

M/1624.731

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de mastère

Présenté à l'Université du 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de : "Génie Civil"
Domaine: "Sciences et Technologie"
Spécialité : "Génie Civil ", Option : Structures

Présenté par : DJELAILIA billem
FAHADA at-tahir

Thème : Calcul et vérification d'une structure en bois

Sous la direction de : Dr. NAFA zahreddine.

Resu le
27/05/2012
[Signature]

2011/ 2012



Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Allah de nous avoir donné le pouvoir afin de réaliser ce travail.

Au terme de ce travail, nous saisissons cette occasion pour exprimer nos vifs remerciements à toute personne ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

*Nous souhaitons tout d'abord remercier notre encadreur le professeur : **NAFA zahreddine** , qui nous a encadrés avec patience durant la réalisation de ce travail de fin d'études. Ses conseils nous ont été bien utiles, notamment pour la rédaction de ce mémoire.*

Nous exprimons également notre gratitude aux membres du jury, qui nous ont honorés en acceptant de juger ce modeste travail. Leurs remarques ont été à l'origine de discussions riches et passionnantes.

Enfin, nous tenons à remercier l'ensemble du corps enseignants de département de Génie Civil et d'Hydraulique.

Dédicace

Je dédie ce travail à ceux qui me sont les plus chers au monde :

Mes parents.

Mes chers frères

*Ceux qui sont toujours à mon côté pour me soutenir
et m'encourager.*

*A tous les enseignants du département du génie civil
et à Monsieur le Professeur : NAFA
en particulier.*

*A toute la promotion de 2^{ième} année master Génie Civil
2012*

Je dédie ce travail.

Djelailia bilal

Dédicace

« Je dédie ce travail :

À mes très chers parents, pour leurs amour et sacrifices,

À mes adorables frères et sœur pour leur patience,

*À toute personne ayant contribué à ce travail de près ou
de loin. »*

Fehada at-tahir

Résumé

L'objectif principal de ce travail est de présenter une étude d'une structure en bois lamellé-collé. Nous appliquons les calculs des contraintes et déformations sur une poutre.

Les calculs sont fait par le logiciel ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS et en utilisant le règlement de calcul EUROCODE 5 pour les vérifications des sections.

Mot clé : bois, lamellé-collé, ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, EUROCODE 5

Abstract

The main objective of this work is to present a study of a structure glue-lam of wood. We apply the calculations of stress and strain on a beam.

The calculations are done by ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS software and using the calculation rules EUROCODE 5 for audits sections.

Keyword: wood, glue-lam, ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS, EUROCODE 5

ملخص

ان الهدف من هذا العمل هو تقديم دراسة لهيكل من الخشب الرقائقي حيث طبقا حسابات الاجهادات و التشوهات على جزء من هذا الهيكل نستخدم برنامج الكمبيوتر ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS لحساب الاجهادات و التشوهات و معيار الحساب 5 EUROCODE لتتحقق مع المقاطع

كلمات مفتاح : ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS , EUROCODE 5 , خشب, الخشب الرقائقي.

 sommaire

Résumé	
Sommaire	
Liste de figure	
Liste de tableau	
INTRODUCTION	
PARTIE 1 ETUDES BIBLIGRAPHIQUE	
CHAPITRE 1 : LE BOIS	
1.1 L'ARBRE	01
1.2 CONSTITUTION DU BOIS	02
1.3 PROPRIETES PRINCIPALES DU BOIS	04
1.3.1 L'humidité relative	04
1.3.2 Retrait	06
1.3.3 Dilatation thermique	07
1.3.4 Masse volumique	08
1.3.5 Résistance à la compression	08
1.3.6 Résistance à la traction	09
1.3.7 Résistance au cisaillement	09
1.3.8 Résistance aux chocs	09
1.3.9 Coefficients d'élasticité	10
1.3.10 Diagramme contrainte - déformation	10
1.3.11 Déformations différées : fluage	11
1.3.12 Résistance aux agressions chimiques	11
1.4 CLASSEMENT DU BOIS	11
1.4.1 Le classement visuel	13
1.4.2 Le classement par machine	14
CHAPITRE 2 : LA CONSTRUCTION	
2.1 LE BOIS ROND	15
2.2 LE BOIS SCIE	16
2.3 LE BOIS LAMELLE COLLE	17
2.3.1 Historique	17
2.3.2 Fabrication	18
2.3.3 Caractéristiques et dimensionnement	20
2.3.3.1 Classes de résistances mécaniques	20
2.3.3.2 Caractéristiques mécaniques pour le calcul	20
2.3.3.3 Classes de service des éléments lamellés-collés	23
2.3.3.4 Epaisseurs des lamelles	23
2.3.3.5 Classes d'emploi (classe de risques biologiques)	23
2.3.3.6 Essences utilisables	24
2.4 LES FAMILLES DE PANNEAUX	25
2.4.1 Les contre-plaqués	25
2.4.2 Les panneaux de bois lamifiés + parralam	27
2.4.3 Les panneaux de fibres et de particules	29
CHAPITRE 3 : LES STRUCTURES	
3.1 INTRODUCTION	33
3.2 LA POUTRE FLECHIE	33
3.2.1 Poutre simple de hauteur constante	33
3.2.2. Cas des pannes de toiture	33
3.2.3. Poutres composées	35

3.2.4. Poutres sous-tendues	35
3.3 LES ARCS	36
3.4 LES PORTIQUES	37
3.5 LES SYSTEMES DE TREILLIS	38
3.5.1 Charpentes industrialisées	38
3.6 LES MAISONS D'HABITATIONS	40
3.6.1 Maisons à ossature bois	40
3.6.2 Systèmes à madriers	41
3.6.3 Systèmes poutres et poteaux	41
3.7 PONTS ET PASSERELLES	42
3.7.1 Principes d'utilisation du bois dans les ponts	42
3.7.2 Les différents types de structure	42
CHAPITRE 4 : L'ASSEMBLAGE	
4.1 INTRODUCTION	44
4.2 ASSEMBLAGES TRADITIONNELS	44
4.2.1 Assemblage par emboîtement	45
4.2.2 Assemblages par contact	45
4.2.3 Assemblages par tenon et mortaise	45
4.2.4 Assemblages à mi-bois et par enfourchement	46
4.3 ASSEMBLAGES MECANQUES DE TYPE TIGE	46
4.3.1 Conception générale	46
4.3.2 Pointes	47
4.3.3 Assemblages vissés	47
4.3.4 Assemblages par boulons et broches	47
4.3.5 Assemblages par goujons collés	48
4.4 AUTRES ASSEMBLAGES MECANQUES	48
4.4.1 Assemblages par connecteurs métalliques à dents	48
4.4.2 Boîtiers de poutres et systèmes d'ancrages	49
4.4.3 Assemblages par anneaux	49
4.4.4 Assemblages par crampons	50
PARTIE 2 MODELISATION ET CALCUL DE L'OUVRAGE	
CHAPITRE 1 : EUROCODE 5	
1.1 INTRODUCTION	51
1.2 DOMAINES D'APPLICATION	51
1.2.1 Domaine d'application d'Eurocode 5	51
1.2.2 Domaine d'application d'EN 1995-1-1	52
1.3 PRINCIPES DE CALCUL AUX ETATS LIMITES	53
1.3.1 Généralités	53
1.3.2 Etats limites ultimes	53
1.3.3 Etats limites de service	53
1.3.4 Combinaisons d'actions appliquées aux structures	54
1.4 PROPRIETES DES MATERIAUX	55
1.4.1 Paramètres de résistance et de rigidité	55
1.4.2 Relations contrainte – déformation	55
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE ROBOT	
2.1 GENERALITES :	56
2.2 LES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU LOGICIEL ROBOT:	57
2.3 PRESENTATION DES DONNEES ET RESULTATS	57
CHAPITRE 3 : PRESENTATION DE L'OUVRAGE	
3.1 PRESENTATION DE L'OUVRAGE	59

3.2 CHARGEMENT SUR PORTIQUE :	60
3.2.1 Les charges permanentes sur toiture :	60
3.2.2 Calcul des charges permanentes	61
CHAPITRE 4: CALCUL DES SURCHARGES	
4.1 CALCUL DE SURCHARGE CARACTERISTIQUE DE NEIGE	62
4.2 CALCUL DE LA CHARGE CARACTERISTIQUE DE VENT	63
CHAPITRE 5 : MODELISATION ET RESULTATS	
5.1 MODELISATION DE LA STRUCTURE	70
5.2 RESULTATS DES CALCULS	70
5.2.1 Les resultats des calculs des contraintes donne par le logeciele	70
5.2.2 Les resultats des calculs des deformations donne par le logeciele	73
CHAPITRE 6 : VERIFICATION SELON L'EUROCODE 5	
6.1 VERIFICATION SELON L'EUROCODE 5	75
6.1.1 Vérification des contraintes (ELU)	75
6.1.1.1 <i>Compression axiale</i>	75
6.1.1.2 <i>flexions</i>	76
6.1.2 Vérification des déformations (ELS)	77
CONCLUSION GENERALE	
ANNEXE	
REFERENCE BIBLIOGRAPHIES	

liste des figures

PARTIE 1 ETUDES BIBLIGRAPHIQUE**CHAPITRE 1 : LE BOIS**

Figure 1-1	coupes et axes dans un tronc	03
Figure 1-2	Déférents couches forment un tronc	04
Figure 1-3	équilibre hygroscopique du bois en extérieur	05
Figure 1-4	déformations de retrait des planches	07
Figure 1-5	fissures radiales de retrait	07
Figure 1-6	diagramme contrainte-déformation	11
Figure 1-7	principe du classement	12
Figure 1-8	différences de largeur de cerne	13

CHAPITRE 2 : LA CONSTRUCTION

Figure 2-1	gorges de décharge	15
Figure 2-2	bois rond scié sur deux faces	16
Figure 2-3	poteaux à base de bois ronds	16
Figure 2-4	sections en mm pour un taux d'humidité de 20 %	17
Figure 2-5	principe du joint à entures multiples	18
Figure 2-6	principe d'une poutre en lamellé-collé	19
Figure 2-7	principe de l'enture à grandes dimensions	19
Figure 2-8-a	principe de fabrication du contre-plaqué	26
Figure 2-8-b	principe de fabrication du contre-plaqué	26
Figure 2-9	principe de fabrication du la mi-bois	27
Figure 2-10	association du la mi-bois avec bois scié ou BLC	28
Figure 2-11	principe de fabrication du parralam	28
Figure 2-12	principe de fabrication de l'OSB	31

CHAPITRE 3 : LES STRUCTURES

Figure 3-1	disposition des pannes	33
Figure 3-2	phase de montage ; une seule fixation	34
Figure 3-3	feuillards	34
Figure 3-4	poutre composée (photo)	35
Figure 3-5	poutre composée	35
Figure 3-6	poutre sous-tendue	36
Figure 3-7	poutre sous-tendue (variantes)	36
Figure 3-8	arc à éléments droits	37
Figure 3-9	arc à éléments droits (photo)	37
Figure 3-10	quelques types de portiques	38
Figure 3-11	fermes à entrain horizontal	39
Figure 3-12	fermes sans entrain horizontal	40
Figure 3-13	Systèmes à madriers	41
Figure 3-14	stabilisation par le haut	43

CHAPITRE 4 : L'ASSEMBLAGE

Figure 4-1	divers types d'embranchement	45
Figure 4-2	assemblages par contact	45
Figure 4-3	tenon et mortaise	46
Figure 4-4	assemblages à mi-bois et par enfourchement	46
Figure 4-5	distances minimales pour assemblage bois-bois	47
Figure 4-6	assemblage par boulon	48
Figure 4-7	connecteurs à dent	49
Figure 4-8	excentricité locale dans un boîtier	49

Figure 4-9	assemblage par anneaux	50
Figure 4-10	assemblage par crampons	50
PARTIE 2 MODELISATION ET CALCUL DE L'OUVRAGE		
CHAPITRE 1 : EUROCODE 5		
CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE ROBOT		
Figure 2-1	type de structures étudiées dans robot	56
Figure 2-2	Cartographie des contraintes sur la modélisation d'un assemblage	58
CHAPITRE 3 : PRESENTATION DE L'OUVRAGE		
Figure 3-1	vue 3D de structure	59
Figure 3-2	multicouches de toiture	60
Figure 3-3	portique étudié	61
CHAPITRE 4: CALCUL DES SURCHARGES		
Figure 4-1	Coefficient de pression extérieur sur les parois verticales	68
Figure 4-2	Coefficient de pression extérieur sur la toiture	68
CHAPITRE 5 : MODELISATION ET RESULTATS		
Figure 5-1	distribution des charges sur le portique	70
Figure 5-2	contrainte de flexion max(ELU1)	70
Figure 5-3	contrainte de flexion max(ELU2)	71
Figure 5-4	contrainte de flexion max(ELU3)	71
Figure 5-5	contrainte de compression max(ELU1)	72
Figure 5-6	contrainte de compression max(ELU2)	72
Figure 5-7	contrainte de compression max (ELU 3)	73
Figure 5-8	la flèche (ins) max (ELS1)	73
Figure 5-9	la flèche (ins) max avec la combinaison ELS2	74
Figure 5-10	la flèche (ins) max avec la combinaison ELS3	74
CHAPITRE 6 : VERIFICATION SELON L'EUROCODE 5		

liste des tableaux

PARTIE 1 ETUDES BIBLIORAPHIQUE

CHAPITRE 1 : LE BOIS

Le tableau 1-1	reprënd quelques-unes des différences principales	01
Le tableau 1-2	Les valeurs des superficies forestières	02
Le tableau 1-3	Quelques valeurs caractéristiques	08

CHAPITRE 2 : LA CONSTRUCTION

Le tableau 2-1	Classe de résistance du bois lamellé-collé	20
Le tableau 2-2	les valeurs des Caractéristiques mécaniques de bois lamellé-collé homogène	21
Le tableau 2-3	les valeurs des Caractéristiques mécaniques de bois lamellé-collé panache	22
Le tableau 2-4	les valeurs maximales des épaisseurs de lamelles	23
Le tableau 2-5	Durabilité des principales essences de bois utilisée pour la fabrication du BLC :	24

CHAPITRE 3 : LES STRUCTURES

CHAPITRE 4 : L'ASSEMBLAGE

PARTIE 2 MODELISATION ET CALCUL DE L'OUVRAGE

CHAPITRE 1 : EUROCODE 5

CHAPITRE 2 : PRESENTATION DE ROBOT

CHAPITRE 3 : PRESENTATION DE L'OUVRAGE

CHAPITRE 4: CALCUL DES SURCHARGES

Le tableau 4-1	la valeur finale de la pression de vent sur les parois verticales	69
Le tableau 4-2	la valeur finale de la pression de vent sur la toiture	69

CHAPITRE 5 : MODELISATION ET RESULTATS

CHAPITRE 6 : VERIFICATION SELON L'EUROCODE 5

INTRODUCTION GENERALE

Dans le cadre de notre projet de fin d'études, le sujet qui nous a été proposé par notre encadreur est intitulé : **Calcul et vérification d'une structure en bois**

Il s'agit du calcul par éléments finis d'une poutre simple de hauteur constante en bois lamellé-collé, faisant partie d'une structure portante d'un hangar de stockage. Ce sujet est très intéressant puisque, premièrement il traite d'un nouveau matériau et deuxièmement c'est une occasion pour nous de mettre en application la méthode des éléments finis sur un cas concret.

Ce mémoire est structuré en deux parties :

Dans la première partie, intitulée étude bibliographique, sont présentés : un résumé sur le matériau bois, la construction en bois, la technique du lamellé-collé, les structures en bois et les techniques d'assemblage. La deuxième partie est consacrée à l'étude proprement dite, après une présentation du règlement de calcul des structures en bois l'**EUROCODE5**, et du logiciel **ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS** et la définition du problème on donne les étapes de calculs, les résultats et les vérifications selon l'Eurocode5.

Le mémoire est clos par une conclusion et une bibliographie des principales références utilisées dans cette étude.

Partie 1

Études bibliographiques

Chapitre 1

Le bois

1.1 L'ARBRE

Par son origine végétale, le bois est un matériau hétérogène, dont les caractéristiques dépendent des essences.

On distingue deux grands groupes d'arbres :

- Les conifères, appelés aussi résineux, sont les plus anciens dans l'évolution. Leur structure est plus simple.
- Les feuillus, plus récents et de structure plus complexe.

Le tableau 1-1 : reprend quelques-unes des différences principales.

	Les conifères	Les feuillus
Botanique	Plantes à graines, qui ne sont pas renfermées par un ovaire	Plantes dont les ovules sont protégés par un ovaire. Ces ovules évoluent en graine après la fécondation
Feuilles	Feuillage persistant (sauf exceptions).feuilles généralement étroites, à pointes aiguës, ou petites et squamifères	Feuillage persistant ou caduc. Feuilles généralement plates, avec un réseau distinct de fines nervures
Fleurs	Sans pétales	Généralement avec pétales
Fruit	En général un cône, souvent composé d'écailles ligneuses	Très grande diversité de forme, de texture, de couleur
Terrain	Acceptent des conditions plus hostiles	Habitat moins hostile

En Algérie la majeure des superficies forestières ont connu une nette diminution, principalement pour les feuillus comme les chênes et une augmentation des résineux comme les pins. Cela est probablement dû au choix des espèces lors des reboisements car on a tendance à choisir les essences à croissance rapide et qui ne nécessitent pas beaucoup d'entretien. [1]

Les valeurs sont résumées dans le tableau 1-2 qui donne la dernière estimation faite par la DGF en collaboration avec la FAO et publiée dans le rapport FOSA 2000.

Tableau 1-2 : Les valeurs des superficies forestières

Essence	Superficie (ha)	% de la surface totale occupée par les essences
Pin d'alep	880000	21,36
Chêne liège	230000	5,59
Chêne zeen et farés	48000	1,17
Pin maritime	32000	0,78
Cèdre	16000	0,39
Encaliptus	43000	1,04

1.2 CONSTITUTION DU BOIS

Au niveau microscopique, le bois est formé d'un tissu poreux. En fait, il est constitué en grande partie d'air. C'est ce qui lui donne une faible conductivité thermique et lui confère la faculté d'absorber ou de rejeter de l'humidité vers l'atmosphère dans laquelle il baigne.

Ce tissu est constitué de substances et de cavités cellulaires s'orientant de manière à former des fibres. Les fibres constituent environ 50 % du matériau. Elles sont constituées de cellulose, très hydrophile. La matrice enserrant et " collant " ces fibres est constituée en parts égales d'hémi cellulose et de lignine. L'hémicellulose est un sucre et c'est lui qui attire la plupart des insectes (seules les termites peuvent digérer la cellulose). [1]

Ses propriétés sont donc fortement anisotropes, suivant l'orientation par rapport aux fibres principales. En chaque point d'un tronc d'arbre, on distingue 3 axes d'orientations principaux ainsi que 3 coupes possibles perpendiculairement à ces axes, voir Figure 1-1. L'axe longitudinal joue le rôle le plus important car les fibres sont essentiellement orientées dans ce sens. On distinguera donc presque toujours entre propriétés parallèles aux fibres et propriétés perpendiculaires aux fibres. Les différences entre les deux autres axes sont moins flagrantes mais, dans certains cas, il faudra néanmoins différencier entre sens radial et sens tangentiel. [1]

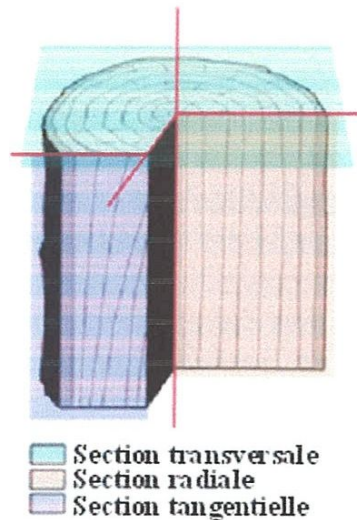


Figure 1-1: coupes et axes dans un tronc

Le tissu est également hétérogène. Deux types d'hétérogénéité existent au niveau macroscopique, plus ou moins fortement marquées suivant les espèces. Chaque année, une nouvelle couche de bois vient s'ajouter extérieurement à celles déjà existantes. Chaque cerne annuel est formé de deux couches entre lesquelles existe une transition progressive, celle formée du bois de printemps et celle du bois d'été. La transition entre le bois d'été d'une année et le bois de printemps de l'année suivante est plus marquée et permet la détermination de l'âge de l'arbre d'après l'observation d'une coupe transversale. L'hétérogénéité entre bois de printemps et d'été est surtout marquée chez les résineux. [1]

En partant du cœur vers l'extérieur du tronc, on rencontre successivement :

- La moelle, ou bois juvénile, partie de faible diamètre plus colorée avec milieu vide ou rempli d'un tissu spongieux;
- Le bois parfait, formé de cellules vieilles et qui forme le bois d'œuvre par excellence. On l'appelle aussi duramen lorsqu'on peut le distinguer visuellement de l'aubier (comme dans le chêne, le châtaignier, le pin sylvestre et le pin maritime, ce n'est pas le cas pour les sapins et les épicéas). Les chemins de circulation de la sève sont bouchés par des sels minéraux et métalliques, les tanins, qui confèrent à cette partie une certaine résistance aux insectes à larves xylophages;
- l'aubier, bois plus jeune dans laquelle remonte la sève (donc impropre à la plupart des utilisations) dont une couche se transforme chaque année en bois parfait;
- le cambium, couche de bois en phase de transformation, l'aubier vers l'intérieur et le liber vers l'extérieur;

- Le liber, couche très poreuse dans laquelle redescend la sève élaborée et qui est la base de l'écorce;
- Et l'écorce.

