bois Algériens à savoir le pin d'Alep, le chêne zen et l'eucalyptus, leurs masses volumiques varient de 0,57 à 0,80 g/cm³. Ainsi que des gonflements totaux acceptables pour les deux essences du pin d'Alep et du chêne zen, ce qui permet leurs utilisations dans la construction vu leur stabilité vis-à-vis l'humidité, par contre un retrait important noté pour l'essence d'eucalyptus, ce qui rend difficile son utilisation dans la construction, mais son utilisation dans d'autre domaine est possible, telle que l'industrie des palettes d'emballage.

La démarche expérimentale suivie basée sur les essais de flexion trois points nous a permis le calcul des modules de Young longitudinaux des trois essences de bois étudiés.

Les essais de flexion trois points, sur éprouvettes entaillées, nous permet d'une part de constater, l'influence de la profondeur d'entaille sur le comportement mécanique des essences étudiées, car la limite de rupture diminue en fonction de l'augmentation de la profondeur de la fissure de même l'exploitation des courbes forces-déplacement obtenues, nous a permis de quantifier les énergies induisant, la déformation plastique, jusqu'à la rupture.

Les valeurs du taux de restitution d'énergie (G) en (J/m²) obtenues, varient de 1.58 à 5.35 KJ/m², leurs superpositions aux résultats de la littérature, (travaux de TRIBOULOT et PLUVINAGE) sur la détermination du taux de restitution de l'énergie du matériau bois, sont comparables (0.3 et 6.2) KJ/m². Ce paramètre, le taux de restitution d'énergie (G), est comparé aux forces de frottement empêchant l'avancement de la fissure pour la création de nouvelles surfaces, sous l'effet des contraintes extérieures. Pour le pin d'Alep on a obtenu 1,58 KJ/m², ce qui signifie ; pour créer une surface de 1m², il faut fournir une énergie de 1580 joule.

Les valeurs du taux de restitution d'énergie (G), obtenus par l'outil numérique, par la notation des déplacements nodaux, ainsi que les abscisses des deux nœuds les plus proches de la pointe de fissure dans la structure, sont plus proches des valeurs obtenues dans le domaine élastique. Car l'outil numérique donne les valeurs du coefficient de concentration de contrainte et le taux de restitution d'énergie dans le domaine élastique, d'autre part, on a fait le calcul numérique en deux dimensions, ce qui explique la différence dans les résultats expérimentaux et numériques.

Recommandations et perspectives :

Les éprouvettes destinées aux essais de flexion trois points, sont usinées dans la direction longitudinale-radiale, on aurait aimé réaliser d'autre éprouvettes dans les directions longitudinale-transversale, afin de mieux comprendre le comportement vis-à-vis la fissuration dans tous les directions, vu le caractère orthotrope du matériau bois. Ainsi que une détermination des constantes de la rupture à savoir les coefficients de concertations de contraintes et les taux de restitution d'énergie, par l'outil numérique en trois dimensions permet de mieux simulé la réalité de l'essai.

*Références
bibliographiques*

Références Bibliographiques :