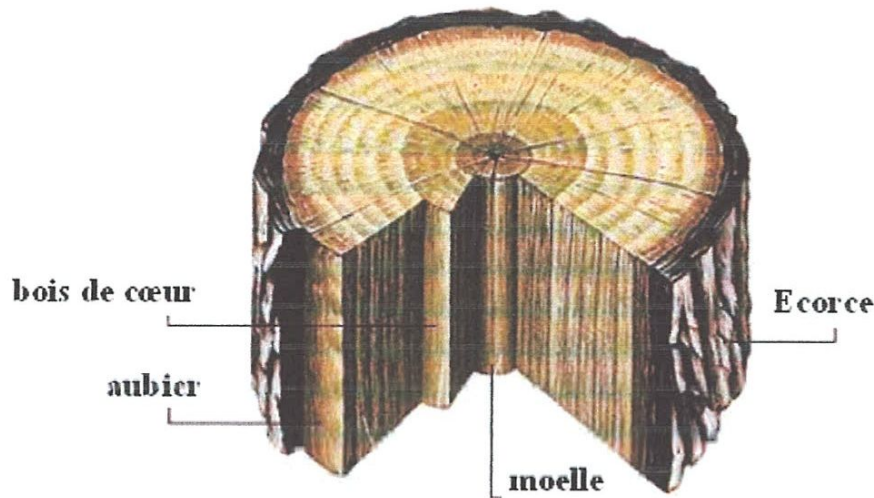


Figure 1-2 : Différentes couches forment un tronc

1.3 PROPRIETES PRINCIPALES DU BOIS

1.3.1 L'humidité relative

Celle-ci est définie comme la masse d'eau présente dans le bois exprimée en pourcentage de sa masse anhydre. Cette dernière est obtenue, par exemple, après séchage à l'étuve à 100°C ou plus jusqu'à poids constant.

$$W = \frac{m_w - m_s}{m_s}$$

m_w Masse d'un échantillon dans l'état à quantifier,

m_s Masse du même échantillon après séchage.

Cette propriété mérite d'être citée en premier lieu car presque toutes les autres propriétés en dépendent. C'est pourquoi il est essentiel de rapporter ces propriétés à un degré d'humidité de référence, par exemple 15% souvent retenu anciennement. L'Eurocode 5 considère en fait comme situation de référence l'état d'équilibre atteint à une température de 20°C et une humidité relative de l'air de 65%, ce qui correspondrait plutôt à une humidité du bois de 12%.

Il ne faut pas confondre l'humidité relative du bois, appelée parfois simplement "humidité", avec son humidité d'équilibre qui est l'humidité à laquelle le bois ne perd ni ne reprend d'eau à l'air ambiant. L'humidité d'équilibre du bois dépend bien entendu de l'humidité relative et de la température de l'air, donc des conditions d'utilisation, voir Figure 1-3. Il est important de savoir quelle est l'humidité du bois avant sa mise en œuvre par rapport à ce que pourra être son humidité d'équilibre, état vers lequel il va tendre progressivement. Il existe des appareils permettant de mesurer l'humidité du bois sur chantier sur base de la résistivité électrique du bois. Ces appareils donnent des valeurs moins précises que les mesures en laboratoire. On ne saurait cependant trop insister sur l'importance fondamentale de cet outil pour l'architecte. Son utilisation permet un contrôle de l'humidité, c'est-à-dire un contrôle de la qualité du matériau, qui peut éviter des désagréments importants. Au-delà des valeurs quantitatives qu'elle fournit, l'utilisation de cet appareil signifie que l'architecte garde bien à l'esprit toute la problématique de l'humidité dans le bois. [1]

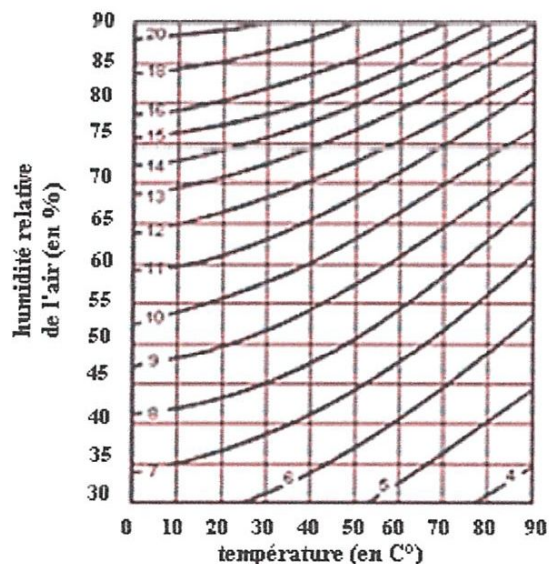


Figure 1-3: équilibre hygroscopique du bois en extérieur

1.3.2 Retrait

- Les dimensions du bois varient en fonction de son humidité. On peut observer un retrait ou un gonflement suivant le sens de la variation d'humidité. Les bois denses et durs ont généralement un retrait plus fort que les bois légers et tendres.

L'anisotropie se manifeste fortement dans le phénomène de retrait : les variations de longueur sont beaucoup plus faibles dans le sens des fibres que dans les deux autres sens et le retrait tangentiel est de l'ordre du double ou du triple du retrait radial.

On peut retenir les valeurs suivantes comme coefficient de retrait linéaire par pour-cent d'humidité du bois :

Sens axial 1×10^{-4}

Sens radial 20×10^{-4}

Sens tangentiel $40 \text{ à } 60 \times 10^{-4}$

On note toutefois que les dimensions ne varient plus lorsque l'humidité du bois atteint et dépasse 30% parce que, au-delà, l'eau additionnelle ne s'intègre plus aux parois des cellules mais remplit simplement les cavités disponibles.

On peut ainsi calculer que si des planches de 2 mètres de long et de 9 cm de large sont livrées avec un taux d'humidité supérieur de 5% du poids sec à ce que sera son humidité d'équilibre, chaque planche va se raccourcir de 1 mm mais, plus important, sa largeur peut diminuer de 2 mm si elle a été sciée sur dosse. C'est ce qui explique que les planchers en bois sont en général posé initialement avec le minimum de clous, puis resserrés et cloués définitivement après une période de 1 à 2 ans pendant laquelle le matériau a pu évoluer vers son humidité d'équilibre.

A l'inverse, des éléments de parquet trop bien séchés et mis en place dans un local assez humide peuvent avoir tendance à se dilater, ce qui peut générer des efforts suffisants pour cisailer les maçonneries contre lesquelles ils viennent en butée. [1]

Les déformations transversales du bois peuvent évidemment jouer un rôle fondamental dans le comportement de certains assemblages et il y a lieu d'en tenir compte. [1]

La différence de retrait entre sens radial et sens transversal explique pourquoi les planches sciées sur dosse peuvent se déformer plus que les planches sciées sur quartier, voir Figure 1-4.

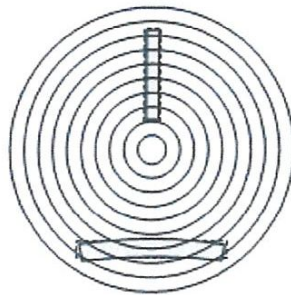


Figure 1-4: déformations de retrait des planches

Cette différence est aussi à l'origine des importantes fissures longitudinales que l'on observe dans les bois ronds et dans les poutres massives, voir Figure 1-5.



Figure 1-5: fissures radiales de retrait

1.3.3 Dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique du bois est de l'ordre de 5×10^{-6} dans le sens axial et de 50×10^{-6} perpendiculairement aux fibres. Pour une variation de température de 20°C , on obtient une variation relative de longueur de 1×10^{-4} et une variation transversale de 10×10^{-4} , valeurs qui seraient obtenues ou même dépassées pour une variation d'humidité de 1%. Comme, en plus, les variations thermiques sont généralement de sens contraire au retrait, on n'en tient habituellement pas compte.

Lorsque le bois est combiné à d'autres matériaux pour former des éléments mixtes, bois-acier par exemple, il peut alors devenir nécessaire de tenir compte des coefficients de dilatation thermique différents. [1]

1.3.4 Masse volumique

La masse volumique réelle du matériau bois (c'est-à-dire des parois cellulaires) est pratiquement la même pour toutes les types et vaut environ 1500 kg/m^3 . Cependant, la masse volumique apparente varie fortement d'un type à l'autre, depuis moins de 200 kg/m^3 pour le balsa jusqu'à plus de 1100 kg/m^3 pour l'ébène. Cela explique évidemment la corrélation observée entre la masse volumique et les propriétés mécaniques.

Les résineux les plus employés dans la construction ont une masse volumique comprise entre 400 et 550 kg/m^3 , tandis que les feuillus sont un peu plus lourds, entre 600 et 700 kg/m^3 . Cela reste malgré tout très léger comparé au béton armé, 2500 kg/m^3 , ou à l'acier, 7850 kg/m^3 . Le tableau 1-3 reprend quelques valeurs moyennes pour certaines espèces importantes.

Tableau1-3 : Quelques valeurs caractéristiques

Espèce	Masse volumique (Kg/m^3)
Espèce	450
Pin sylvestre	550
Chêne	750

La masse volumique varie, au sein d'un même type, d'un lot à l'autre, ce qui constitue un moyen efficace de contrôle non destructif puisque les caractéristiques de résistance sont meilleures lorsque la masse volumique est plus importante. [1]

La masse volumique varie également, au sein d'un même lot, avec l'humidité relative.

1.3.5 Résistance à la compression

Comme pour toutes les propriétés mécaniques, la dispersion des résultats obtenus est importante (30 à 40%), même entre échantillons d'un même lot. Cela s'explique par le fait que les différentes couches de bois ont été formées à des années d'écart, dans des conditions climatiques différentes. L'influence des défauts locaux, comme les nœuds, joue également un rôle important.

Les résistances mécaniques sont maximums pour les bois anhydres. Quand l'humidité croît, elles diminuent linéairement jusqu'au point de saturation à raison de 4% par pour-cent d'humidité pour la compression. C'est pourquoi les résistances caractéristiques sont toujours données pour une valeur de référence du degré d'humidité, soit 15% ou, suivant l'Eurocode 5, l'humidité d'équilibre obtenue pour une température de 20°C et une humidité relative de l'air de 65%. [1]

La résistance à la compression est très différente suivant qu'il s'agira de compression parallèle ou perpendiculaire aux fibres. Le mode de ruine est d'ailleurs fondamentalement différent : écrasement des fibres si l'effort leur est perpendiculaire, décollement des fibres puis flambement individuel de celles-ci si l'effort leur est parallèle. [1]

1.3.6 Résistance à la traction

La résistance ultime en traction axiale du bois purifié vaut 2 à 3 fois la résistance en compression dans le sens des fibres car les celles ci ne tendent ni à s'écarter ni à flamber individuellement. En pratique, cependant, il est difficile de tirer parti de la pleine résistance en traction, à cause des défauts locaux et des difficultés d'assemblage.

La résistance à la traction transversale est une des rares propriétés mécaniques qui n'est pas liée à la densité du matériau car elle ne dépend pas de la qualité des fibres. La rupture se produit par décollement entre fibres ce qui la rapproche plus d'une rupture par clivage. Sa valeur ne vaut guère plus de 5% de la résistance à la compression. [1]

1. 3.7 Résistance au cisaillement

La résistance au cisaillement a une grande importance pratique pour l'étude des assemblages et de la résistance à l'effort tranchant des pièces fléchies. Elle varie largement avec la direction de l'effort par rapport aux fibres mais, en pratique, on ne considère que le cisaillement longitudinal qui est susceptible d'amener la rupture par fendage parallèlement aux fibres. Le principe de réciprocité des contraintes tangentielles indique que ces plans sont les plus critiques. Elle vaut environ 10% de la résistance à la compression. [1]

1.3.8 Résistance aux chocs

En général très bonne, sauf pour les espèces très résineuses qu'il faut éviter, entre autres, pour des planchers de service et des passerelles où peuvent circuler des ouvriers. [1]

1.3.9 Coefficients d'élasticité

A cause de l'anisotropie, il faut distinguer différents modules d'élasticité et différents coefficients de Poisson. On peut retenir comme ordre de grandeur :

- 12 000 MPa pour le module longitudinal,
- 1 200 MPa pour le module radial,
- 6 000 MPa pour le module tangentiel,

$$\nu_{0,90} = 0.45 \text{ à } 0.50$$

$$\nu_{90,0} = 0.02 \text{ à } 0.08$$

Les deux dernières lignes relatives au coefficient de Poisson traduisent le fait qu'une compression longitudinale entraîne un fort gonflement latéral (presque incompressible, $\nu = 0.50$) tandis qu'une compression transversale n'a que peu d'influence sur l'allongement longitudinal. [1]

1.3.10 Diagramme contrainte - déformation

En traction, le comportement du bois est linéaire élastique jusqu'à la rupture et celle-ci présente un caractère fragile, voir Figure 1-6. En compression, on note une certaine non-linéarité mais le domaine plastique n'est pas très étendu. La rupture ne donne pas lieu à de très grands allongements et il n'y a pas de branche descendante après la contrainte de rupture. [1]

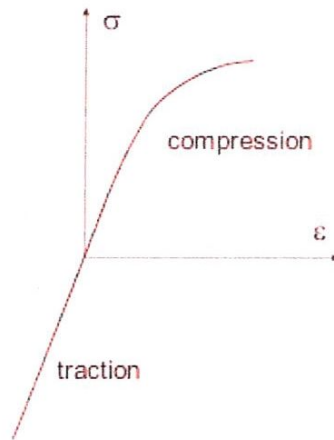


Figure 1-6: diagramme contrainte-déformation

1.3.11 Déformations différées : fluage

En traction axiale, on ne constate pratiquement pas de fluage. En compression, par contre, on observe une augmentation de la déformation, même sous contraintes de service. Le fluage est favorisé par des teneurs en eau élevées. En flexion, état qui mobilise aussi bien de la traction que de la compression, on peut considérer qu'une poutre soumise de manière permanente à sa charge de service voit sa déformée augmentée de 50 % après un mois et que la flèche atteint après quelques mois le double de la flèche instantanée. [1]

1.3.12 Résistance aux agressions chimiques

Elle est bonne, en tout cas meilleure que celle du béton et, surtout, que celle de l'acier. Attention au contact bois métal qui donne lieu à des taches de coloration pour certaines essences, le chêne notamment. Il faut alors galvaniser les pièces d'assemblage à chaud, voire utiliser de l'acier inoxydable. [1]

1.4 CLASSEMENT DU BOIS

Le bois présente de grandes variations de qualité, non seulement d'une essence à l'autre, mais aussi d'un arbre à l'autre en fonction de la localisation et des conditions climatiques de chaque arbre. La variabilité existe également au sein d'un même arbre, à cause de la présence des nœuds et autres défauts répartis de manière non homogène, mais aussi à cause des manières différentes dont chaque planche ou poutre a été sciée.

La variabilité est la plus grande pour les plus petites sections car celles-ci sont fortement influencées par l'éventuelle présence d'un défaut local. A l'inverse, une pièce de section infiniment grande verrait ses propriétés tendre vers une espèce de valeur moyenne. [1]

On observe également que la variabilité est plus grande dans les pièces équarries car l'influence des nœuds peut être exacerbée lorsque les fils du bois sont coupés lors du sciage tandis que, dans les bois ronds, la nature continue des fils qui contournent chaque défaut en atténue l'influence.

Du fait de cette variabilité, même en se limitant à des pièces d'une seule essence (ce qui est facile) et provenant d'une même plantation (ce qui l'est déjà moins), on peut obtenir des lots au sein desquels les pièces les plus résistantes sont 10 fois plus fortes que les pièces les plus faibles sans pouvoir, pour autant, tirer parti de la résistance de ces éléments. Les méthodes modernes de dimensionnement se basent en effet sur des valeurs caractéristiques des propriétés, et non plus sur des valeurs moyennes, ce qui pénalise les produits à forte variabilité. Si on suppose l'existence d'un lot dont la distribution est représentée sur la Figure 1-7 par la courbe "non classé", sa valeur moyenne est de 10.50, mais sa valeur caractéristique à 5 % n'est que de 5.50. [1]

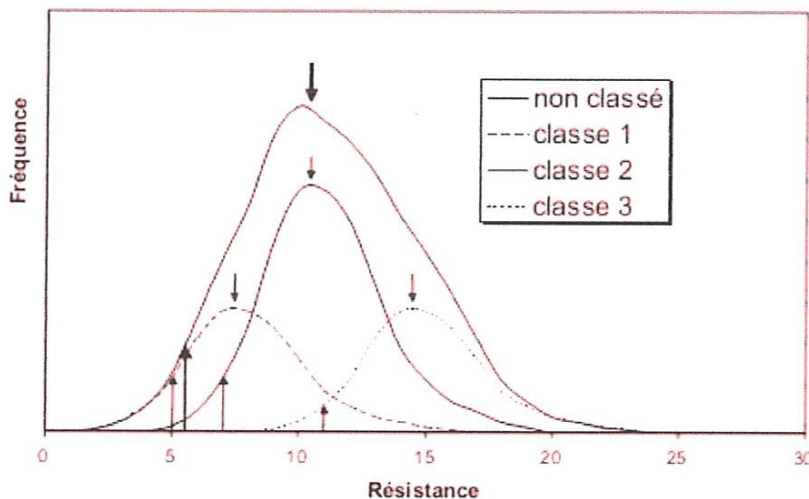


Figure 1-7: principe du classement

Si, par un moyen approprié, on arrive à trier les différentes pièces du lot en trois lots différents représentant chacun 25, 50 et 25 % de la population totale, on obtient 3 lots dont la valeur caractéristique est, respectivement, de 5,7 et 11. Les valeurs moyennes, moins intéressantes du point de vue du dimensionnement, sont, pour les 3 lots, de 7.50, 10.50 et 14.50.

Bien entendu , il n'est pas possible d'effectuer un classement parfait qui résulterait en classes bien distinctes, sans aucun chevauchement, sauf à effectuer un contrôle destructif (ce qui n'a guère de sens). Il faut essayer d'estimer la résistance de chaque pièce par l'observation d'autres grandeurs ou variables que l'on sait être plus ou moins bien corrélées à la résistance. Il existe deux grands types de méthodes de classement. [1]

1.4.1 Le classement visuel

Le classement est basé sur un examen visuel des pièces. Les observations portent essentiellement sur l'un ou l'autre des paramètres suivants, le plus souvent en combinaison: les nœuds (nombre, diamètre, parfois position), la pente du fil, les fentes, le bois de réaction, les attaques d'insectes ou de champignons, les déformations géométriques, les endommagements mécaniques et la largeur des cernes d'accroissement, voir Figure 1-8, des cernes plus serrés étant signe d'une densité, et donc d'une résistance, plus élevée. Du fait que ces méthodes ont été développées séparément un peu partout dans le monde, chacune en fonction des besoins locaux, il existe une grande diversité de méthodes, de nombres de classes et de limites de classe. [1]

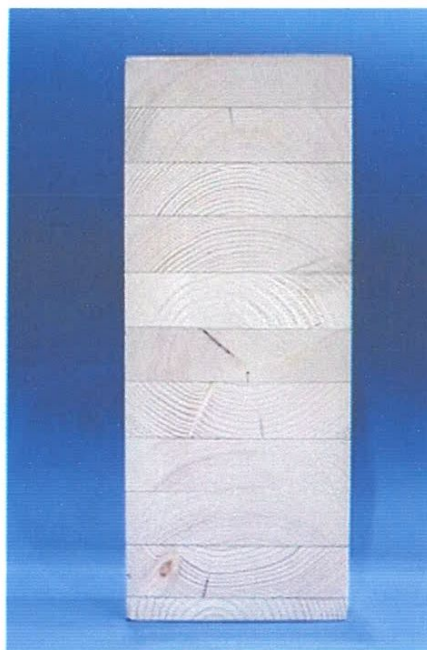


Figure 1-8 : différences de largeur de cerne

Les avantages de ce type de classement sont sa rapidité, environ de 2 à 4 secondes par pièce en scierie, et un investissement nul. De plus, dans une structure existante, il est toujours

possible d'estimer la résistance sur base d'appréciations visuelles. Au niveau des inconvénients, il faut bien constater que ces méthodes ne sont pas très discriminantes, car elles se basent sur un nombre limité de caractéristiques et n'ont pas accès à des grandeurs qui sont fortement corrélées à la résistance, ni très objectives, car chaque décision de classement revient à un individu. [1]

1.4.2 Le classement par machine

L'utilisation de machines élimine le facteur humain, source de variabilité. Le plus intéressant est de donner accès à des paramètres assez bien corrélés à la résistance mais que l'œil ne peut appréhender. Parmi les plus employés, citons la masse volumique, la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et la rigidité flexionnelle. Cette rigidité peut être obtenue par un essai de flexion statique ou par la fréquence propre de vibration.

Plus on intègre de paramètres dans une méthode de classement, plus celle-ci a de chances d'être précise. Grâce à des techniques numériques d'analyse d'images, on peut même combiner des mesures de rigidité à des caractéristiques qui, auparavant, étaient estimées par l'être humain, comme la présence de nœuds. [1]

Chapitre 2

La construction

2.1 LE BOIS ROND

La forme la plus simple du bois dans la construction est le bois rond. Il est constitué directement à partir de troncs ou de branches rectilignes dont on a enlevé l'écorce et que l'on a façonnés pour obtenir une forme cylindrique. Il revêt une certaine importance économique pour le producteur qui y trouve une manière de valoriser les bois d'éclaircie, de section trop faible pour être débités en bois scié.

Le bois rond est utilisé dans un grand nombre de structures très diverses, surtout extérieures : les poteaux téléphoniques ou électriques, les jeux d'enfants, les murs antibruit ou de soutènement, les ponts et les tours. Des habitations en rondins et madriers constituaient le type de construction traditionnelle à certaines époques, mais celles-ci sont un peu révolues. Le bois rond est celui qui requiert le moins d'opération mécanique pour son élaboration. Comme un nombre minimum de fibres sont coupées lors du façonnage, il présente moins de variabilité dans ses propriétés de résistance. La forme circulaire convient particulièrement bien pour la reprise des sollicitations axiales. C'est aussi celle qui présente la plus faible surface spécifique exposée aux attaques extérieures. Cette forme est par contre moins appropriée pour la reprise des efforts de flexion. [1]

Les assemblages sont en général plus difficiles qu'avec d'autres formes car on ne dispose pas de surface plane. Le bois rond est particulièrement sensible aux effets de la différence entre retrait tangentiel et retrait radial qui se manifestent sous la forme de fentes longitudinales,

Au prix de quelques opérations assez simples, il est possible d'obtenir un produit un peu plus élaboré. On peut par exemple pratiquer des gorges de décharge qui réduisent l'apparition des fentes longitudinales, voir Figure 2.1. [1]

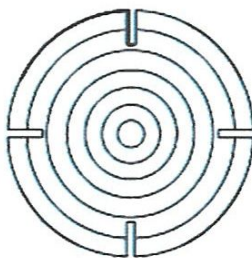


Figure 2.1: gorges de décharge

On peut aussi conserver des bois légèrement coniques en sciant deux faces, voir Figure 2.2, ce qui facilite en outre les assemblages.



Figure 2.2: bois rond scié sur deux faces

Des sections plus importantes sciées en bois trois-quarts ronds ou quart-ronds se prêtent bien à la constitution de poteaux, voir Figure 2.3. [1]

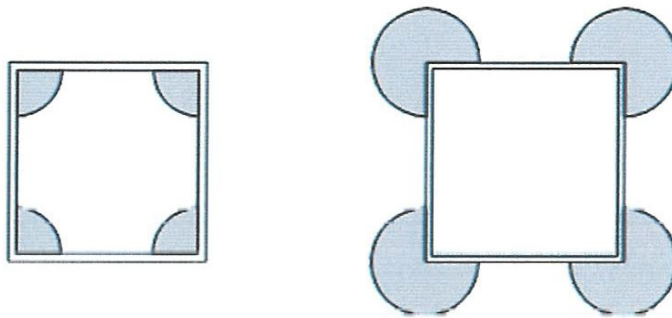


Figure 2.3: poteaux à base de bois ronds

Les possibilités sont très variées. Des bois ronds sciés à cœur refendu, c'est-à-dire en demi-rondes, se prêtent bien à l'utilisation en tant que moise. Les ronds sciés sur deux faces peuvent constituer un plancher en bois massif lorsqu'ils sont disposés côte à côte. La face supérieure demande cependant une finition supplémentaire. Celle-ci peut être réalisée par une chape de béton, ce qui offre la possibilité de constituer une dalle mixte bois-béton. [1]

2.2 LE BOIS SCIE

La section en bois scié est l'une des plus utilisées en construction bois. Les formes les plus courantes sont carrées, pour servir de poteau, et rectangulaires, pour servir de poutre. Les gorges de décharge permettent l'utilisation de fortes sections comprenant du bois de cœur. A cause de la dimension des grumes disponibles actuellement, la longueur est en général limitée à quelque 6, grand maximum 8 mètres. Il existe un certain nombre de sections standards disponibles facilement sur le marché, voir Figure 2-4 pour les bois résineux d'Europe. Il est aussi possible de commander des sections particulières, dites "sur liste", mais le coût en est souvent plus élevé et, comme les pièces que l'on reçoit sont fraîchement sciées, elles n'ont que le degré de séchage de la grume dont elles ont été tirées; il n'y a pas eu de séchage complémentaires des pièces sciées. [1]

	100	125	150	175	200	225
19						
25						
32						
38						
50						
63						
75						
100						

Sections préférentielles
 Autres sections

Figure 2.4: sections en mm pour un taux d'humidité de 20 %

2.3 LE BOIS LAMELLE COLLE

2.3.1 Historique

La construction en bois rond ou en bois scié pose une limite très restrictive en structure : la dimension des sections ou la longueur des éléments unitaires disponibles. Pour repousser cette limite, des ingénieurs ont eu l'idée, dès le XVI^e siècle, de constituer de nouvelles poutres en empilant des planches les unes sur les autres et en les assemblant avec des brides métalliques.

Dans les premières années du XX^e siècle, l'Allemand Otto Hetzer remplaçait les brides métalliques par de la colle à base de caséine du lait : le bois lamellé-collé (BLC) était né. L'évolution du bois lamellé-collé passe ensuite par de nombreux essais en Suisse, en Hollande et aux USA entre les années 1910 et 1930. Dans la période d'après-guerre, dans les années 1950, les colles synthétiques se vulgarisent, et le bois lamellé-collé est alors fabriqué avec la colle résorcine (diphénol+formol). Le bois lamellé-collé connaît ensuite un essor important après 1958, grâce à l'impact laissé par les constructions présentées à l'exposition universelle de Bruxelles. Aujourd'hui, environ 1,2 million de m³ sont mis en œuvre en Europe (EU) chaque année. Cette valeur est en croissance, grâce au renouveau de la construction en bois (motivé par l'aspect écologique du bois). [2]

Les éléments en bois lamellé-collé, que nous désignerons par BLC, permettent de s'affranchir des limites de dimension imposées par la taille des grumes disponibles. Les dimensions maximales réalisables sont en fait fonction du transport depuis l'usine vers le site d'utilisation. Des poutres droites de 60 m (voir annexe), de longueur ont déjà été réalisées. La

hauteur peut atteindre jusqu'à 2.5 m, et la largeur doit au moins être égale à 1/10 de la hauteur pour ne pas présenter un trop grand risque de déversement. [1]

Cette technique présente également le grand avantage de fournir un produit dont la variabilité est plus faible que celle du bois de base qui forme la section reconstituée, grâce à une dispersion et une homogénéisation des défauts locaux (voir annexe). [1]

2.3.2 Fabrication

Les éléments de base sont des planches en résineux d'une épaisseur maximale de 50 mm et de 1.5 à 5 m de longueur. On utilise le plus souvent l'épicéa, mais le sapin, le pin sylvestre et le douglas se rencontrent aussi ou, moins couramment, le mélèze, le pin maritime, voire l'iroko. Ces planches, pour pouvoir être collées, sont séchées jusqu'à une humidité inférieure à 15 % puis elles sont classées mécaniquement. Les nœuds d'extrémité sont éliminés pour garantir un aboutage de bonne qualité. Les parties contenant des flaches sont éliminées. [1]

Les planches sont aboutées à l'aide de joints collés sous pression à entures multiples (le bois de bout ne peut pas être collé) pour former des lamelles continues, voir Figure 2.5. La résistance des aboutages doit être supérieure à la résistance en flexion de la poutre à réaliser.

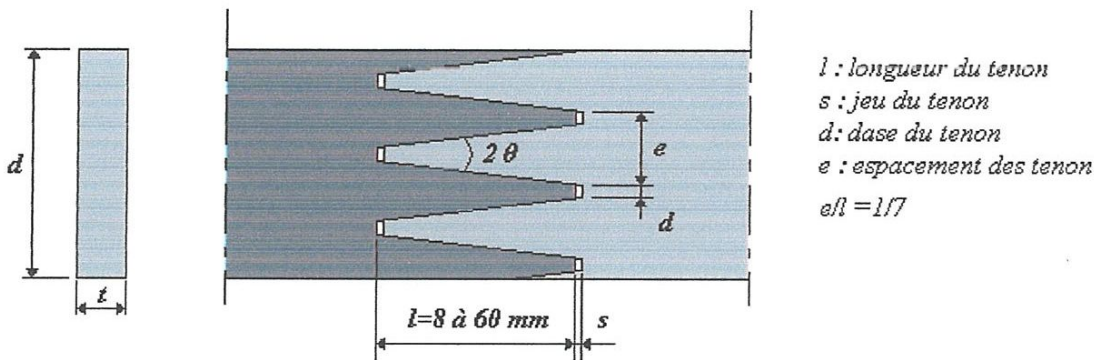


Figure 2.5: principe du joint à entures multiples

Les lamelles sont ensuite rabotées sur leurs faces supérieure et inférieure, encollées, empilées de manière à obtenir la section désirée, et pressées durant plusieurs heures pour former des poutres qui peuvent être droites ou courbes. Si toutes les lamelles sont de la même classe de résistance, la poutre est homogène. Il est cependant possible, et plus rationnel, pour les poutres travaillant en flexion d'utiliser des lamelles de classe de résistance plus élevée dans les

zones les plus sollicitées, c'est-à-dire aux parties hautes et basses de la section, et d'utiliser des lamelles moins résistantes à mi-hauteur. On obtient alors un bois lamellé-collé panaché. [1]

Les poutres seront envoyées à la finition où elles seront finalement rabotées latéralement, traitées et emballées. Si nécessaire, on y pratiquera également les perçages requis par les assemblages.

La Figure 2.6 montre schématiquement le principe de réalisation d'une poutre droite à double décroissance. [1]

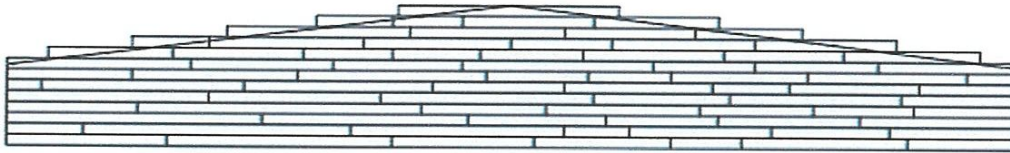


Figure 2.6: principe d'une poutre en lamellé-collé

Cette figure montre aussi que cette technique permet d'adapter la forme des pièces, et donc la matière à mettre en œuvre, à la forme du diagramme des moments.

Pour la fabrication de portique en BLC, il est possible de joindre des parties rectilignes, une colonne et une demi-poutre par exemple, à l'aide d'aboutage par entures de grande dimension, voir Figure 2.7. [1]

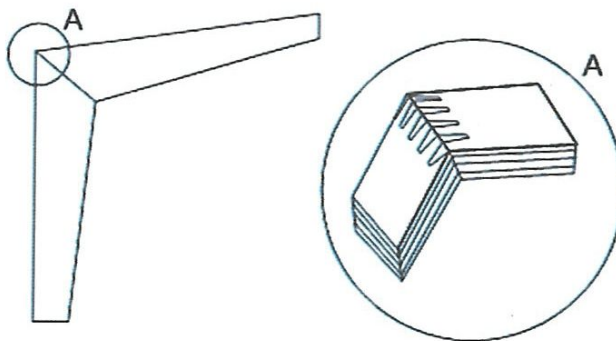


Figure 2-7: principe de l'enture à grandes dimensions

2.3.3 Caractéristiques et dimensionnement

Comme on a précédemment, les poutres en bois lamellé-collé peuvent être composées soit de lamelles de bois massif de classes mécaniques identiques (lamellé-collé homogène), soit de lamelles de bois massif et de classes mécaniques différentes (lamellé-collé panaché). Les poutres peuvent être à inertie constante ou à inertie variable.

Les dimensions courantes varient en largeur de 60 à 240 mm, en hauteur de 100 à 600 mm et en longueur jusqu'à 40 m. De nombreuses singularités sont éliminées lors de l'aboutage tels que les nœuds vicieux et non adhérents, flèches, gerces, nœuds au droit des aboutage. [2]

2.3.3.1 Classes de résistances mécaniques

Les classes de résistances mécaniques des éléments en bois lamellé-collé sont définies à partir des classes de résistances des lamelles, de la manière suivante : [2]

Tableau 2-1: Classe de résistance du bois lamellé-collé

Classe de résistance du bois lamellé-collé	GL24	GL28	GL32
BLC homogène	C24	C30	C40
BLC panaché	C24/C18	C30/C24	C40/C30
Lamelles extérieures	C24	C30	C40
Lamelles intérieures	C18	C24	C30

2.3.3.2 Caractéristiques mécaniques pour le calcul

Le dimensionnement des poutres en bois lamellé-collé se fait conformément aux règles CB71 ou EC5. Les contraintes, rigidités et masses volumiques sont données en fonction des paramètres suivants : [1]

- Qualité des lamelles : homogènes ou panachées
- Produits certifiés ou non
- Humidité des bois à 15% maximum.

Contraintes caractéristiques des bois lamellés-collés définies par NF EN 1194, pour calculs avec EC5. [2]

(a) pour bois homogène :

Tableau 2-2 : les valeurs des Caractéristiques mécaniques de bois lamellé-collé homogène

		Classe de résistance			
caractéristique	Symbole	GL24h	GL28h	GL30h	GL40h
Propriétés des résistances (N/mm²)					
Flexion	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
traction axiale	$f_{t,\parallel,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
traction transversale	$f_{t,\perp,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
compression axiale	$f_{c,\parallel,g,k}$	24	26,5	29	31
compression transversale	$f_{c,\perp,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
cisaillement	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Propriétés de rigidité (KN/mm²)					
Module moyen d'élasticité axiale	$E_{\parallel,g,moy}$	11,6	12,6	13,7	14,7
Module d'élasticité axiale au fractile 5%	$E_{\parallel,g,05}$	9,4	10,2	11,1	11,9
Module moyen d'élasticité transversale	$E_{\perp,g,moy}$	0,39	0,42	0,46	0,49
Module moyen de cisaillement	$G_{g,moy}$	0,72	0,78	0,85	0,91
Masse volumique (Kg/m³)					
Masse volumique au fractile 5%	ρ_k	380	410	430	450

(b) pour du bois panache :

Tableau 2-3 : les valeurs des Caractéristiques mécaniques de bois lamellé-collé panache

		Classe de résistance			
caractéristique	Symbole	GL24h	GL28h	GL30h	GL40h
Propriétés des résistances (N/mm²)					
flexion	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
traction axiale	$f_{t,\parallel,g,k}$	14	16,5	19,5	22,5
traction transversale	$f_{t,\perp,g,k}$	0,35	0,4	0,45	0,5
compression axiale	$f_{c,\parallel,g,k}$	21	24	26,5	29
compression transversale	$f_{c,\perp,k}$	2,4	2,7	3,00	3,3
cisaillement	$f_{v,g,k}$	2,2	2,7	3,2	3,8
Propriétés de rigidité (KN/mm²)					
Module moyen d'élasticité axiale	$E_{\parallel,g,moy}$	11,6	12,6	13,7	14,7
Module d'élasticité axiale au fractile5%	$E_{\parallel,g,05}$	9,4	10,2	11,1	11,9
Module moyen d'élasticité transversale	$E_{\perp,g,moy}$	0,32	0,39	0,42	0,46
Module moyen de cisaillement	$G_{g,moy}$	0,59	0,72	0,78	0,85
Masse volumique (Kg/m³)					
Masse volumique au fractile5%	ρ_k	350	380	410	43

2.3.3.3 Classes de service des éléments lamellés-collés

La norme NF EN 1995 (NF P 21-711) : EC 5 : calcul des structures en bois, définit des classes de services d'utilisation des éléments en bois, correspondant à une ambiance donnée (température et humidité) : [2]

- Classe de service 1 : la teneur en humidité dans les matériaux correspond à une température de 20°C et une humidité relative ambiante ne dépassant 65% que quelques semaines par an (humidité du bois résineux de 12%).
- Classe de service 2 : la teneur en humidité dans les matériaux correspond à une température de 20°C et une humidité relative ambiante ne dépassant 85% que quelques semaines par an (humidité du bois résineux de 12%).
- Classe de service 3 : conditions climatiques conduisant à des taux humidité plus élevés qu'en classe 2.

2.3.3.4 Epaisseurs des lamelles

Le tableau suivant définit les valeurs maximales des épaisseurs et des aires des sections des lamelles en fonction des classes de service. [2]

Le tableau 2-4 : les valeurs maximales des épaisseurs de lamelles

CLASSE DE SERVICE		1	2	3
Résineux	Epaisseur (cm)	4,5	4,5	3,5
	Section (cm ²)	100	90	70
feuillus	Epaisseur (cm)	4,0	4,0	3,5
	Section (cm ²)	75	75	60

L'épaisseur est aussi déterminée par le rayon du cintrage et par résistance caractéristique en flexion des aboutages.

2.3.3.5 Classes d'emploi (classe de risques biologiques)

Selon sa fonction et sa localisation dans la construction, l'élément en bois lamellé-collé doit être utilisable dans des conditions correspondant à une classe d'emploi définie. Il est préférable de concevoir des ouvrages en bois lamellé-collé avec les classes d'emploi 1 et

2. Les classes d'emploi 3 et 4 nécessitent de nombreuses précautions (collage, préservation, assemblages...). [2]

2.3.3.6 Essences utilisables

Le tableau suivant indique par essences de bois utilisées en France pour la fabrication de poutre en bois lamellé-collé, la technique de collage, la classe d'emploi maximum pouvant être atteinte avec traitement de préservation ou sans traitement mais en purgeant l'aubier du bois, et la résistance naturelle de l'essence à l'attaque de termites. [1]

Tableau 2-5 : Durabilité des principales essences de bois utilisée pour la fabrication du BLC :

Essence de bois	Collage	Avec traitement 3	Sans traitement	Termite
châtaignier	Avec précautions		3	moyenne
Chêne	Avec précautions	3	3	non
douglas	Courant	3	3*	non
épicéa	Courant	2		non
mélèze	Courant	3	3*	non
Pins-sylvestres	Courant	3	3*	non
Pins maritimes	Courant	3	3*	non
sapin	Courant	2	3*	non
Western red Cedar	Courant	3	3*	non
Doussié, merbau, moabi, padouk	Avec précautions		4*	bonne
tatajoubá	Avec précautions		4*	moyenne
iroko	Avec précautions		3*	Bonne
* uniquement pour des ouvrages d'une durée de vie prévue <<50 ans.				

2.4 LES FAMILLES DE PANNEAUX

La réalisation de panneaux peut-être considérée, dans son principe, comme une extension du BLC. Alors que les éléments en BLC sont linéaires, de type poutre, les panneaux s'étendent sur deux dimensions principales ; ils sont de type plaque. Le principe de la constitution d'éléments de grande dimension à partir d'éléments plus petits est ici poussé encore plus loin car les dimensions des constituants sont de l'ordre du millimètre. Il existe une très grande variété de panneaux par leurs qualités, types, épaisseurs, ce qui offre un grand nombre de possibilités d'utilisation mais oblige également à faire le bon choix de panneaux en fonction de l'usage particulier. [1]

La stabilité dimensionnelle des panneaux est en général meilleure que celle du bois massif. Certains types de panneaux sont même particulièrement stables. Si l'épaisseur n'est pas trop importante, il est possible de cintrer le panneau pour répondre à certaines contraintes architecturales. La mise en œuvre de panneaux peut se faire par du personnel peu qualifié et permet malgré tout de réaliser rapidement des structures légères et soignées. La souplesse de leur mise en œuvre permet de réorganiser aisément des espaces jugés peu attractifs ou dont on veut modifier l'affectation : division de pièces trop grandes, rabaissement de plafond trop haut, etc. En raison des bonnes caractéristiques thermiques du bois, les panneaux conviennent bien pour les habitations où ils contribuent à réduire les déperditions calorifiques. [1]

La durabilité des panneaux dépend de la durabilité naturelle de l'essence qui forme le matériau de base et il faut veiller à éviter les situations de forte humidité permanente. Pratiquement tous les panneaux ont tendance à absorber l'humidité de manière relativement importante.