- [1] **P. TRIBOULOT, P. JODIN, G. PLUVINAGE** (Ann. Sci. Forest, 1982, 39(1), 63-76) (Mesure des facteurs d'intensité de contrainte critiques et des taux de restitution d'énergie dans le bois sur éprouvettes entaillées (Laboratoire de Fiabilité mécanique Faculté des Sciences, Université de Metz lie du Saulcy).
- [2] **POLIANA DIAS de MORAES (2003)**, (Influence de la température sur les assemblages en bois) thèse doctorale.
- [3] **LAURA CLINOVSKI, FABRICE LANTHEAMME**, Thèse " l'Homme et le bois" (1997), sous la coordination D'OLIVIER PICHARD, 1995.
- [4] **Jessome, A.P.** 1977. Résistance et constantes élastiques des bois indigènes au Canada. Laboratoire des Produits Forestiers de l'Est. Rapport Technique de Foresterie. Ottawa, Ontario.
- [5] **Guitard, D.** 1987. Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues Editions. Toulouse, France.
- [6] **FABIEN DAURIAC**, "Suivi multi-échelle par télédétection et spectroscopie de l'état hydrique de la végétation méditerranéenne pour la prévention du risque de feu de forêt". Thèse paris Tech école doctorale Terre, Eau, Univers, discipline science de l'eau, 2004.
- [7] **G.PLUVINAGE**, livre (rupture du bois et ses composites), **Référence : 263 I.S.B.N. : 2.85428.292.2, Rubrique(s) : Mécanique – Physique**, 304 pages, 1992.
- [8] **CARMEN MARIELLA de la CRUZ SANCHEZ**, 2006 (mesure des constantes élastiques du bois épinette noire dans des conditions d'équilibre du séchage à basse température).
- [9] **MOHSSINE MOUTEE, Juin 2006** (modélisation du comportement du bois au cours du séchage).
- [10] **Goulet, M. et G. Veer.** 1975. Pressions d'affaissement à température ambiante des bois de chêne, de bouleau et d'épinette. Note technique N°7. Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval.
- [11] **Gerhards, C.C.** 1982. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. Wood and Fiber, 14(1):4-36.
- [12] **PIERRE OLIVIER BOUCHARD, (2000)** thèse doctorat en science et génie de matériaux (contribution à la modélisation numérique en mécanique de la rupture en structure multi-matériaux). ENSMP-CEMEF Centre de mise en forme des matériaux, ENSMP.

[13] **JEANE CLAUDE CHARMET** mécanique du solide et des matériaux (élasticité, plasticité, rupture). Document concernant l'enseignement (Cours, TD, Préceptorats, TP) sur [http:](http://) Rubrique: Support de l'enseignement de mécanique des solide.

[14] Recueil de norme française AFNOR 1989.

[15] Norme européenne, NF EN ISO 14125 Juin 1998.

[16] Tutorial, logiciel de calcul numérique.

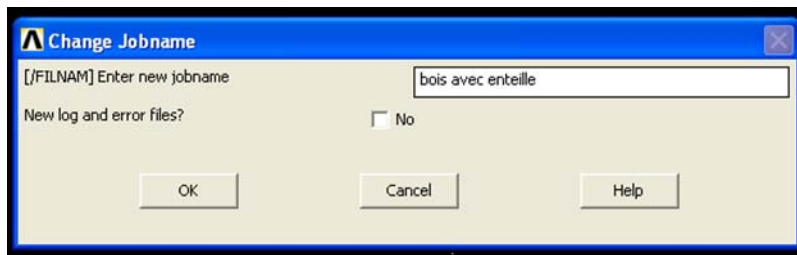
[17] **CHIAD Moustapha GERGES Youssef**, TP, Méthodes de dimensionnement Critères de tenue mécanique en fatigue Travaux Pratiques.

Annexe :

Annexe

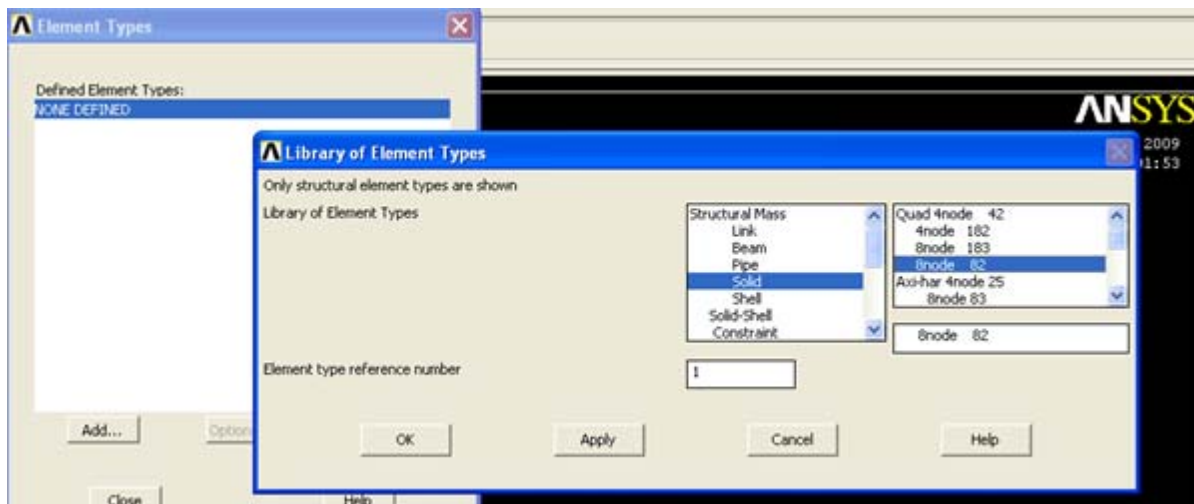
1 - Preprocessing :

On nomme le projet ; Utility Menu > File > Change Jobname.