2.4.1 Les contre-plaqués

La division des gros défauts en défauts plus petits est particulièrement bien réalisée dans la fabrication du contre-plaqué. Les billes de bois sont déroulées en placages de 1 à 5 mm d'épaisseur qui sont séchés et dont on empile et colle ensuite plusieurs couches sous pression, en prenant soin d'orienter perpendiculairement le fil du bois d'une couche à l'autre, voir Figure 2-8. Le nombre de plis est en général impair. La structure à fils croisés limite les variations dimensionnelles dans le plan et offre une protection du chant dans toutes les directions, puisque au moins un pli aura toujours ses fils parallèles au chant. En flexion à

plat, le matériau obtenu possède une certaine raideur et résistance dans les deux sens de flexion perpendiculaire au plan. Ces propriétés sont meilleures dans le sens de flexion qui mobilise les plis extérieurs. C'est surtout lorsqu'il travaille dans son plan, en flexion sur chant, que le contre-plaqué trouve sa meilleure utilisation. On le trouve ainsi dans les voiles, dans les panneaux qui assurent un contreventement, comme gousset d'assemblage, comme âme mince de sections composées en caisson ou dans l'industrie aéronautique. [1]

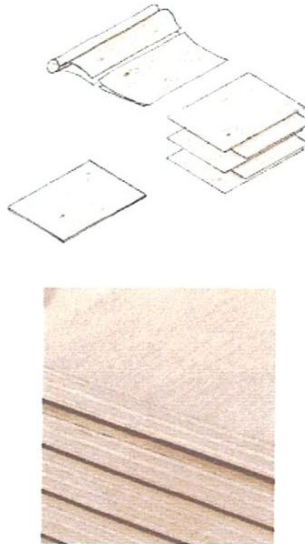


Figure 2-8-a: principe de fabrication du contre-plaqué

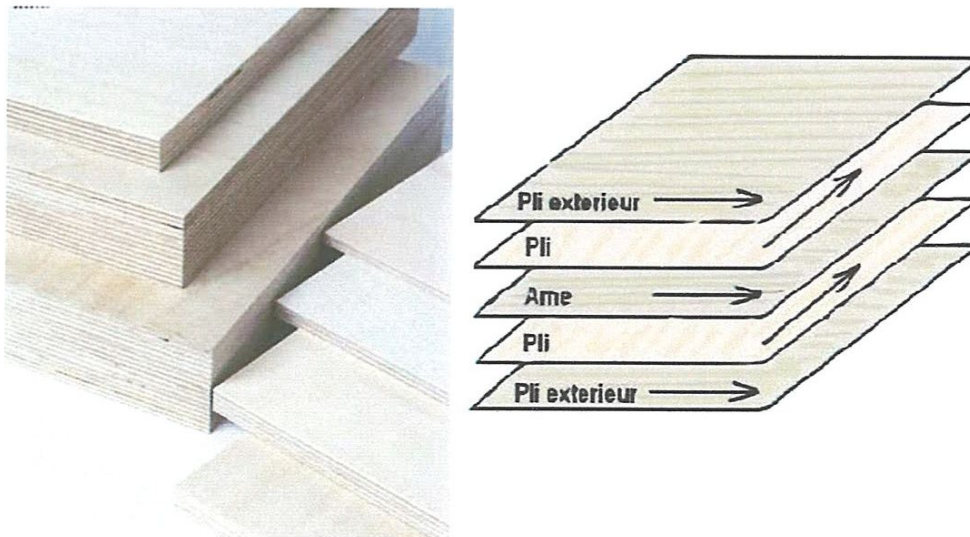


Figure 2-8-b: principe de fabrication du contre-plaqué

2.4.2 Les panneaux de bois lamifiés + parralam

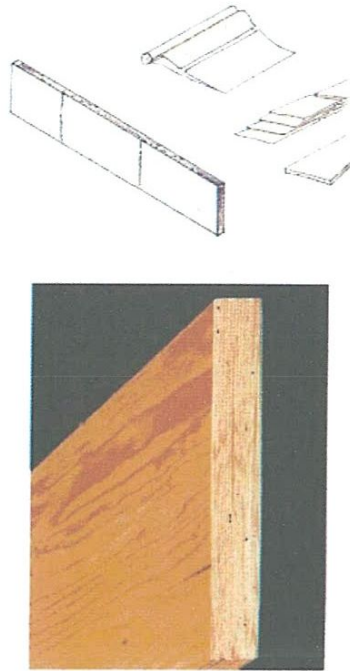


Figure 2-9: principe de fabrication du la mi-bois

Les panneaux de bois lamifiés, appelés parfois la mi-bois ou encore LVL, sont constitués suivant un principe assez semblable à celui du contre-plaqué, avec comme différence le fait que les placages sont collés à fils parallèles et qu'ils sont produits dans des dimensions commerciales plus grandes, jusqu'à une vingtaine de mètres. On obtient ainsi des panneaux extrêmement résistants, même si les joints de chaque pli sont simplement posés bout à bout, de manière décalée afin de minimiser la perte de résistance qu'ils occasionnent. Parfois, surtout dans les panneaux de grande largeur, on insère une couche disposée dans l'autre sens pour améliorer la stabilité. [1]

Les noms commerciaux les plus couramment rencontrés pour ce type de produit sont Micro-lam (en Amérique) et Kerto (en Europe). Le bois lamifié peut être utilisé en association avec du BLC ou du bois scié pour la fabrication de poutres, voir Figure 2.10, de barres ou de panneaux.

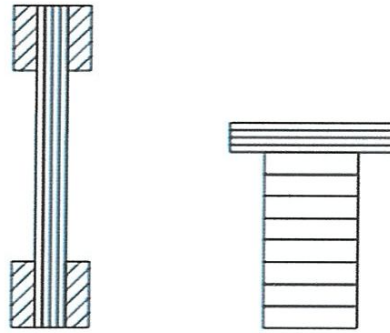


Figure 2-10: association du la mi-bois avec bois scié ou BLC

Le Parallam est fabriqué au départ des mêmes éléments que le lamibois, c'est-à-dire des placages minces. On utilise ici les placages obtenus lors des couches externes de la bille de bois qui, à cause de leurs dimensions irrégulières, ne peuvent être utilisés pour le lamibois. Ces placages sont ensuite découpés parallèlement au fil du bois en fines lamelles de 3 mm d'épaisseur et de 2,4 mètre de longueur. Les lamelles, enduites d'un adhésif aux propriétés hydrofuges, sont introduites dans une presse en continu qui sort une section rectangulaire d'environ 30 x 50 cm². Après ponçage, l'élément produit est débité en section plus petites et aux longueurs voulues. Les formes produites sont plutôt celles de poutres, jusqu'à 285 x 480 mm² de section, ou de poteaux, jusqu'à 180 x 180 mm². Ce produit présente une capacité de résistance jusqu'à deux fois supérieure à celle du bois d'œuvre ordinaire ainsi qu'une grande stabilité dimensionnelle. Il est utilisé aussi bien comme poutre, comme linteau, que comme poteau. On peut aussi assembler des éléments pour réaliser de grands treillis. [1]

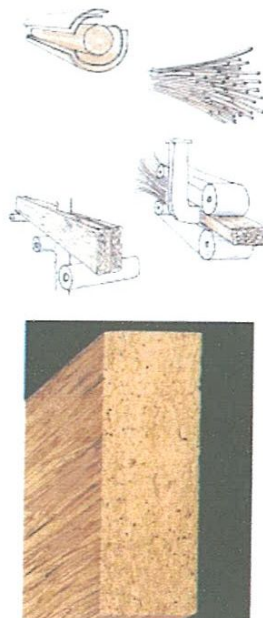


Figure 2-11: principe de fabrication du parralam

2.4.3 Les panneaux de fibres et de particules

La logique de décomposition-recomposition appliquée pour le BLC, avec des lamelles d'environ 50 mm, et pour le contre-plaqué ou le la mi-bois, avec des placages de quelques millimètres, peut être poussée encore plus loin avec les panneaux de particules ou, encore plus loin, avec les panneaux de fibres. Dans la construction, on les utilise essentiellement en sous-toiture, dans les planchers, comme cloisons, revêtement de plafonds. [1]

Les panneaux réalisés à base d'une essence non durable et qui ne contiennent pas d'agent fongicide ne conviennent cependant pas pour des utilisations où l'humidité relative de l'air risque de dépasser 80% pendant plus de quelques semaines par an. Il faut donc, dans les bâtiments, veiller au contact direct avec l'humidité, mais aussi à la condensation. [1]

- Le type A ne peut être utilisé que pour des applications non structurelles lorsqu'ils ne sont pas soumis à des variations d'humidité. Ils conviennent donc très bien pour des cloisons intérieures mais pas pour être utilisés du côté vide d'un mur creux.
- Le type B peut être utilisé pour des applications structurelles (en contreventement, par exemple) ou pour des applications non structurelles, éventuellement en présence de variations d'humidité et de température, mais sans surcharge permanente d'humidité (dans les panneaux de toiture, par exemple).
- Le type C est destiné à des applications non structurelles, sans gradients de température ou d'humidité, comme panneau de remplissage ou comme dalle de plafond, par exemple.

La colle utilisée pour la fabrication des panneaux contient en général du formaldéhyde dont certaines quantités vont se retrouver dans l'atmosphère du fait d'une lente décomposition au cours de la vie de la structure. On distingue à ce propos deux catégories, la classe E1 et la classe E2 (suivant norme européenne).

- On peut utiliser des panneaux de particules de la classe E1 non recouverts à raison de 1.5 m² de panneau par m³ de volume du local.
- Pour les panneaux de la classe E2, il faut se limiter à 1 m²/m³, sans quoi il faut appliquer une finition étanche à l'air.

Par rapport à ces limites, on notera que l'utilisation sans restriction est admise dans des locaux non habités et munis d'une ventilation forte comme des garages et des combles non

habitables. Il faut, par contre, se fixer des limites plus contraignantes si les locaux sont destinés à être habités par des personnes extrêmement sensibles au formaldéhyde.

Pour les panneaux de fibre, la matière première est formée de bois de moindre qualité à croissance rapide, de chutes de scieries, de coupes d'éclaircies,... Celle-ci est fragmentée, puis soumise à la vapeur à plus de 170°C pour la ramollir avant de subir le défibrage par meules rotatives. La pâte ainsi obtenue est ensuite broyée plus ou moins finement en fonction de la qualité désirée et on y ajoute l'adhésif. Le reste du processus peut mettre en œuvre diverses techniques, voie humide (panneaux monocouche avec une face lisse et une face gaufrée), mi-sèche ou sèche (possibilité de panneaux à 3 couches), avec pour caractéristiques communes la production de panneaux en continu, nécessitant un pressage et une prise à la chaleur. On distingue

- les softboards ($\rho \leq 400 \text{ kg/m}^3$), utilisés pour l'emballage, comme panneaux d'isolation thermique. Ils ne supportent pas l'humidité, sauf s'ils sont imprégnés de bitume, auxquels cas ils peuvent être utilisés dans les façades légères comme barrière d'eau, assurant la protection et améliorant la protection thermique.
- les MDF Medium Density Fibre Boards ($600 \leq \rho \leq 850 \text{ kg/m}^3$), aux applications les plus diverses.
- les hardboards ($800 \leq \rho \leq 1100 \text{ kg/m}^3$), souvent revêtus, utilisés dans l'industrie du meuble, comme panneaux de portes à peindre.

Les hardboards extra durs trouvent une application majeure comme panneaux de coffrage perdus car ils peuvent être aisément cintrés.

Pour les panneaux de particules, on utilise aussi des résidus de coupe ou de transformation dont la désorganisation est limitée au niveau de particules. Ces particules sont encollées et étalées en plusieurs couches parallèlement au plan du panneau. Les couches extérieures sont en général formées de particules plus fines, ce qui donne des faces lisses prêtes à peindre ou à revêtir, tandis que les couches médianes peuvent être constituées de particules plus grossières. Le produit est alors pressé à plat et à chaud. Pour la réalisation d'éventuels panneaux monocouches, on utilise des particules plus grossières.

Les panneaux OSB (Oriented Strand Board) sont constitués de particules qui ont la forme de plaquettes rectangulaires de 7 à 10 cm de long pour 1 à 5 mm de large et de moins d'un

millimètre d'épaisseur. Celles-ci sont orientées dans le sens longitudinal du panneau pour les couches extérieures et dans l'autre sens ou sans orientation particulière pour la ou les couches intérieures. On obtient ainsi des résistances très élevées dans le sens d'orientation préférentiel des plaquettes (au niveau de ses propriétés mécaniques, l'OSB se situe entre le panneau de particule et le contre-plaqué). La résistance à l'humidité est également meilleure que celle des panneaux de fibres ou de particules, ce qui fait que les panneaux OSB conviennent bien aux applications structurales dans la construction. Le formage de rainures et de languettes apporte des avantages lors de la réalisation de planchers car il offre une plus grande liberté sur le positionnement par rapport aux solives et autorise d'en augmenter l'entre distance. [1]



Figure 2.12 : principe de fabrication de l'OSB

En aucun cas l'OSB ne peut être utilisé pour des applications à l'extérieur où il risque d'être exposé aux intempéries. [1]

Les panneaux gaufrés (Waferboard) sont, dans le principe, semblables aux panneaux OSB mais ils sont formés de plaquettes carrées de 50 mm de côté. Ils présentent donc des propriétés semblables dans les deux directions. [1]

Il existe un grand nombre de types plus spéciaux qui sont cités ici pour mémoire: panneaux extrudés avec liant à base de résine synthétique, panneaux de particules à liant minéral

(bois-ciment), panneaux légers en laine de bois, panneaux de coffrage (très lisses, présentant un faible gonflement et une bonne résistance à l'eau), les panneaux de particule ignifugés, les panneaux contre-plaqués blocs (une âme formée de lattes de bois plaquée sur chaque face d'une feuille à contre-fil. [1])

Chapitre 3

Les structures

3.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on reprend quelques-uns des types les plus courants de structures réalisables à partir de bois ou de matériaux à base de bois. Certaines structures font largement appel à la collaboration avec d'autres matériaux. [1]

3.2 LA POUTRE FLECHIE

La poutre simple sur 2 appuis d'extrémités est certainement la structure la plus simple et la plus primitive qui soit. Il suffit de jeter un tronc d'arbre entre deux rives d'une rivière pour en former une. [1]

3.2.1 Poutre simple de hauteur constante

Les 4 vérifications auxquelles il faut toujours porter attention lors du dimensionnement structurel sont ; [1]

- La résistance au déversement.
- La résistance à la flexion.
- La déformabilité en flexion et les vibrations.
- La résistance à l'effort tranchant.

3.2.2. Cas des pannes de toiture

Des madriers en bois sont couramment utilisés comme pannes de toiture, dans des halls, dans des habitations familiales,.... La manière dont les charges sont transmises dépend de la disposition des pannes, suivant qu'elles sont placées perpendiculairement à la toiture, voir Figure 3-1-a, ou verticalement, voir Figure 3-1-b. [1]

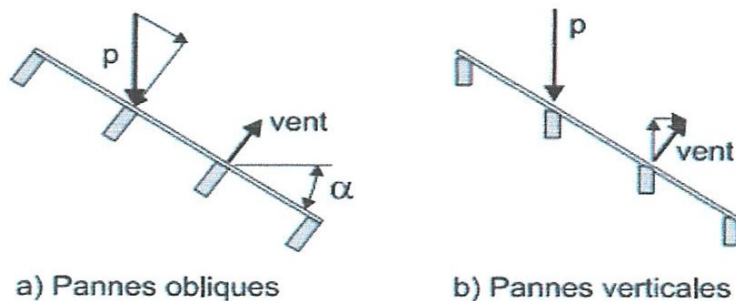


Figure 3-1: disposition des pannes

Note : on a supposé sur la Figure 3-2 que chaque panne reprend $\frac{1}{4}$ du poids total, ce qui constitue une légère approximation par rapport aux vraies réactions de l'élément hyperstatique. [1]

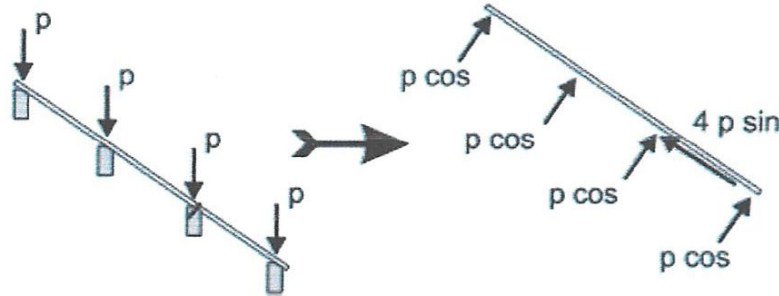


Figure 3-2: phase de montage ; une seule fixation

Enfin, on n'oubliera pas de prendre en compte le cas de soulèvement possible sous l'effet du vent qui, s'il n'est pas souvent critique pour les pannes elles-mêmes, peut l'être pour les fixations de la toiture sur la maçonnerie. Afin d'éviter l'arrachement et l'envol de la toiture, on ancrera généralement les pannes suffisamment loin dans la maçonnerie à l'aide de feuillards métalliques, voir Figure 3-3. [1]



Figure 3-3: feuillards

3.2.3. Poutres composées

Lorsqu'il est nécessaire de mettre en œuvre des poutres de résistance et de raideur supérieure à ce que permet le bois massif, on peut soit avoir recours au BLC, ou constituer une poutre par l'assemblage de divers éléments. [1]

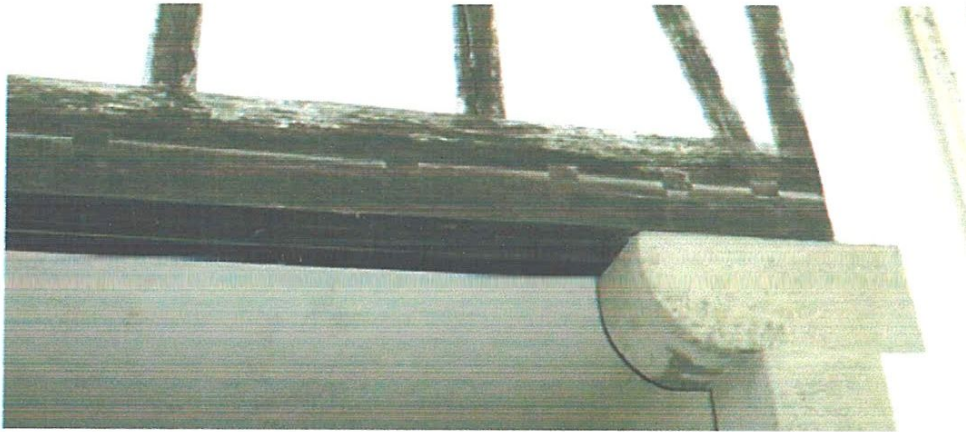


Figure 3-4: poutre composée (photo)

Il est possible de superposer deux éléments et de les solidariser par l'intermédiaire de cales en bois durs, voir Figure 3-4 et Figure 3-5. Il s'agit là d'une méthode traditionnelle pour créer une poutre avec section de grande hauteur mais elle n'est plus guère employée à cause de la quantité de main d'œuvre nécessaire. En plus, si elle permet d'augmenter la hauteur, la longueur de la poutre composée reste tributaire de la longueur maximale disponible des éléments constitutifs. Elle ne peut donc convenir que pour des poutres de longueur modérée, mais fortement chargées. [1]

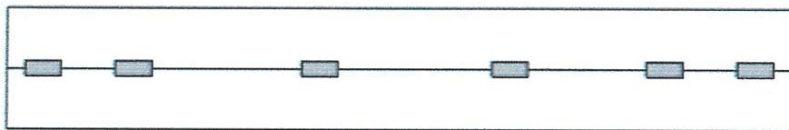


Figure 3-5: poutre composée

3.2.4. Poutres sous-tendues

Pour franchir des portées importantes sans appui intermédiaire, on peut avoir recours à la technique de la poutre sous-tendue. Dans la version la plus simple, un poinçon central supportant la poutre est lui-même fixé aux deux extrémités par des tirants qui, étant essentiellement tendu, sont souvent en acier, voir Figure 3-6. [1]

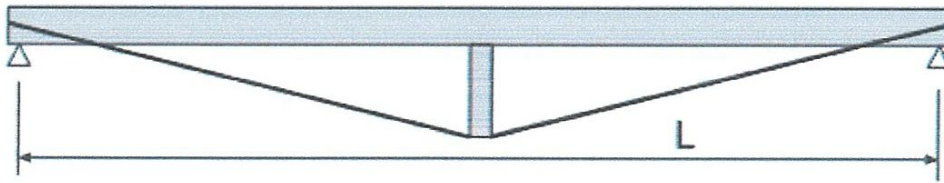
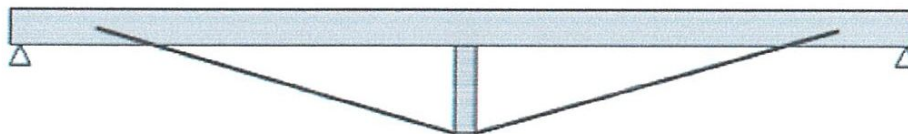
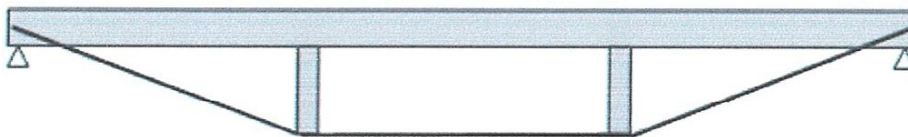


Figure 3-6: poutre sous-tendue

Ce type de structure ne comporte que des assemblages simples et donne une impression de grande légèreté. Cette solution convient aussi pour corriger à posteriori un dimensionnement trop faible ou une majoration de la charge appliquée qui donneraient lieu à des contraintes et à des déformations trop importantes. Si les tirants doivent être appliqués à une poutre existante dont les appuis ne sont pas accessibles, rien n'empêche de décaler le point d'ancrage des tirants de quelques décimètres par rapport aux extrémités, voir l'figure 3-7-a. Une autre variante est la poutre à double poinçon, voir Figure 3-7-b. [1]



a) points d'ancrages rapprochés



b) doubles poinçons

Figure 3-7 poutre sous-tendue (variantes)

3.3 LES ARCS

Les arcs en bois apportent une bonne solution à la couverture de grandes portées, de 30 à 100 mètres par exemple. En effet, plus la portée est grande, plus l'influence du poids propre se renforce par rapport à celle des charges à supporter et un matériau au rapport performance/poids propre aussi favorable que le bois trouve naturellement un champ d'application privilégié. Quel que soit le matériau, un arc est essentiellement sollicité en compression, ce qui est une forme de sollicitation donnant lieu à des déformations beaucoup moins importantes que la flexion. L'arc est donc bien la forme des grandes portées. [1]

Il est possible de constituer très simplement des structures à partir d'éléments droits qui fonctionnent néanmoins suivant le principe des arcs à 3 articulations, voir Figure 3-8 et Figure 3-9. La composante flexionnelle est cependant plus importante que si les éléments étaient courbes. [1]

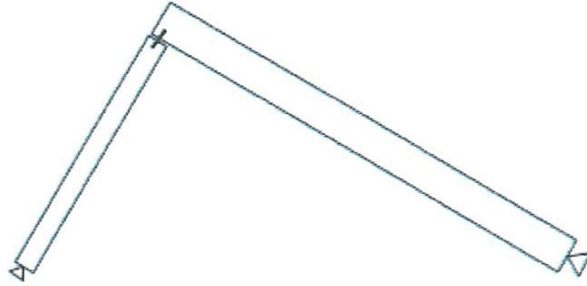


Figure 3-8: arc à éléments droits



Figure 3-9: arc à éléments droits (photo)

3.4 LES PORTIQUES

Un portique est constitué de l'assemblage de plusieurs éléments rectilignes. Il est possible de concevoir les assemblages soit pour qu'ils transmettent les moments de flexion soit comme des rotules. Dans la construction en bois, la différence de coût par assemblage entre ces deux options est peut-être encore plus marquée que dans les autres matériaux. C'est pourquoi on essaye autant que possible de mettre en œuvre des articulations, d'autant plus qu'un portique isostatique est insensible aux tassements d'appuis et, surtout, à la déformabilité des assemblages. [1]

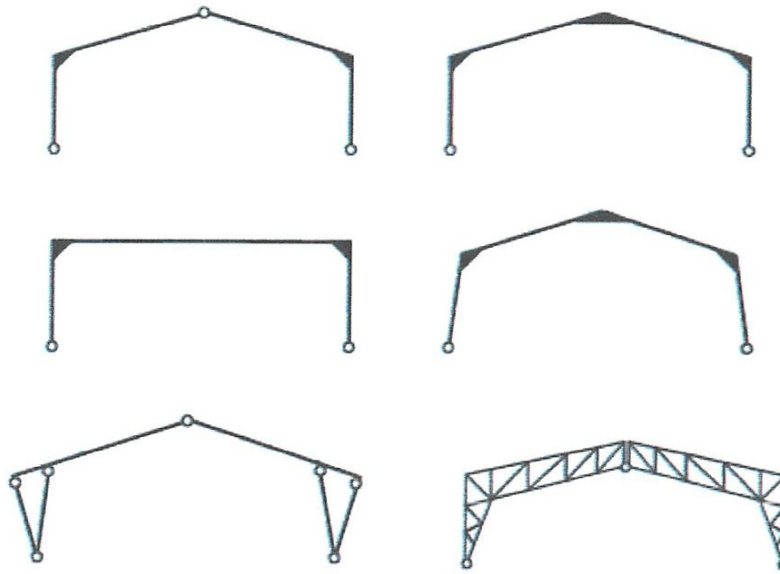


Figure 3-10: quelques types de portiques

3.5 LES SYSTEMES DE TREILLIS

3.5.1 Charpentes industrialisées

Une charpente industrialisée se compose à titre principal de fermes chevrons réalisées en atelier et placées avec un faible écartement (60 ou 90 cm, par exemple). Des éléments transversaux maintiennent les écartements entre pièces voisines, tandis que des éléments de stabilisation empêchent les fermes de déverser et les éléments individuels de flamber et assurent également la transmission des efforts horizontaux dus au vent. Enfin, des dispositifs d'ancrage fixent les charpentes sur les appuis et aux murs pignons. [1]

Le rôle de ces fermes est de supporter la couverture et le plafond ainsi qu'un plancher, dans le cas de combles habitables. [1]

Le plus souvent, les fermes possèdent un entrain horizontal. Leur mise en œuvre ne présente pas de grande difficulté. Parmi les formes les plus rencontrées, on peut citer les suivantes, voir Figure 3-11 : [1]

- a) en W, la plus courante,
- b) en double W, pour des charges ou des portées importantes,
- c) en M, pour un plafond lourd,

- d) en éventail, pour une couverture lourde,
- e) à une seule pente,
- f) tronquée, pour réaliser une croupe
- g) à entrain porteur, pour obtenir des combles habitables.

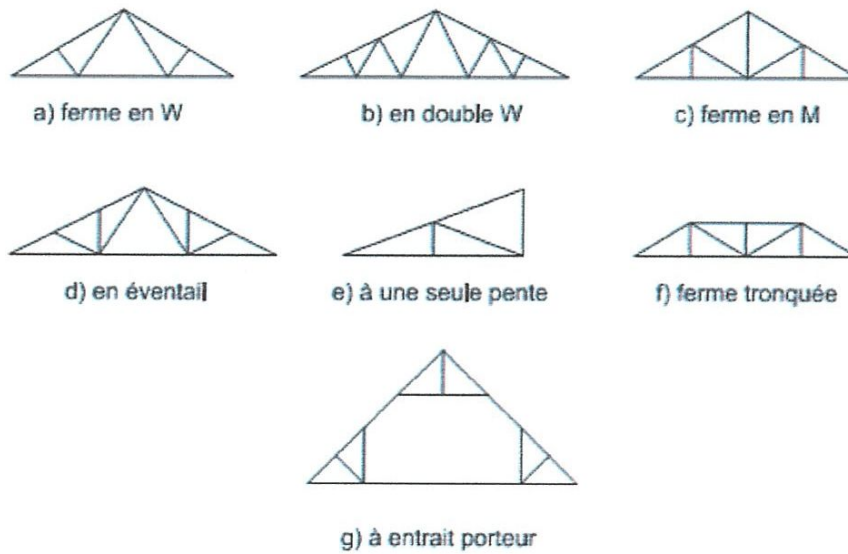


Figure 3-11: fermes à entrain horizontal

Il existe des fermes sans entrain horizontal, voir Figure 3-12. Celles-ci demandent une attention particulière au niveau du calcul et de la réalisation car leur mode de fonctionnement est différent. [1]

La ferme en A induit une légère traction dans le plancher et nécessite des appuis bloqués.

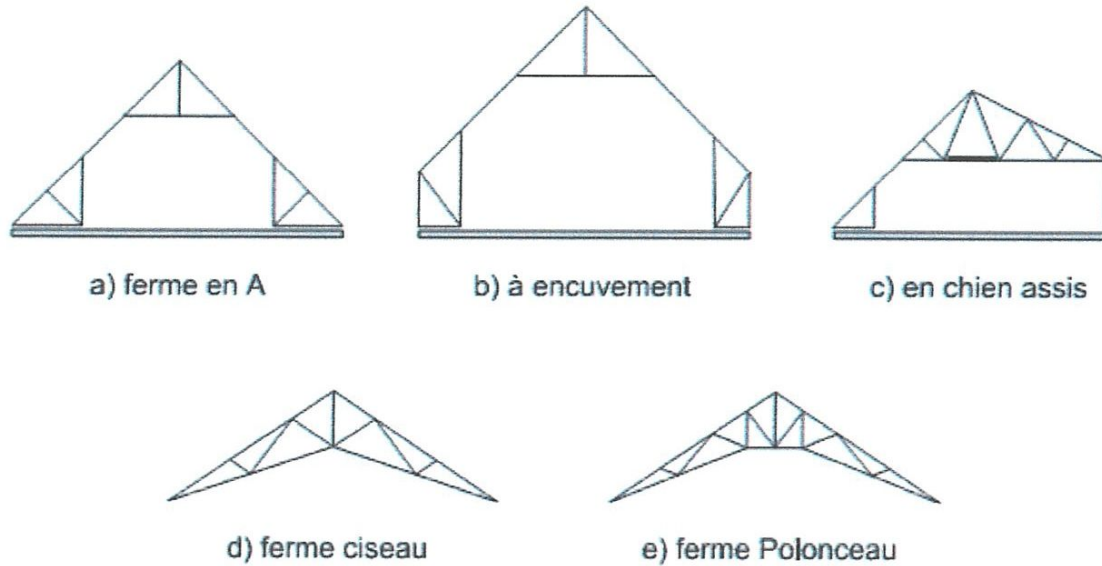


Figure 3-12: fermes sans entrain horizontal

3.6 LES MAISONS D'HABITATIONS

Il existe 3 types principaux d'habitations en bois dont chacun fait l'objet d'un des paragraphes suivants. [1]

3.6.1 Maisons à ossature bois

Les maisons à ossature bois ont été développées à l'origine aux Etats-Unis où elles ont connu un développement extraordinaire. L'habitation est composée de l'assemblage de panneaux, le plus souvent préfabriqués en usine, qui assurent un ensemble de fonctions différentes :

- transmission des charges verticales,
- reprise des charges horizontales,
- isolation thermique,
- étanchéité à l'air et à la pluie

3.6.2 Systèmes à madriers

Les madriers, réalisés en bois massif ou en BLC, arrivent sur chantier avec chacun sa longueur et ses usinages d'ancrage définitifs. Ils sont repérés individuellement et posés les uns sur les autres suivant le plan d'assemblage pour former des cloisons massives. Celles-ci peuvent être doublées, sur les murs extérieurs, d'une couche d'isolant et d'un bardage extérieur (à séparer par une lame d'air). [1]

A cause du retrait transversal du bois, les murs vont tasser de plusieurs mm durant le début de la vie de la construction. Il faut en tenir compte à divers endroits lors de la conception, notamment au-dessus des châssis des différentes baies, et ne pas s'en effrayer lorsqu'ils se produisent. Les tassements peuvent présenter un caractère différentiel à cause de l'hétérogénéité du bois ou de celle de la composition architecturale. [1]

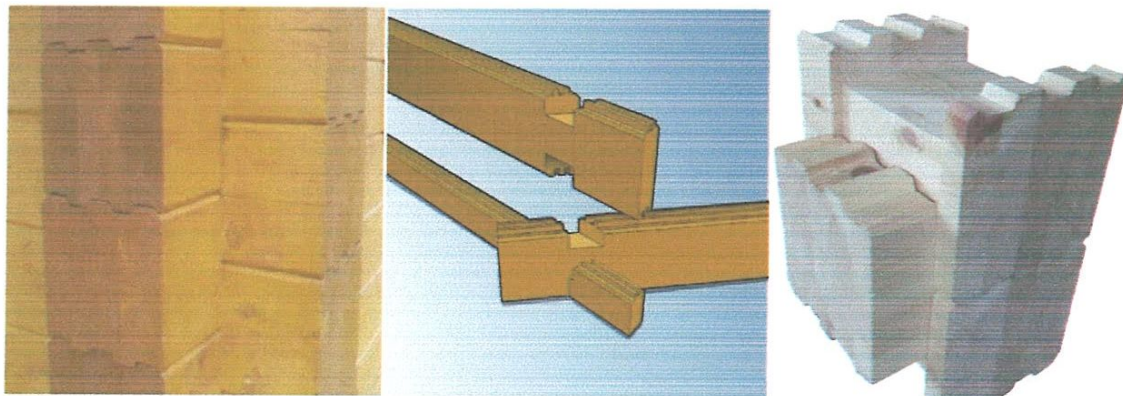


Figure 3-13: Systèmes à madriers

3.6.3 Systèmes poutres et poteaux

Trouvant son origine dans les systèmes les plus traditionnels utilisés depuis des siècles, comme par exemple les maisons à colombages, la construction à poutres et poteaux actuelle permet une utilisation moins dispendieuse de matière et de main d'œuvre grâce à l'utilisation de procédés techniques modernes, tant au niveau de la constitution des éléments (BLC, lamibois, etc.) qu'au niveau des assemblages. [1]

La structure portante est formée d'un ensemble d'éléments rectilignes verticaux, les poteaux, et horizontaux, les poutres principales, qui dessinent dans l'espace une trame parallélépipédique. Des poutres secondaires sont posées sur les poutres principales et supportent elles-mêmes les planchers. Différents cloisons verticales articulent les espaces à l'intérieur de l'habitation ou forment la peau extérieure. Ces cloisons ne supportent pas les charges

verticales mais on peut leur faire jouer un rôle structurel dans la reprise des efforts horizontaux si elles jouent le rôle de contreventement. [1]

Ce type de solution convient assez bien pour les constructions implantées sur des terrains à forte déclivité donnant lieu à des décalages de niveau dans la construction.

3.7 PONTS ET PASSERELLES

3.7.1 Principes d'utilisation du bois dans les ponts

Le bois convient particulièrement lorsque les charges variables ne sont pas très élevées car, dans ce cas, la charge principale est le poids propre de l'ouvrage et le matériau bois est l'un des matériaux de construction les plus légers. Il peut se révéler particulièrement avantageux de combiner le bois avec d'autres matériaux. Le béton peut reprendre la compression dans une dalle mixte et, en plus, sa présence protège de la pluie les éléments en bois sous-jacents. L'acier peut être utilisé pour des éléments linéaires sollicités en traction, combinés avec des éléments en bois que les sections plus massives rendent plus aptes à reprendre la compression. [1]

3.7.2 Les différents types de structure

Les ponts en arc profitent avantageusement de la légèreté du bois et de sa bonne capacité à reprendre la compression. Cette forme convient pour des portées de 30 à 60 mètres.

Dans les ponts mixtes bois-béton, la dalle de béton posée sur des poutres longitudinales en bois collabore à la reprise des efforts par la compression qu'elle reprend. Cette collaboration est assurée par des cornières, des tubes, des armatures scellées ou toutes sortes de connecteurs spécialement conçus. Ces connecteurs doivent être testés vis-à-vis de la fatigue, en fonction du trafic attendu. L'épaisseur de la dalle doit être au minimum de 22 cm pour les ouvrages routiers. Le rapport hauteur sur largeur de la section des poutres ne devrait pas dépasser 5, si non il faut étudier l'influence du gradient d'humidité entre les deux faces latérales. [1]

Les ponts à ferme ont une superstructure triangulée ayant la forme d'une charpente de toiture avec, par plan vertical, deux arbalétriers en bois et les poutres porteuses du tablier qui forment l'entrait de la ferme. Pour les barres intérieures de la ferme, les éléments comprimés sont en bois tandis que les éléments tendus peuvent être des barres en acier car, au contraire d'une toiture, il n'y a pas de soulèvement à craindre et, donc, pas de changement de signe des

efforts. En Finlande, le pont de Vihantasalmi comporte 3 travées de 42 m chacune avec ferme porteuse. [1]

Les ponts à poutre treillis permettent de franchir des portées importantes (de 20 à 50 m) grâce à la grande hauteur des poutres constituées. En général, la hauteur des poutres doit au moins valoir 1/10 de la portée. Les poutres doivent être stabilisées latéralement. On peut y arriver par la présence de bracons obliques extérieurs liant la membrure supérieure de la poutre aux poutres transversales du tablier, [1]

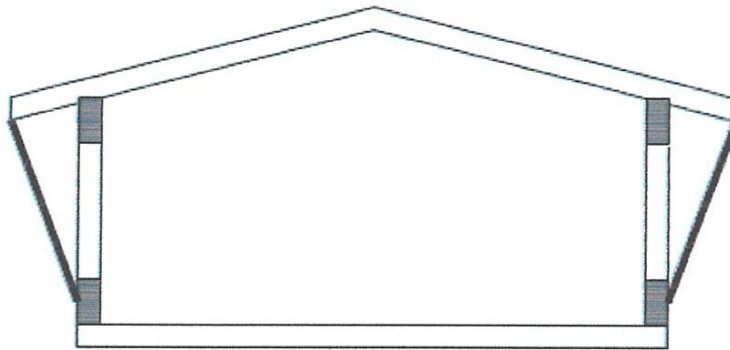


Figure 3-14: stabilisation par le haut

Les ponts à béquilles sont bien adaptés au bois car ils permettent une réduction des portées effectives et engendrent de la compression dans les palées. La gamme de portée de ces ouvrages est de 20 à 40 mètres. [1]

Les ponts suspendus ou à haubans permettent de franchir de grandes portées, de 30 à 100 mètres. Le bois peut être utilisé pour le platelage, voire pour la poutre de rigidité mais, dans ce cas, la raideur assez faible du bois conduit à une rigidité incompatible avec des charges importantes de sorte que cette solution ne convient que pour des passerelles piétonnes. En France, le pont piétonnier de Tournon construit en 1845 comporte ainsi deux travées de 97,50 mètres. Au Mexique, le pont de Ojuela construit en 1892 à une portée de 278 mètres.

Les ponts sous tendus combinent avantageusement le bois pour les parties travaillant en compression et des tirants de faible section en acier pour transmettre la traction. [1]

Chapitre 4

L'assemblage

4.1 INTRODUCTION

La réalisation de structures dépassant en complexité celle d'une poutre ou d'un poteau simple nécessite l'assemblage de plusieurs éléments entre eux. Il existe de très nombreuses techniques d'assemblage présentant chacune ses avantages, ses inconvénients, et son domaine d'utilisation privilégié. [1]

Le type d'assemblage à mettre en œuvre dépend

- du type d'effort à transmettre, traction, compression, effort tranchant ou moment de flexion,
- de la possibilité de garder les pièces dans le même plan ou de la nécessité de les placer dans des plans décalés.

Il arrive d'ailleurs que certains assemblages induisent des excentricités des efforts au sein des pièces.

Au moment de l'assemblage, le bois doit présenter une humidité minimale pour éviter l'apparition de fentes de retrait qui réduisent fortement la capacité portante. Le simple retrait transversal peut mettre en péril un assemblage prévu pour travailler par frottement entre pièces voisines.

D'autres considérations doivent également entrer en ligne de compte dans la conception des assemblages comme :

- la résistance au feu éventuelle,
- la limitation des contraintes transversales et la nécessité de ne pas créer de zone propice à l'accumulation d'eau si l'assemblage est soumis aux intempéries.