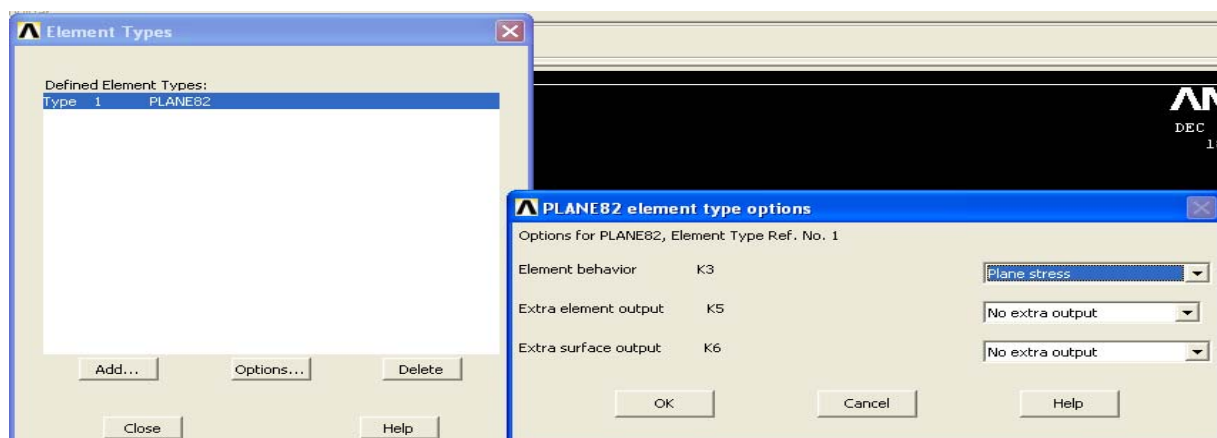
2. Définir l'élément :

Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete (l'élément choisi est solid 8 nœuds 82).



3 – choix du cas d'étude (contrainte plane),

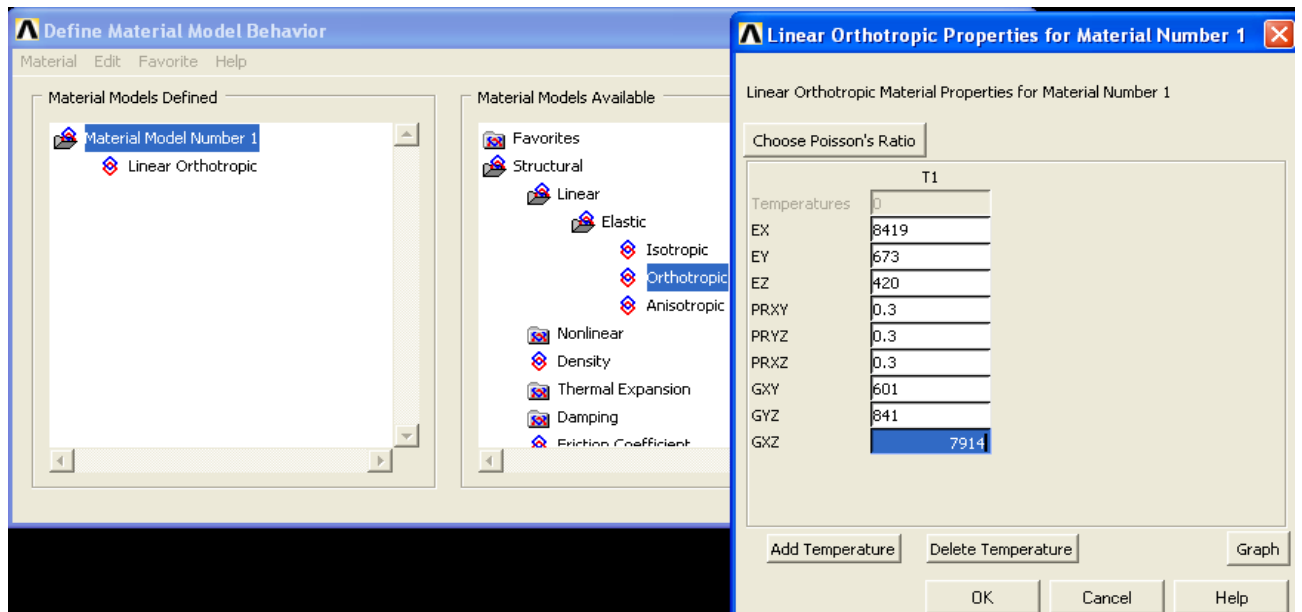
Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models.