4.2 ASSEMBLAGES TRADITIONNELS

On rassemble dans ce groupe les moyens d'assemblages mis au point au cours des siècles par les charpentiers et faisant appel, essentiellement, à une mise à forme des extrémités des éléments à assembler. [1]

4.2.1 Assemblage par emboîtement

Ces assemblages assurent la transmission entre deux pièces dont l'une est inclinée par rapport à l'autre. Le transfert de l'effort de compression dans l'arbalétrier se fait par contact sur la surface frontale. La figure 4-1 montre différents types d'assemblages par emboîtement. [1]

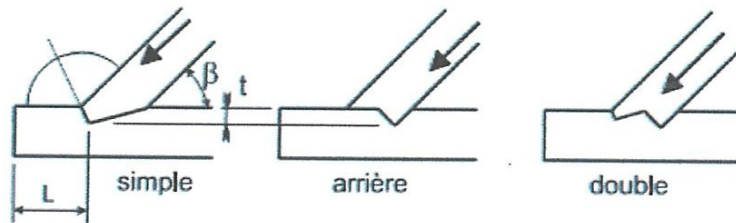


Figure 4-1: divers types d'emboîtement

4.2.2 Assemblages par contact

Pour utiliser au mieux les sections des pièces comprimées en bois, il peut se révéler avantageux d'utiliser des pièces intermédiaires faites en un matériau plus dur : métal, bois dur, la mi-bois, contre-plaqué, mortier, résine synthétique, etc. La Figure 4-2 montre quelques exemples d'applications possibles. [1]

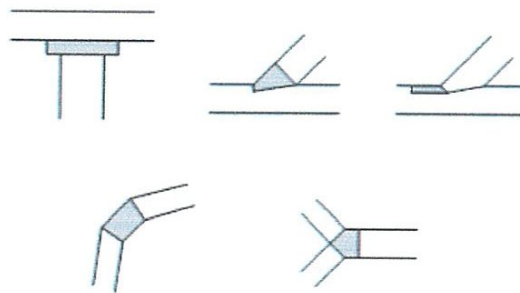


Figure 4-2: assemblages par contact

4.2.3 Assemblages par tenon et mortaise

Cet assemblage permet la transmission d'efforts transversaux. L'épaisseur du tenon est en générale égale au tiers de l'épaisseur de la pièce et sa profondeur varie entre 40 et 60 mm (selon l'outil de travail). Les mortaises doivent se trouver dans la partie comprimée de la poutre. [1]



Figure 4-3: tenon et mortaise

4.2.4 Assemblages à mi-bois et par enfourchement

Ces types d'assemblages sont décrits à la Figure 4-4. Ils ont été repris dans le paragraphe des assemblages traditionnels parce que, comme les autres types, ils font appel à une mise en forme des extrémités. Pour le calcul, on se reportera par exemple aux paragraphes suivants consacrés aux clous et pointes. [1]

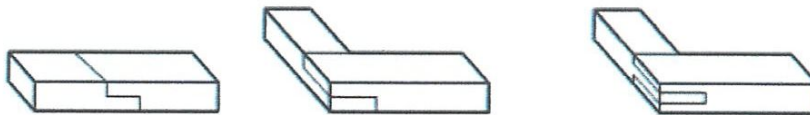


Figure 4-4: assemblages à mi-bois et par enfourchement

4.3 ASSEMBLAGES MECANIKES DE TYPE TIGE

Les différentes pièces à assembler sont traversées par une ou plusieurs tiges, le plus souvent métallique. Le transfert des efforts fait ici appel à la portance locale et à la résistance au cisaillement du bois, ainsi qu'à la résistance en flexion des tiges. [1]

4.3.1 Conception générale

Il importe tout d'abord de respecter certaines distances entre tiges, ainsi qu'entre les tiges et les bords ou les extrémités des pièces, pour éviter un fendage excessif. On retiendra que ces distances sont proportionnelles au diamètre des pointes et qu'elles peuvent être réduites en cas de pré-perçage. La Figure 4-5 donne une idée des ordres de grandeur pour un bois de densité inférieure à 420 kg/m^3 et sans pré-perçage. Les valeurs se raient différentes si l'about était non chargé, si les rives étaient chargées, ou si le fil du bois n'était pas parallèle à l'axe de la planche. [1]

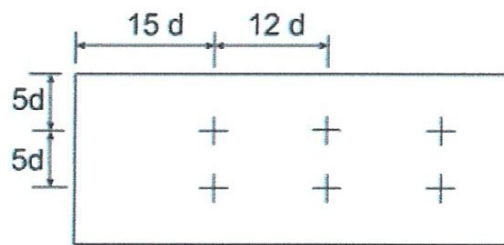


Figure 4-5: distances minimales pour assemblage bois-bois

4.3.2 Pointes

Les pointes, ou clous, constituent l'assemblage mécanique le plus traditionnel. Le plus souvent, on utilise des pointes lisses cylindriques. On peut aussi mettre en œuvre des clous torsadés ou crantés pour améliorer la résistance à l'arrachement. [1]

Les pointes sont utilisées presque toujours en cisaillement simple pour assembler des pièces latérales en bois ou en acier, ou encore des panneaux à base de bois.

4.3.3 Assemblages vissés

La vis est un organe d'assemblage de type tige comportant : [1]

- une partie filetée du côté de sa pointe,
- une partie lisse cylindrique dont la longueur doit être au moins égale à l'épaisseur de la Pièce située sous la tête,
- et une tête de serrage, ronde dans les vis à tête fraisée ou à tête ronde (diamètre compris entre 4 et 8 mm), hexagonale dans les tire-fond (diamètre de 8 à 20 mm).

4.3.4 Assemblages par boulons et broches

Les boulons et les broches travaillent souvent en cisaillement double ou multiple Pour garantir les performances de l'assemblage.

Tous les organes de serrages doivent être posés avec une rondelle sous les têtes ou écrous en contact avec le bois. La résistance d'un assemblage boulonné ou broché dépend tout autant des caractéristiques du bois que de celles de l'acier. [1]



Figure 4-6: assemblage par boulon

4.3.5 Assemblages par goujons collés

Les goujons collés sont des tiges cylindriques métalliques collées au bois à l'intérieur de trous forés pratiqués au sein du matériau. On les utilise principalement dans les structures en BLC pour empêcher la fissuration dans la zone de faite des poutres cintrées ou aux appuis de poutres en taillées, en pied de poteau, au rein d'une ferme. Il s'agit d'un assemblage très rigide lorsqu'il est sollicité axialement et qui peut transmettre un effort local important. De plus, comme il est complètement inséré dans les éléments en bois, sa tenue au feu ne pose pas de problème. Il convient cependant d'utiliser ce type d'assemblage avec précaution en classe de service 3 car les variations dimensionnelles liées aux variations d'humidité peuvent générer des contraintes de cisaillement importantes dans la colle. Bien entendu, la résistance et la durabilité de la colle utilisée sont essentielles pour le bon fonctionnement de ce type d'assemblage. [1]

4.4 AUTRES ASSEMBLAGES MECANIQUES

4.4.1 Assemblages par connecteurs métalliques à dents

Les connecteurs métalliques à dents sont fabriqués à partir d'une tôle galvanisée emboutie perpendiculairement de manière à ce que les parties défoncées forment des dents. On les utilise pour assembler deux ou plusieurs pièces de bois dans un plan latéral commun à ces pièces. Leur domaine d'application privilégié est celui des fermes planes. A moins de le protéger, la résistance au feu de ce type d'assemblage n'est pas satisfaisante. Ce n'est pas nécessairement un grand désavantage car il est normalement mis en œuvre pour joindre des éléments d'épaisseur modérée dont la résistance au feu intrinsèque n'est pas très élevée non plus. [1]

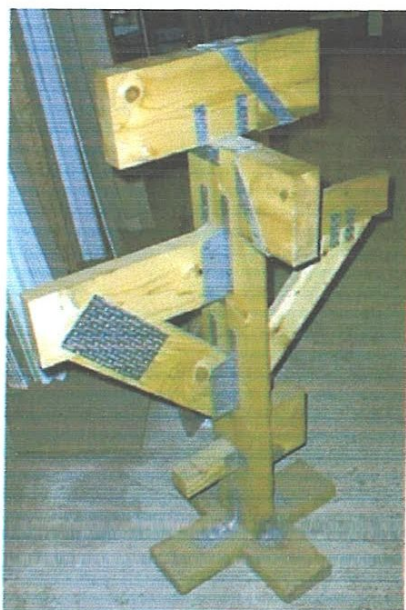


Figure 4-7 : connecteurs à dent

4.4.2 Boîtiers de poutres et systèmes d'ancrages

Les systèmes d'assemblage préfabriqués en tôle d'acier inoxydable ou galvanisé pliée à froid ont aujourd'hui pris la place des assemblages traditionnels car ils sont beaucoup plus faciles à mettre en œuvre et ne nécessitent pas d'usinage compliqué des pièces à assembler. Il en existe de très nombreuses sortes différentes : cornières d'angle, boîtiers de poutre, joints de continuité, etc. voir Figure 4-8. [1]



Figure 4-8 : excentricité locale dans un boîtier

4.4.3 Assemblages par anneaux

Des anneaux métalliques circulaires sont utilisés, associés à des boulons, pour des assemblages sollicités en cisaillement, voir Figure 4-9.

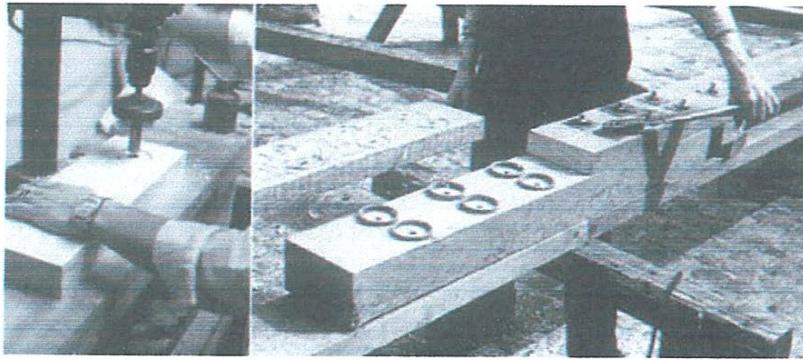


Figure 4-9: assemblage par anneaux

4.4.4 Assemblages par crampons

Les crampons sont assez semblables aux anneaux métalliques mais, au contraire de ceux-ci, ils ne sont pas mis en place dans des rainures usinées mais bien enfoncés par pression dans le bois. [1]

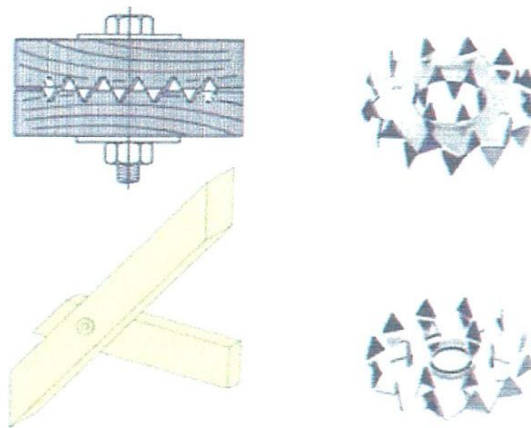


Figure 4-10: assemblage par crampons

Partie 2

Modélisation et calcul de l'ouvrage

Chapitre 1

Eurocode 5

L'Eurocode 5 traite uniquement des exigences relatives à la résistance mécanique, l'aptitude au service, la durabilité et la résistance au feu des structures en bois. D'autres exigences, par exemple concernant l'isolation thermique ou acoustique, ne sont pas considérés. [4]

L'Eurocode 5 est destiné à être utilisé conjointement avec :

- EN 1995-1 Règles générales
- EN 1995-2 Ponts
- EN 1995-1 Règles générales comprend :
- EN 1995-1-1 Règles générales- Règles générales et Règles pour les bâtiments
- EN 1995-1-2 Règles générales- calcul des structures au feu

La partie EN 1995-2 se réfère aux règles générales de la partie 1,

Les articles de la partie EN 1995-2 sont complémentaires aux articles d'EN 1995-1.

1.2.2 Domaine d'application d'EN 1995-1-1

La partie 1.1 de l'Euro code 5 donne des règles générales de calcul pour les structures en bois ainsi que des règles de calcul spécifiques aux bâtiments.

(2) Les sujets suivants sont traités, dans la partie 1.1 :

- Section 1 : Généralités.
- Section 2 : Hases de calcul.
- Section 3 : Propriétés des matériaux.
- Section 4 : Durabilité.
- Section 5 : Bases de l'analyse de structure.
- Section 6 : Etats limites ultimes.
- Section 7 : Etats limites de service.
- Section 8 : Assemblages par organes métalliques.
- Section 9 : Composants et sous-systèmes.
- Section 10 : Détails structuraux et contrôle.

(3) La partie 1.1 ne traite pas des structures exposées durablement à des températures supérieures à 60°C. [4]

1.1 INTRODUCTION

Le principal objectif des Eurocodes est de favoriser les échanges entre les pays européens et d'harmoniser les méthodes de calculs des structures. Cette approche donne au bois un niveau de caractérisation et donc de fiabilité comparable au niveau européen, les textes sont techniquement stabilisés et plusieurs pays les appliquent déjà. La grande majorité des textes constituant les Eurocodes et leurs annexes nationales sont disponibles. En 2008, l'Eurocode 5 se substitua aux Règles CB71. [4]

En 1993, l'Eurocode 5 a été publié en tant que norme expérimentale, pour une durée initiale de 3 ans. Ce code de calcul, qui s'insère dans l'ensemble des Eurocodes structuraux, est constitué de trois parties : [4]

- Partie 1-1- Règles générales – Règles applicables au bâtiment (charpentes et structures).
- Partie 1-2- Règles générales- calcul de la résistance au feu.
- Partie 1-3- Ponts en bois.

Les principes de vérification des structures selon ce code, sont aux états limites, correspondants à des états au-delà desquels la structure ne satisfait plus aux exigences de performance pour lesquelles elle a été conçue. Ils sont de deux types : Etats limites ultimes (ELU) et Etats limites de services (ELS). [4]

La résistance de calcul des éléments, qui doit être supérieure à la valeur de calcul des effets des actions, est déterminée à partir des valeurs de calculs des propriétés de matériaux et notamment à celles caractéristiques qui correspondent à un fractile dans la distribution statistique supposée pour les propriétés concernées. [4]

1.2 DOMAINES D'APPLICATION

1.2.1 Domaine d'application d'Eurocode 5

L'Eurocode 5 s'applique au calcul des bâtiments et ouvrages de génie civil en bois (bois massif, scié, raboté ou sous forme de poteaux, bois lamellé-collé ou produits structuraux à base de bois par exemple LVL) ou panneaux à base de bois assemblés avec des adhésifs ou des organes mécanique. Il est conforme aux principes et exigences relatifs à la sécurité et l'aptitude au service des structures, ainsi qu'aux bases de leur calcul et vérification qui sont données dans EN 1990 :2002. [4]

1.3 PRINCIPES DE CALCUL AUX ETATS LIMITES

1.3.1 Généralités

Les modèles de calcul pour les différents états limites doivent, de façon appropriée être les suivants :

- Différentes propriétés des matériaux (par exemple module d'élasticité, résistance et poids de rupture).
- Différents comportements dépendant des matériaux (fluage).
- Différentes conditions climatiques des matériaux (température, variation d'humidité).
- Différentes situations de calcul (étapes de la construction, changement des conditions d'appui).

1.3.2 Etats limites ultimes

Lorsqu'une analyse de structure est menée, les propriétés de rigidité doivent être :

- les valeurs moyennes pour une analyse des contraintes élastique linéaire du premier ordre si les éléments ont les mêmes propriétés dépendant du temps (fluage).
- les valeurs moyennes finales ajustées à la durée de chargement de la composante de charge qui génère la plus grande contrainte eu égard à la résistance, ou la distribution des efforts internes et des moments dans les éléments est affectée par le degré de déformation de la structure (par exemple, analyse du premier ordre pour les éléments composés dans des systèmes redondants).
- les valeurs de calcul sans effet de durée de chargement pour analyse élastique linéaire du second ordre. [4]

1.3.3 Etats limites de service

La déformation de la structure qui résulte des actions (telles que les efforts normaux et tranchants, les moments de flexion et le glissement des assemblages) et de l'humidité doit rester au sein de limites appropriées, considérant d'une part la possibilité d'endommagement des matériaux de revêtement, des plafonds, des planchers, des partitions intérieures et des finitions, et d'autre part le besoin fonctionnel ainsi que les exigences d'apparence. Il convient de calculer la déformation instantanée, U_{inst} , sous une action en utilisant la valeur moyenne instantanée appropriée de la rigidité et des modules de glissement. [4]

1.3.4 Combinaisons d'actions appliquées aux structures

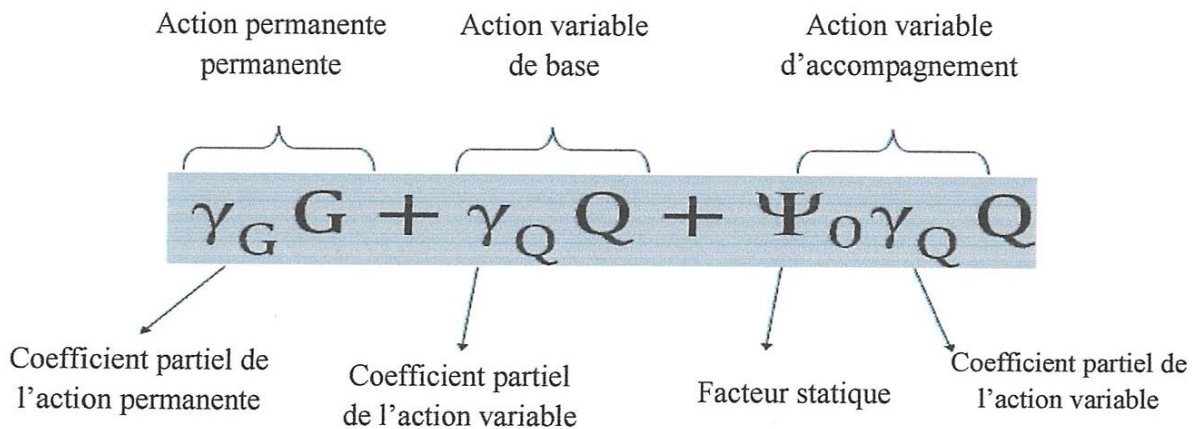
Il faut vérifier la fiabilité structurale pour un état limite sous l'effet simultané de différentes actions. Une combinaison correspond à un chargement calculé en effectuant la somme des actions retenues pondérées par les différents coefficients. [4]

On distinguera des combinaisons pour les ELU pour :

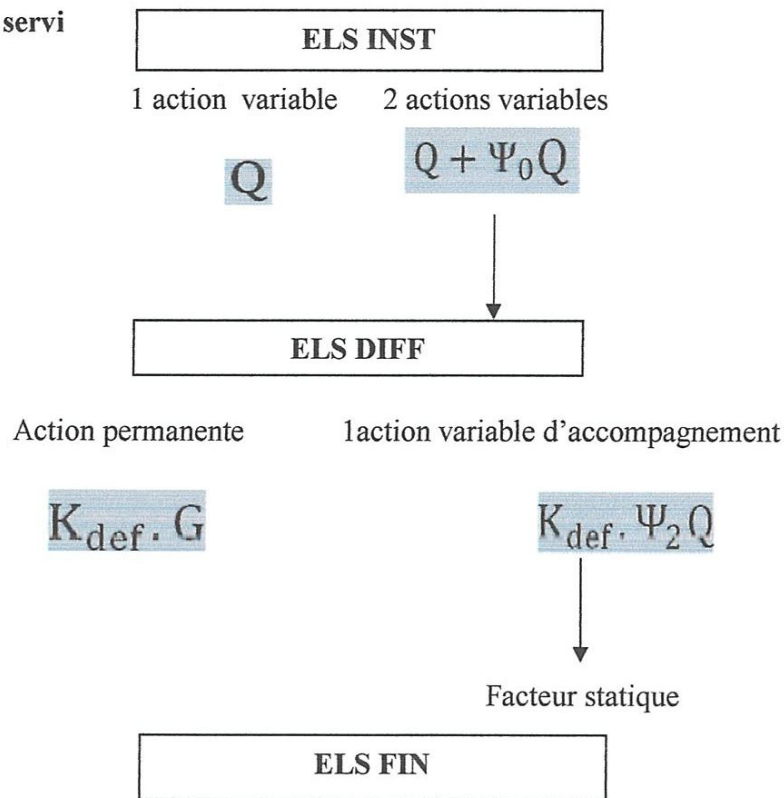
- la résistance de structure (STR) ;
- la vérification de l'équilibre (soulèvement) (EQU) ;
- la vérification des situations accidentelles en STR et en EQU ;
- D'une manière usuelle, on peut caractériser les combinaisons de la manière qui suit.

✚ Etat limite ultime

Pour les combinaisons STR et EQU (sauf ELU STR et EQU en situation accidentelle) ;



✚ Etat limite servi



$$G(1 + K_{def}) + Q(1 + K_{def} \cdot \Psi_2)$$

1.4 PROPRIETES DES MATERIAUX

1.4.1 Paramètres de résistance et de rigidité

Les paramètres de résistance et de rigidité doivent être déterminés sur la base d'essais pour les types d'effet d'action auxquels le matériau est soumis dans la structure, au sur la base de comparaison avec des essences et classes de bois similaires au de matériaux à base de bois, ou de relations bien connues entre les différentes propriétés. [4]

1.4.2 Relations contrainte – déformation

Dans la mesure où les valeurs caractéristiques sont déterminées selon l'hypothèse d'une relation linéaire entre contrainte et déformation jusqu'à la rupture, la vérification en résistance des éléments individuels doit être également basée sur une telle relation. Pour les éléments ou une partie des éléments soumis à une compression, il est possible d'utiliser une relation non linéaire (élasto- plastique). [4]

Chapitre 2

Présentation de robot

2.1 GENERALITES :

"ROBOT Millenium : Logiciel de calcul et d'optimisation des structures"

Le logiciel Auto desk Robot est un progiciel CAO/DAO destiné à modéliser, analyser et dimensionner les différents types de structures. Robot permet de créer les structures, les calculer, vérifier les résultats obtenus, dimensionner les éléments spécifiques de la structure ; la dernière étape gérée par Robot est la création de la documentation pour la structure calculée et dimensionnée. [5]

Il utilise la méthode d'analyse par éléments finis pour étudier les structures planes et spatiales de type :

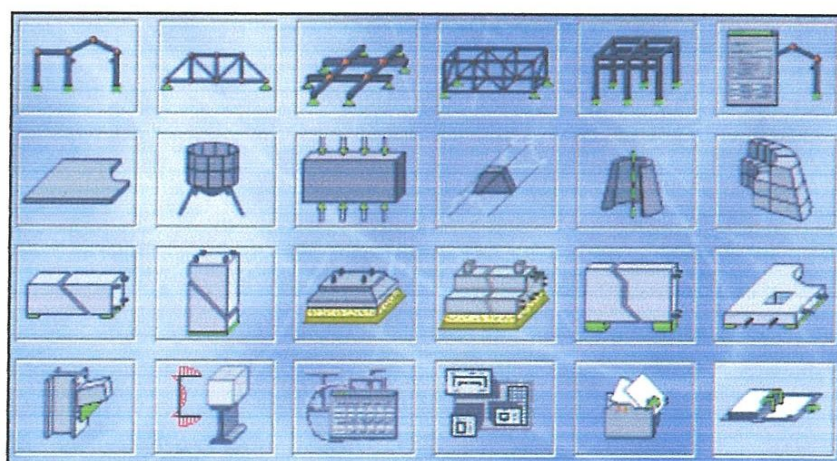


Figure 2-1 : type de structures étudiées dans robot

- Treillis.
- Portiques.
- Structures mixtes.
- Grillages de poutres.
- Plaques.
- Coques.
- Contraintes planes.
- Déformations planes.
- Eléments axisymétriques.
- Eléments Volumiques.

2.2 LES CARACTERISTIQUES PRINCIPALES DU LOGICIEL ROBOT:

- définition de la structure réalisée en mode entièrement graphique dans l'éditeur conçu à cet effet (vous pouvez aussi ouvrir un fichier au format DXF et importer la géométrie d'une structure définie dans un autre logiciel CAO/DAO).
- possibilité de présentation graphique de la structure étudiée et de représenter à l'écran les différents types de résultats de calcul (efforts, déplacements, travail simultané en plusieurs fenêtres ouvertes etc.).
- possibilité de calculer (dimensionner) une structure et d'en étudier simultanément une autre (architecture multithread).
- possibilité d'effectuer l'analyse statique et dynamique de la structure,
- possibilité d'affecter le type de barres lors de la définition du modèle de la structure et non pas seulement dans les modules métier.
- possibilité de composer librement les impressions (notes de calcul, captures d'écran, composition de l'impression, copie des objets vers les autres logiciels).

Le système Robot regroupe plusieurs parties (modules) spécialisées dans chacun des étapes de l'étude de la structure (création du modèle de structure, calculs de la structure, dimensionnement). Les modules fonctionnent dans le même environnement. [5]

2.3 PRESENTATION DES DONNEES ET RESULTATS

Les données et les résultats peuvent être présentés en mode graphique et en mode texte : [5]

- vues sur le modèle de la structure avec les numéros des nœuds et des barres, symboles des appuis, diagrammes des charges avec les valeurs, descriptions des sections utilisées dans la structure, dessins de la structure respectant la forme et les dimensions des sections, diagrammes des efforts internes, déformées de la structure, cartographies des contraintes, déplacements et déformation pour les éléments surfaciques.
- tableaux des descriptions du modèle.
- tableaux des résultats.

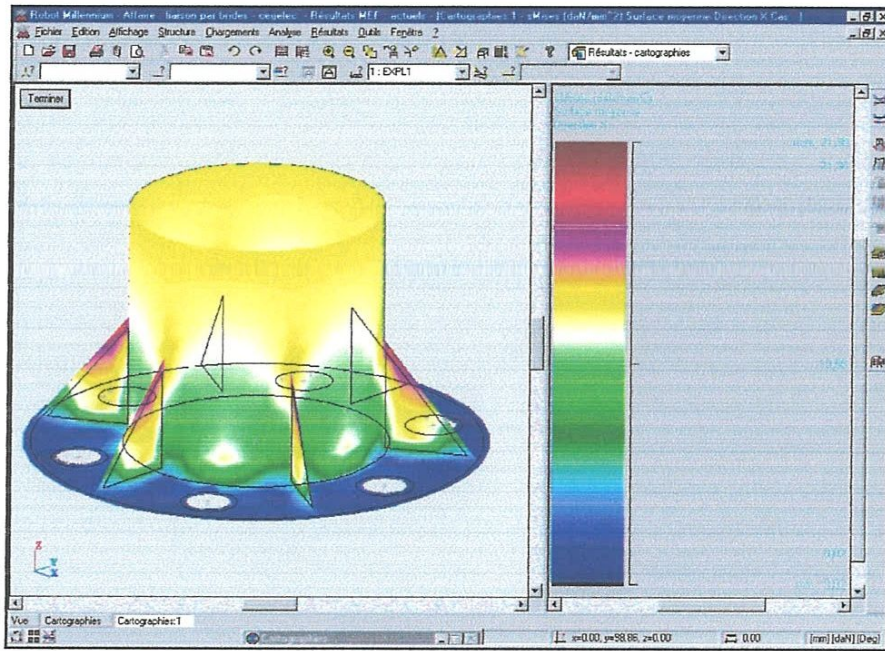


Figure 2-2: Cartographie des contraintes sur la modélisation d'un assemblage

Chapitre 3

Présentation de l'ouvrage

3.1 PRESENTATION DE L'OUVRAGE

La structure qu'on va étudier est un hangar composé de façade ossature bois et d'une charpente en bois lamellé-collé représentée ci-dessous.

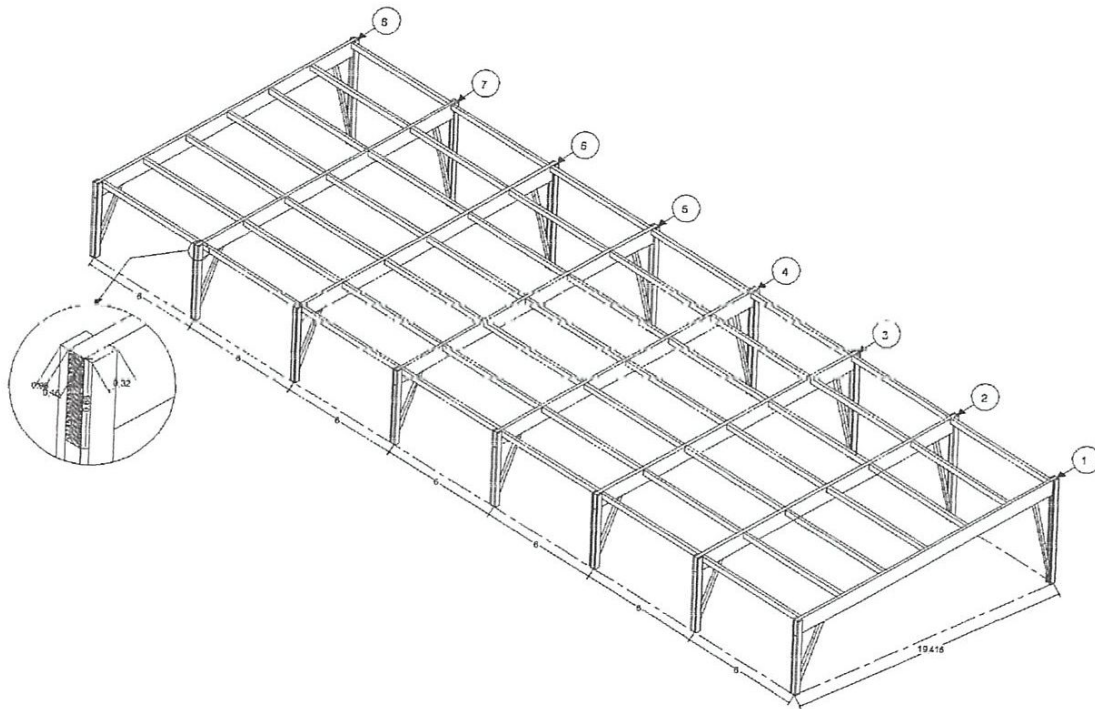


Figure 3-1: vue 3D de structure

Situation et Implantation de hangar :

Longueur : 42 m

Largeur : 19.415 m

Hauteur du poteau : 6.1m

Entraxe 6m

La zone de la neige Guelma zone A.

La zone du vent Guelma zone I.

Nature du site : plat

Terrain de catégorie III.

La composition de la toiture est la suivante :

- Bac acier posés sur lambourdes 40×80 mm en bois massif.
- Contre lattes montantes 27×40 mm en bois massif.
- Sous couverture phonique épaisseur 18 mm.
- Sapisol 150×250 mm

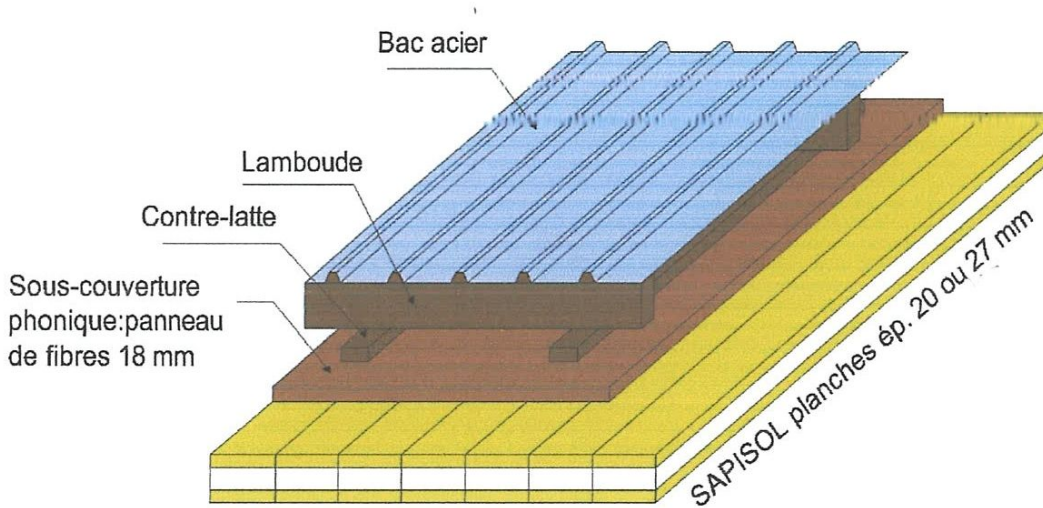


Figure 3-2: multicouches de toiture

3.2 CHARGEMENT SUR PORTIQUE :

3.2.1 Les charges permanentes sur toiture :

- ✓ Bac d'acier : poids volumique = $0,07 \text{ KN/m}^2$.
- ✓ Lambourdes : 40×80 mm, entraxe 1,5m poids volumique = $4,1 \text{ KN/m}^3$.
- ✓ sous couverture poids propre négligeable.
- ✓ Contre lattage : 27×40 mm, entraxe 0,6m poids volumique = $4,1 \text{ KN/m}^3$.
- ✓ Sapisol : 150×250 mm.
- ✓ les pannes : 80×320 mm, entraxe 2,8m poids volumique = $3,8 \text{ KN/m}^3$.

3.2.2 Calcul des charges permanentes

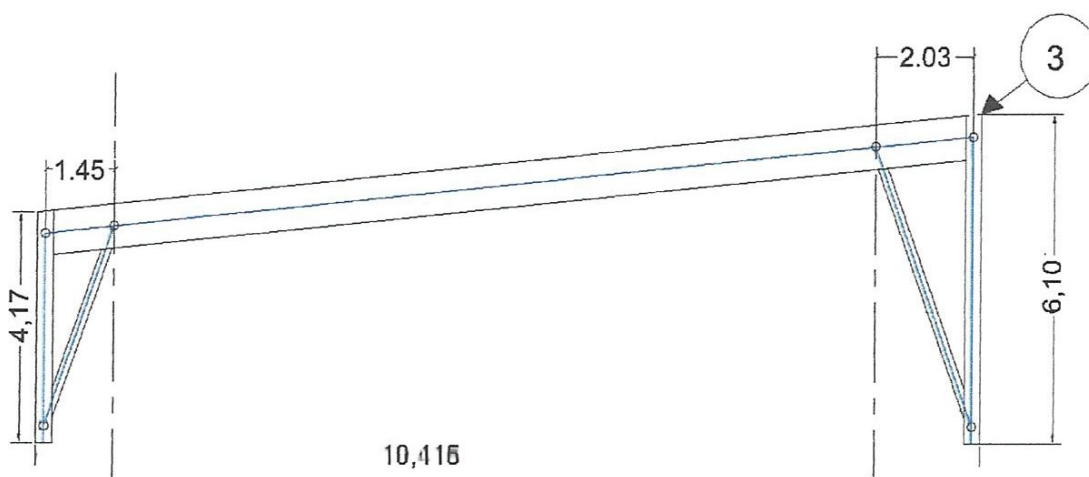


Figure 3-3 : portique étudié

Bac d'acier : $0,07 \times 6 = 0,42 \text{ KN/m}$

Lambourdes : $4,1 \times (0,04 \times 0,08 \times 6) \times 1/1,5 = 0,052 \text{ KN/m}$

Contre lattage : $4,1 \times (0,027 \times 0,04 \times 10) = 0,044 \text{ KN/m}$

Sapisol : $6 \times 0,186 = 1,116 \text{ KN/m}$

Le poids propre de toiture **pp** = $0,42 + 0,052 + 0,044 + 1,116 = 1,632 \text{ KN/m}$

Les pannes : $3,8 \times (0,08 \times 0,32 \times 6) \times 1/2,8 = 0,208 \text{ KN/m}$

Chapitre 4

Calcul des surcharges

4.1 CALCUL DE SURCHARGE CARACTERISTIQUE DE NEIGE

Pour le calcul des surcharges climatiques on utilise le règlement neige et vent Algérien:

C2-4.7R.N.V.1999.

La charge caractéristique de neige S par unité de surface en projection horizontale de toitures ou de toute autre surface soumise à l'accumulation de la neige s'obtient par la formule suivante : [6]

$$S = \mu \times S_k$$

S_k : la charge de neige sur le sol en fonction de l'altitude et de la zone de neige (cf. carte de neige annexé).

μ : coefficient d'ajustement des charges, fonction de la forme de la toiture, appelé coefficient de forme.

La valeur de S_k en KN/m^2 est déterminée par la loi de variation suivante en fonction de l'altitude H :

Guelma est en zone A d'après (RNV99)

$$\text{Zone A} \quad S_k = \frac{0.07 \times H + 15}{100}$$

Avec l'altitude à donner $H = 300 \text{ m}$

$$S_k = \frac{0,7 \times 300 + 15}{100} = 0.36 \text{ KN/m}^2$$

Notre toiture simple à un versant sans obstacle de retenue et $\alpha = 5^\circ$

$\mu = 0.8$ (voire tableau 6.2 de RNV 99).

On calcule S

$$S = 0.8 \times 0.36 = 0.288 \text{ KN/m}^2$$

4.2 CALCUL DE LA CHARGE CARACTERISTIQUE DE VENT

➤ Détermination de la pression statique due au vent

La pression due au vent q_j qui s'exerce sur un élément de surface j est donnée par :

$$q_j = C_d \times q_h \times [C_e - C_i]$$

C_d : Coefficient dynamique de la construction.

q_h : Pression dynamique du vent calculée à la hauteur h considérée.

C_e : Coefficient de pression extérieure.

C_i : Coefficient de pression intérieure.

➤ Détermination coefficient dynamique C_d

$$C_d = \frac{1 + 2 \times I_v(h_{eq}) \times \sqrt{Q_0^2 + R_x^2}}{1 + 2 \times g \times I_v(h_{eq})}$$

h_{eq} : (en m) est la hauteur équivalente de la construction (cf. § 1).

$I_v(h_{eq})$: est l'intensité de la turbulence (cf. § 2) pour $h = h_{eq}$.

Q_0^2 : est la partie quasi-statique (cf. § 3).

R_x^2 : est la partie résonnante (cf. § 4).

g : est le facteur de pointe (cf. § 5).

➤ hauteur équivalent

$$h_{eq} = \text{Max}[0,6 \times h; h_{min}] = \text{Max}[0,6 \times 6,1; 8]$$

$$h_{eq} = 8\text{m}$$

➤ intensité de la turbulence

$$I_v(h_{eq}) = \frac{1}{C_{t(h)} \times \ln \frac{h}{h_0}} \quad \text{pour } h = h_{eq} = 8\text{m}$$

C_t : est coefficient de topographie (cf. chapitre2, §4.3)

h_0 : est le paramètre de rugosité (cf. chapitre2, tableau2.4)

$$I_v = 1 / C_t \times \ln (h/h_0) = 1 / 1 \times \ln (8/0.3) = 0.3045$$

➤ **partie quasi-statique**

$$Q_0^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \left(\frac{b+h}{L_i(h_{eq})} \right)^{0.63}}$$

$L_i(h)$: est l'échelle intégrale de turbulence.

$$L_i(h) = 300 \times (h/300) \quad \text{pour } h_{\min} \leq h \leq 200 \text{ m}$$

Avec $\varepsilon = 0,37$ (cf. chapitre3).

$$L_i = 300 \times (8/300)^{0.37} = 78.47$$

$$Q_0^2 = \frac{1}{1 + 0.9 \left(\frac{6.1+42}{78.47} \right)^{0.63}} = 0.6$$

➤ **partie résonnante**

$$R_x^2 = \frac{\pi^2}{2 \times \delta} \times R_N \times R_h \times R_b$$

δ : est le décrément logarithmique d'amortissement des vibrations dans la direction du vent (cf. § 4.2).

R_N : est la fonction adimensionnelle de la densité spectrale de puissance (cf. § 4.2)

$$R_N = \frac{6.8 \times N_x}{(1 + (10.2 \times N_x))^{5/3}}$$

N_x : est la fréquence adimensionnelle dans la direction X du vent (cf. § 4.2,1)

$$N_x = \frac{n_{1,x} \times L_i(h_{eq})}{V_m(h_{eq})}$$

n_1 : est la fréquence fondamentale de vibration en flexion dans la direction X du vent (cf. §4, 2,2 et §4, 2,3).

$$n_1 = \frac{\sqrt{d}}{0,1 \times h} \quad \begin{cases} h = 6,1 \text{ m} \\ d = 19,415 \text{ m} \\ b = 42 \text{ m} \end{cases}$$

$$n_1 = \frac{\sqrt{19,415}}{0,1 \times 6,1} = 7,223$$

V_m : est la vitesse moyenne du vent (cf. annexe 2)

$$V_m = C_r \times C_t \times V_{\text{ref}} \quad \begin{cases} C_t = 1 \\ C_r = 0.7223 \\ V_{\text{ref}} = 25 \text{ m/s} \end{cases}$$

C_r : coefficient de rugosité.

C_t : coefficient de topographie.

$$V_m = 0.7223 \times 1 \times 25 = 18.058 \text{ m/s}$$

$$N_x = \frac{7.223 \times 78.47}{18.058} = 31,387 \text{ s}$$

$$R_N = 0.014$$

✓ **Le décrétement logarithmique d'amortissement δ**

$$\delta = \delta_s + \delta_a$$

δ_s : est le décrétement logarithmique d'amortissement structural (cf. §4.3.1).