Annexe

4 – Type de matériau:

Main Menu > Preprocessor > Material Props > Material Models.



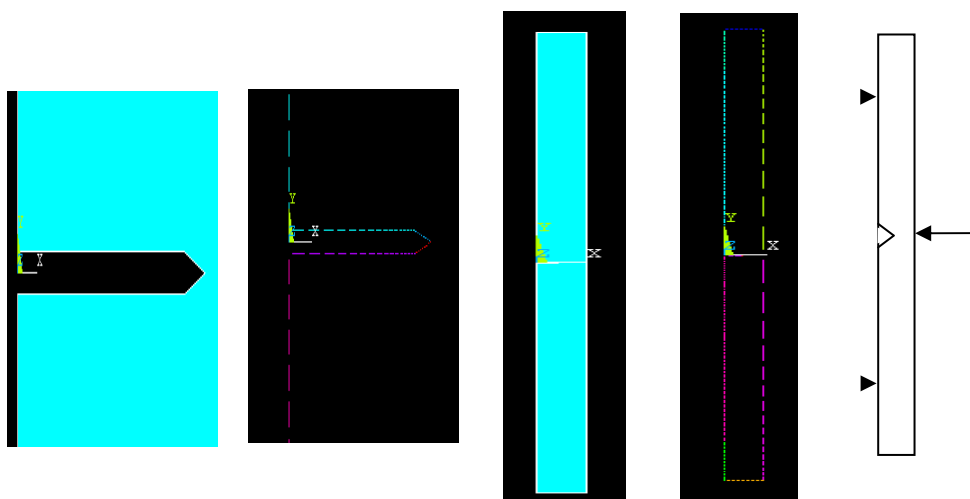
5 – Construction du model:

Définir les points :

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Key points > In Active CS.

Définir les lignes:

Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord.



Annexe

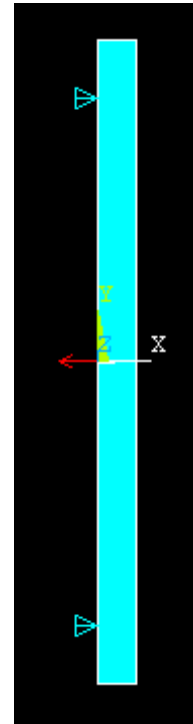
6 – Application des appuis et force :

Application des appuis :

Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > on keypoints.

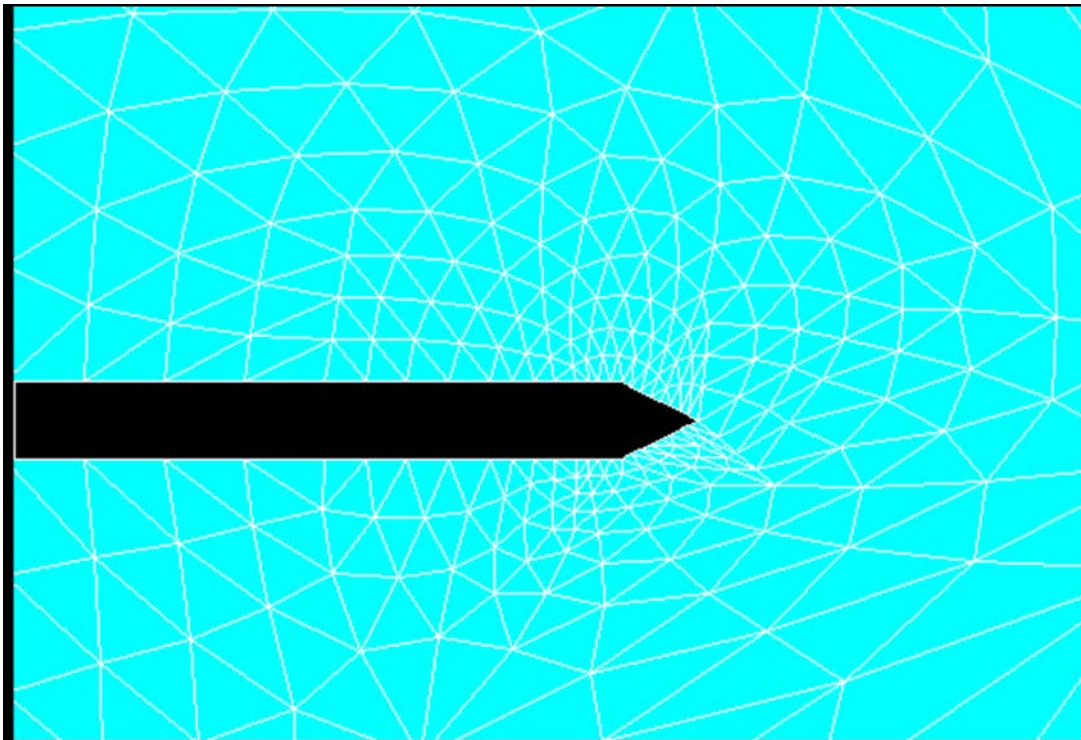
Application de la force :

Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Structural > Force > on keypoints.



7 – Maillage de la structure:

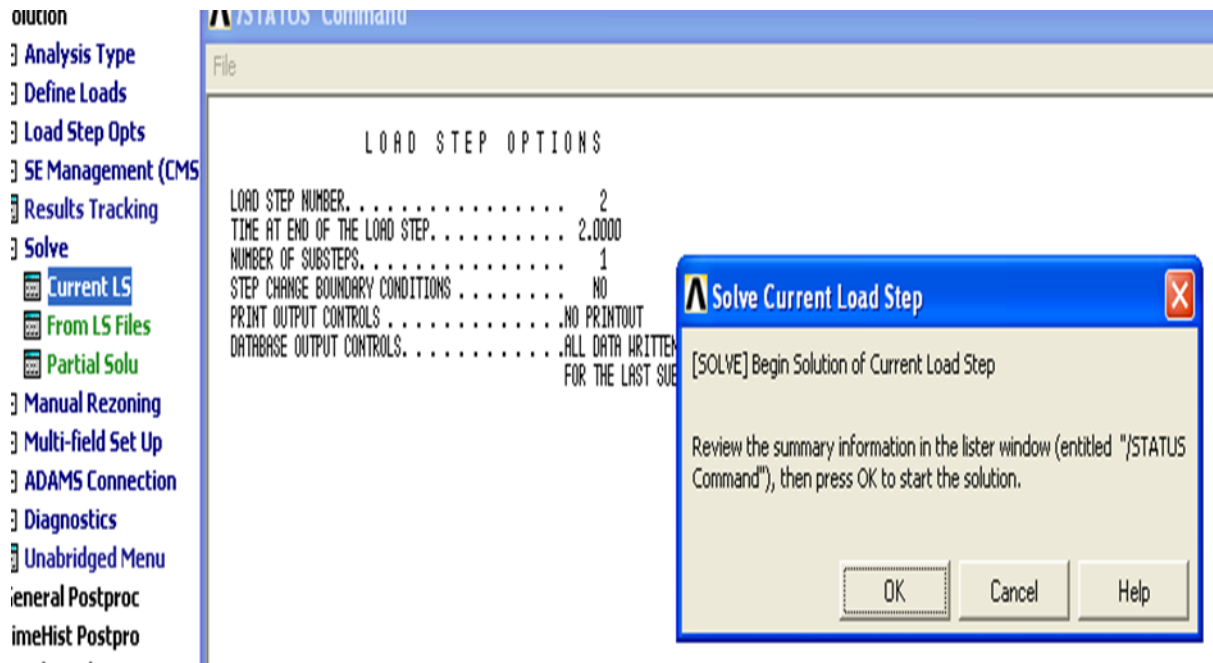
Main Menu > Preprocessor > Meshing > Mesh > Areas > Free.



Annexe

8 – Lacement du calcul:

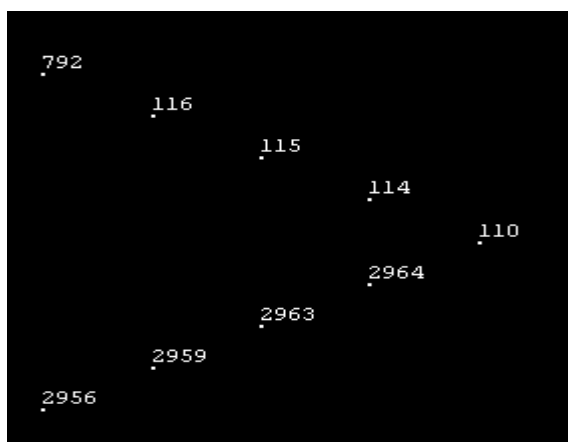
Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis.



Main Menu > Solution > Solve > Current LS.

9 – Désignation des nœuds :

Utility Menu > Plot > Nodes.



Annexe

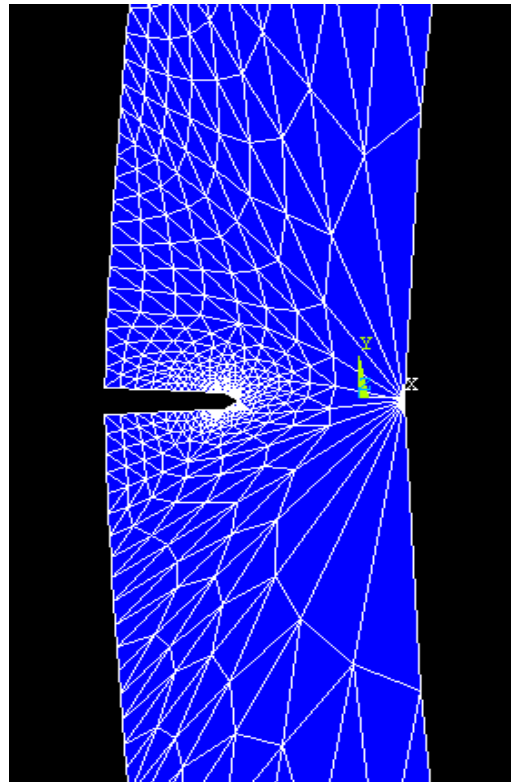
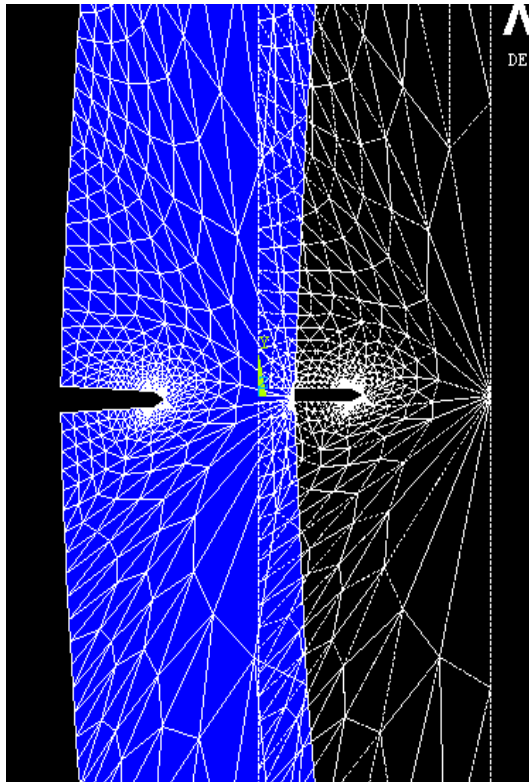
10 – Les abscisses des nœuds :

List – nodes,

NLIST Command						
File						
100	0.0000	-0.21893E-01	0.0000	0.00	0.00	0.00
NODE	X	Y	Z	THXY	THYZ	THZX
101	0.0000	-0.22828E-01	0.0000	0.00	0.00	0.00
102	0.80000E-02	-0.50000E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
103	0.51867E-03	-0.50000E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
104	0.10373E-02	-0.50000E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
105	0.15560E-02	-0.50000E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
106	0.20747E-02	-0.50000E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
107	0.25933E-02	-0.50000E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
108	0.31120E-02	-0.50000E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
109	0.36307E-02	-0.50000E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
110	0.90000E-02	0.0000	0.0000	0.00	0.00	0.00
111	0.80625E-02	-0.46875E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
112	0.81250E-02	-0.43750E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
113	0.81875E-02	-0.40625E-03	0.0000	0.00	0.00	0.00
114	0.89375E-02	0.31250E-04	0.0000	0.00	0.00	0.00
115	0.88750E-02	0.62500E-04	0.0000	0.00	0.00	0.00
116	0.88125E-02	0.93750E-04	0.0000	0.00	0.00	0.00
117	0.72220E-02	-0.15846	0.0000	0.00	0.00	0.00
118	0.45060E-02	0.62813E-02	0.0000	0.00	0.00	0.00
119	0.77603E-02	0.34198E-02	0.0000	0.00	0.00	0.00
120	0.47732E-02	-0.65547E-01	0.0000	0.00	0.00	0.00
NODE	X	Y	Z	THXY	THYZ	THZX

11 – quelques résultats :

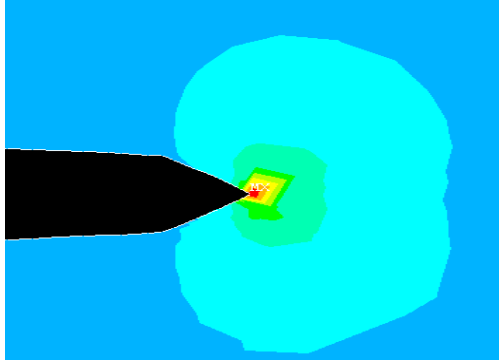
Structure déformée, avant et après application de la charge.



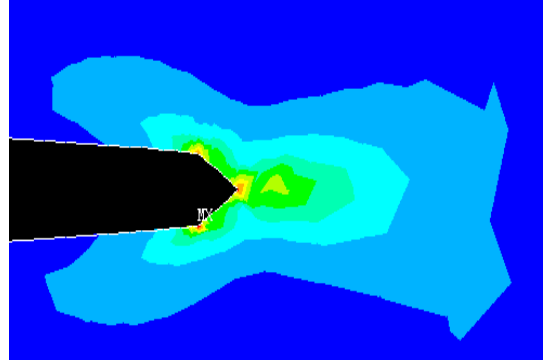
Annexe

Distribution des contraintes, selon X, Y

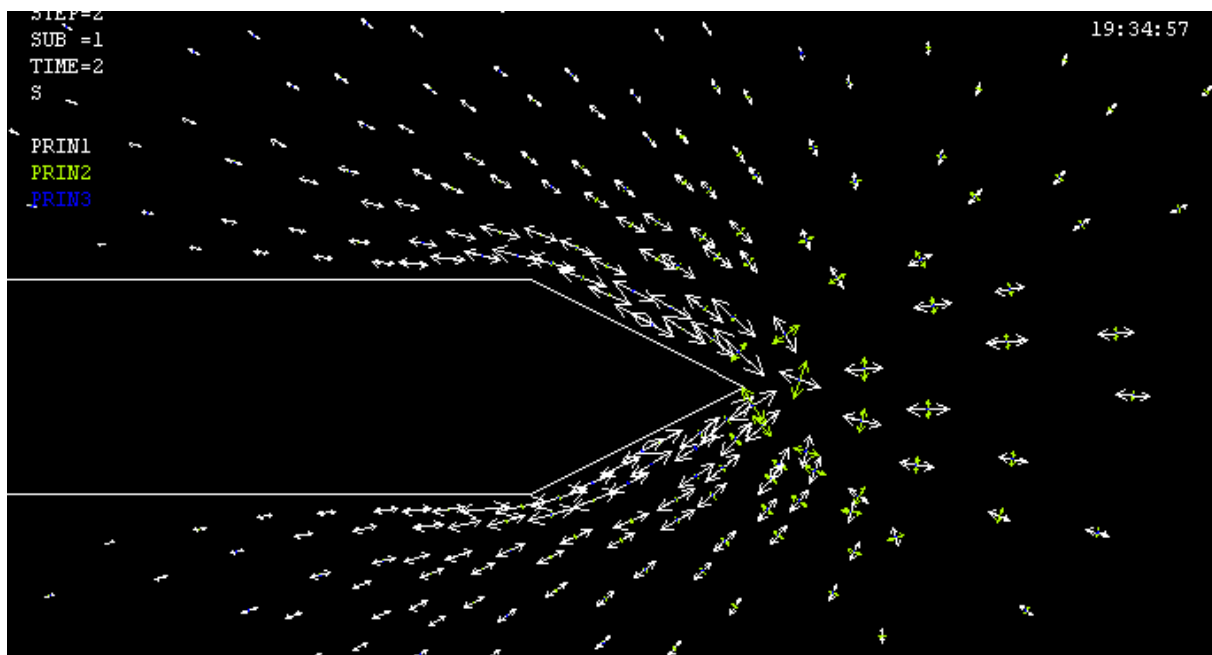
Selon Y



Selon X



Distribution vectorielle des forces :



Annexe

Liste des résultats :

Déplacement nodaux selon x, y (u_x , u_y),

Contraintes nodaux selon x, y, z (S_x , S_y , S_z , S_{xy} , S_{yz} , S_{xz})

PRETAB Command								
File								
PRINT ELEMENT TABLE ITEMS PER ELEMENT								
***** POST1 ELEMENT TABLE LISTING *****								
STAT ELEM	CURRENT UX	CURRENT UY	CURRENT SX	CURRENT SY	CURRENT SZ	CURRENT SXY	CURRENT SYZ	CURRENT SXZ
1	0.16271E-01	-0.21125E-02	0.23304E-02	-0.10181E-02	-0.15587E-03	0.28834E-03	0.0000	0.0000
2	0.18294E-01	-0.66935E-02	0.73828E-03	-0.75767E-04	-0.31366E-05	-0.59271E-03	0.0000	0.0000
3	-0.91604E-01	0.62395E-03	-3.2034	23.779	4.4081	-6.5595	0.0000	0.0000
4	-0.92363E-01	0.63768E-04	-5.8028	16.609	3.0255	-17.123	0.0000	0.0000
5	-0.92661E-01	-0.61564E-03	-3.9986	21.507	3.9705	-24.825	0.0000	0.0000
6	-0.92760E-01	-0.10994E-02	-8.8708	35.604	6.5393	-21.367	0.0000	0.0000
7	-0.61205E-01	-0.42543E-02	-0.50328	4.7660	0.88559	-1.9667	0.0000	0.0000
8	-0.64918E-01	-0.78223E-02	-0.87156E-01	17.402	3.2598	-0.64446	0.0000	0.0000
9	-0.92690E-01	0.68220E-03	1.3126	8.5738	1.6264	-9.0980	0.0000	0.0000
10	-0.93091E-01	0.34458E-03	13.079	1.7789	0.52932	-5.4240	0.0000	0.0000
11	0.25651E-01	0.26050E-02	0.70352E-04	-0.49018E-05	0.13554E-06	0.42106E-04	0.0000	0.0000
12	0.22997E-01	0.55829E-02	0.33249E-04	0.52185E-04	0.10277E-04	0.73459E-04	0.0000	0.0000
13	-0.92994E-01	-0.41738E-02	13.497	3.4857	0.85544	8.7601	0.0000	0.0000
14	-0.92527E-01	-0.45092E-02	0.30994E-01	11.625	2.1789	9.6946	0.0000	0.0000
15	-0.90902E-01	0.15371E-03	-4.9727	18.943	3.4753	-3.4596	0.0000	0.0000
16	-0.92176E-01	-0.30112E-02	-18.327	17.005	2.9120	11.109	0.0000	0.0000
17	-0.91733E-01	-0.46622E-02	-1.7083	25.908	4.8295	5.5529	0.0000	0.0000
18	-0.69419E-01	-0.80725E-02	-0.18815E-01	21.063	3.9469	-0.35710	0.0000	0.0000