δ_a : est le décrétement logarithmique d'amortissement aérodynamique (cf. §4.3.2).

$$\delta_s = (a_1 \times n_{I,x}) + b_1 \text{ avec } \delta_s > \delta_{\text{min}}$$

$$\text{Type de construction en bois} \quad \begin{cases} a_1 = 0,045 \\ b_1 = 0,000 \\ \delta_{\text{min}} = 0,05 \end{cases}$$

$$\delta_s = (0.045 \times 7.223) + 0 = 0.325 > \delta_{\text{min}} = 0.05 \text{ vérifiée.}$$

Et aussi $\delta_a = 0$.

$$\text{Donc : } \delta = 0.325 + 0 = 0.325$$

✓ Les fonctions d'admittance aérodynamique R_h et R_b

$$R_h \text{ ou } R_b = \left(\frac{1}{n}\right) - \left(\frac{1}{2 \times n^2}\right) \times (1 - e^{-2n}) \text{ pour } n > 0$$

$$R_h \text{ ou } R_b = 1 \text{ pour } n > 0$$

$$n = \frac{4,6 \times N_x \times d}{L_i(h_{eq})} \quad \text{Avec } \begin{cases} d = h = 6,1 \text{ m pour le calcul de } R_h \\ d = b = 19,415 \text{ m pour le calcul de } R_b \end{cases}$$

$$n_h = 4,6 \times 31,387 \times 6,1 / 78,47 = 11,223$$

$$R_h = 0,0852$$

$$n_b = 4,6 \times 31,387 \times 19,415 / 78,47 = 35,722$$

$$R_b = 0,0276$$

$$\text{Alors :} \quad R_x^2 = \pi^2 \times R_n \times R_h \times R_b = 0,0005 = 5 \times 10^{-4}$$

➤ Le facteur de pointe

$$g = \sqrt{2 \times \ln(v \times t)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \times \ln(v \times t)}}$$

Avec

$t = 600$ s (selon DTR) la durée sur laquelle est établie la vitesse de référence

v : est la fréquence moyenne elle donnée par la formule suivante :

$$v = \sqrt{\frac{v_0^2 \times Q_0^2 + n_{1,x}^2 \times R_x^2}{Q_0^2 + R_x^2}} \text{ HZ}$$

v_0 : est la fréquence moyenne de l'effet des rafales de vent sur les structures rigides.

$$v_0 = \frac{V_m(h_{eq})}{L_i(h_{eq})} \times \frac{1}{1,11 \times S^{0,615}}$$

Avec

$$S = 0,46 \times \left(\frac{(b+h)}{L_i(h_{eq})}\right) + 10,58 \times \left(\frac{\sqrt{(b+h)}}{L_i(h_{eq})}\right)$$

$$S = 0.7716 \quad \text{Alors} \quad v_0 = 0.243 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad v = 0.039 \text{ Hz}$$

$$\text{Donc : } g = 2.75$$

On peut donc calculer le coefficient C_d

$$C_d = \frac{1 + 2 \times 0,3045 \times \sqrt{0,6 + 5 \times 10^{-4}}}{1 + 2 \times 2,75 \times 0,3045}$$

$$C_d = 0.38$$

➤ La pression dynamique

$$q_h = q_{\text{ref}} \times C_{\text{ex}} \quad \text{daN/m}^2$$

q_{ref} : est la pression dynamique de référence selon le tableau 2.3.

$$q_{\text{ref}} = 37.5 \quad \text{daN/m}^2$$

C_{ex} : est le coefficient d'exposition au vent

Cas de structures peu sensibles aux excitations dynamiques :

$$C_{\text{ex}} = C_t^2 \times C_r^2 \times \left[1 + \frac{7 \times k_t}{C_r \times C_t} \right]$$

C_r : coefficient de rugosité.

C_t : coefficient de topographie.

K_T : facteur du terrain.

$$K_T = 0.22, \quad C_t = 1 \quad \text{et} \quad h_0 = 0.3 \text{ m} \quad \text{et} \quad h_{\text{min}} = 8 \text{ m.}$$

$$C_r = K_T \times \ln\left(\frac{h_{\text{min}}}{h_0}\right) \quad \text{pour } h < h_{\text{min}}$$

$$C_r = 0.22 \times \ln(8/0.3) = 0.722$$

$$C_{\text{ex}} = 0.722^2 \times 1^2 \times (1 + (7 \times 0.22 / 0.722 \times 1)) = 1.633$$

$$q_h = 37.5 \times 1.633 = 61.24 \text{ daN/m}^2$$

➤ Détermination de coefficient de pression extérieure C_e

a) Parois verticales

Pour notre cas :

$$b=42\text{m}, \quad d=19.415\text{m}, \quad h=6.1\text{m} \quad e = \min(b ; 2 \times h)$$

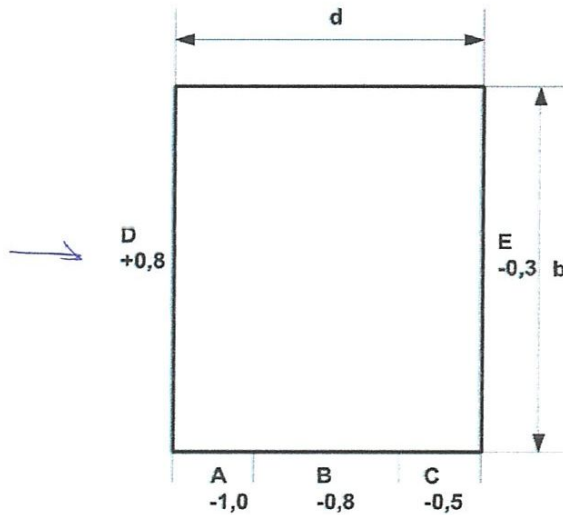


Figure 4-1 : Coefficient de pression extérieure sur les parois verticales

b) Toitures à un versant

Pour notre cas :

$$b=42\text{m}, \quad d=19.415\text{m}, \quad h=6.1\text{m} \quad e = \min(b ; 2 \times h)$$

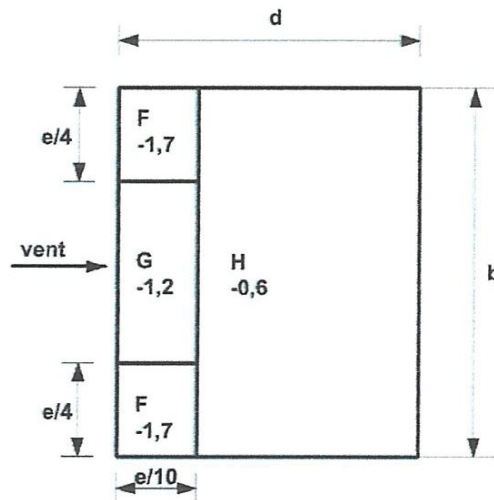


Figure 4-1 : Coefficient de pression extérieure sur la toiture

Détermination de Coefficient de pression intérieur C_i

$$\mu_p = \frac{\sum \text{des surfaces des ouvertures sous le vent et parallèles au vent}}{\sum \text{des surfaces de toutes les ouvertures}}$$

$$\mu_p = 37/124.5 = 0.29 \rightarrow C_i = 0.5$$

Calcul des pressions

a) parois verticales

Tableau 4-1: la valeur finale de la pression de vent sur les parois verticales

Zone	C_d	q_h	C_e	C_i	q_j
A	0.38	612.4	-1	0.5	-349.06
B	0.38	612.4	-0.8	0.5	-302.52
C	0.38	612.4	-0.5	0.5	-232.71
D	0.38	612.4	0.8	0.5	69.81
E	0.38	612.4	-0.3	0.5	-186.17

b) toiture

Tableau 4-2: la valeur finale de la pression de vent sur la toiture

Zone	C_d	q_h	C_e	C_i	q_j
F	0.38	612.4	-1.7	0.5	-511.96
G	0.38	612.4	-1.2	0.5	-395.61
H	0.38	612.4	-0.6	0.5	-255.98

5.1 MODELISATION DE LA STRUCTURE

Dimension des éléments de portique : arbalétrier (160×880mm), poteau moisee (8×160×320mm), jambe de force (160×200mm).

Les charges qui sont présentés dans la Figure ce dessous :

$pZ = -1.84$ MPa Le poids propre de toiture et Le pannes, $pZ = -1.73$ MPa surcharge de neige
 $pZ = 1.54$ MPa, $pZ = 3.07$ MPa, $pZ = 1.11$ MPa, $pZ = 0.42$ MPa surcharge de vent.

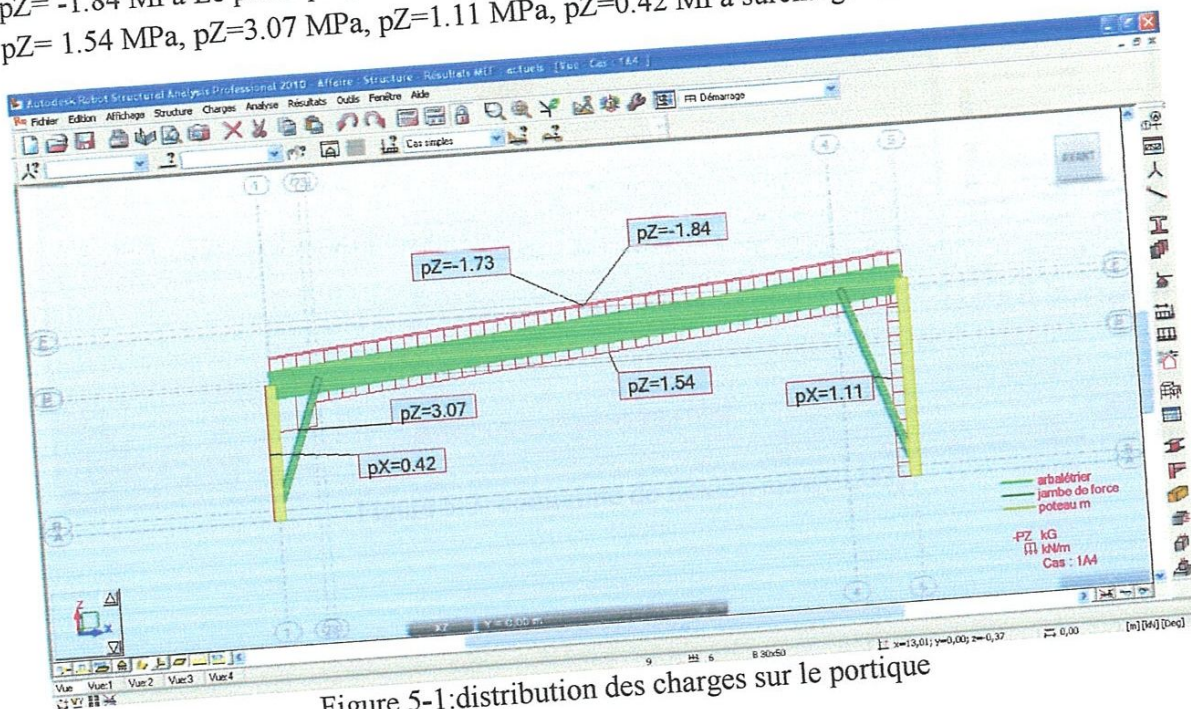


Figure 5-1: distribution des charges sur le portique

5.2 RESULTATS DES CALCULS

5.2.1 Les resultats des calculs des contraintes donne par le logeciele

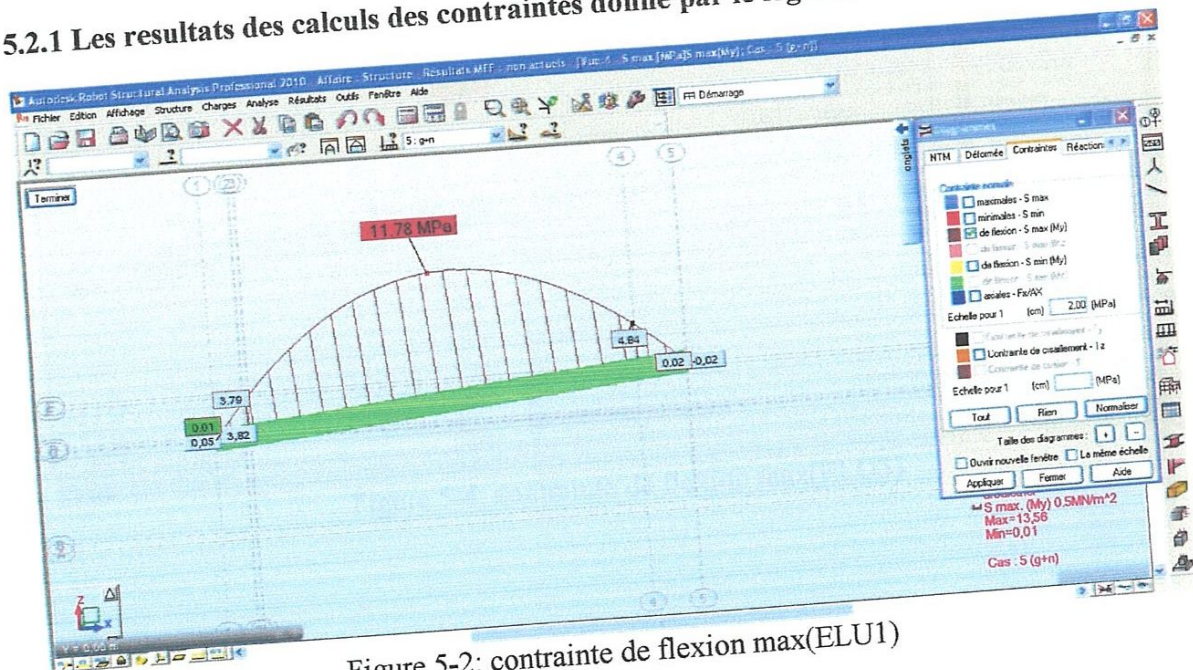


Figure 5-2: contrainte de flexion max(ELU1)

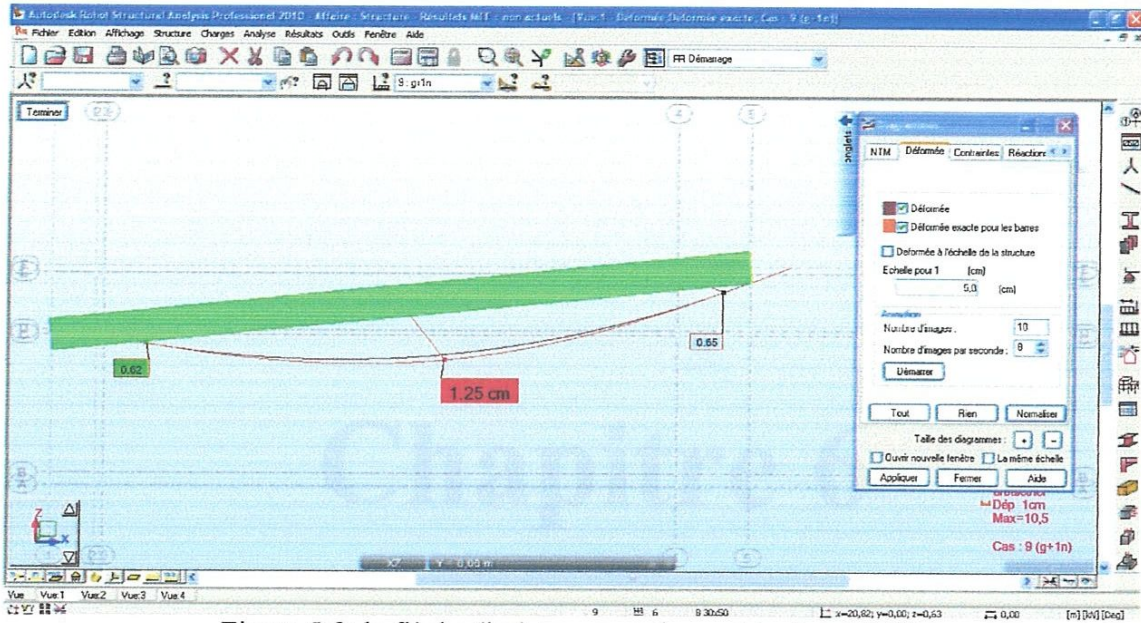


Figure 5-9: la flèche (ins) max avec la combinaison ELS2

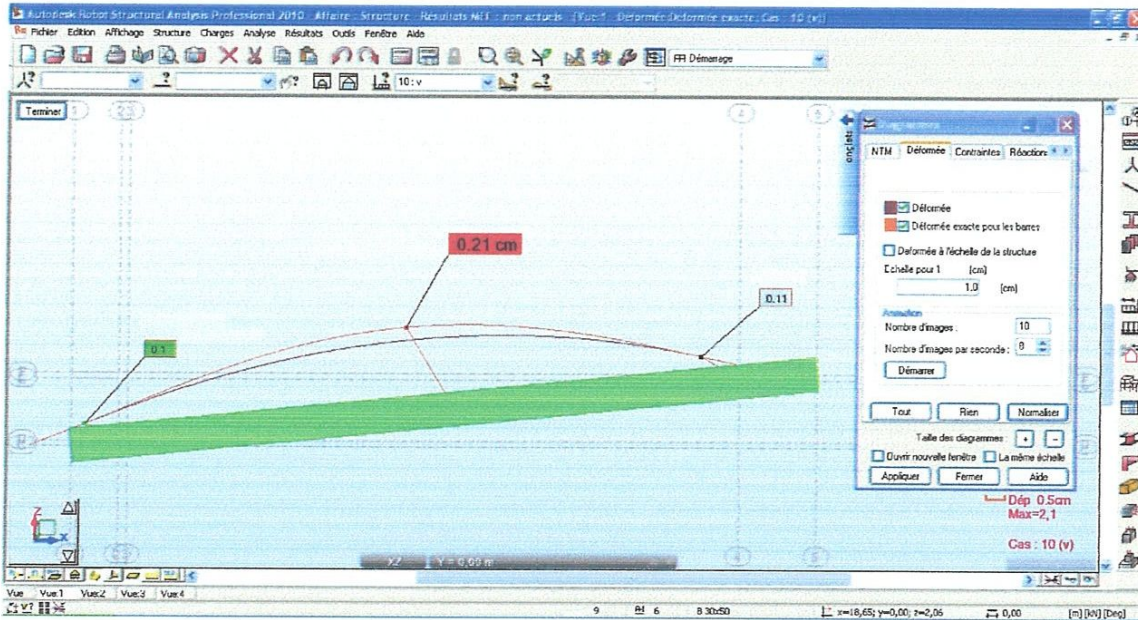


Figure 5-10: la flèche (ins) max avec la combinaison ELS3

6.1 VERIFICATION SELON L'EUROCODE 5

Flexion composée, flexion et compression

6.1.1 Vérification des contraintes (ELU)

$$\text{Taux de travail} = \frac{\delta_{c,0,d}}{k_{cz} \times f_{c,0,d}} + \left(\frac{\delta_{m,d}}{k_{crit} \times f_{m,d}} \right)^2 \leq 1 \quad [3]$$

6.1.1.1 Compression axiale

Nous prendrons la valeur contrainte Compression déterminée par logiciel ROBOT pour calculé le taux de travail.

$$\delta_{c,0,d} = 0,07 \text{ MPa}$$

$$f_{c,0,d} = f_{c,0,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

$$f_{c,0,d} = 24 \text{ N/mm}^2 : \text{contrainte caractéristique de résistance en compression}$$

$k_{mod} = 0,7$: Coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de classe de service.

$\gamma_M = 1,25$: Coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau.

$$f_{c,0,d} = 24 \times 0,7 / 1,25 = 13,44 \text{ MPa}$$

$$k_{cz} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel}^2}}$$

$$k_z = 0,5 [1 + \beta_C (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2]$$

$\beta_C = 0,1$ Pour le bois lamellé-collé.

$$\lambda_z = \frac{m \times l}{\sqrt{I_z / A}}$$

Les usages professionnels limitent l'élanement à 120. Il est nécessaire de diminuer la longueur de flambement en plaçant deux entretoises au tiers et aux deux tiers de la longueur totale. L sera de $19415/3 = 6471,66$ mm [3]

$$\lambda_{relz} = \frac{m \times l \sqrt{12}}{b \times \pi} \times \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} = \frac{0,7 \times 6471,66 \sqrt{12}}{160 \times \pi} \times \sqrt{\frac{24}{9400}} = 1,57 > 0,3$$

Donc il y a risque de flambage

$$k_z = 0,5[1 + 0,1(1,57 - 0,3) + 1,57^2] = 1,79$$

$$k_{cz} = \frac{1}{1,79 + (\sqrt{1,79^2 - 1,57^2})} = 0,37$$

6.1.1.2 flexions

Nous prendrons la valeur contrainte flexions déterminée par logiciel ROBOT pour calculé le taux de travail

$$\delta_{m,d} = 11,78 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = f_{m,k} \times \frac{k_{mod}}{\gamma_M} \times k_{sys} \times k_h$$

$$f_{m,k} = 24 \text{ N/mm}^2$$

$$k_{sys} = 1,1$$

$$f_{m,d} = 24 \times \frac{0,7}{1,25} \times 1,1 \times 1 = 14,78 \text{ MPa}$$

$$\delta_{m,crit} = \frac{0,78 \times E_{0,05} \times b^2}{h \times l_{ef}} = \frac{0,78 \times 9400 \times 160^2}{880 \left(\frac{19415,0,9}{3} + 880 \cdot 2 \right)} = 28,12 \text{ MPa avec } h = 880 \text{ mm}$$

$$\lambda_{relm} = \sqrt{\frac{f_{m,d}}{\delta_{m,crit}}} = \sqrt{\frac{24}{28,12}} = 0,92$$

$$0,75 < 0,92 < 1,4 \rightarrow k_{crit} = 1,56 - 0,75 \times \lambda_{rel,m} = 0,87$$

✓ **Justification**

$$\text{Taux de travail} = \frac{0,07}{0,37.13,44} + \left(\frac{11,78}{0,87.14,78} \right)^2 = 0,93 < 1 \text{ la condition vérifiée}$$

6.1.2 Vérification des déformations (ELS)

La deuxième vérification concerne la déformation. L'état limite de service est atteint lorsque les déformations admises sont dépassées.

Nous prendrons les valeurs déterminées par logiciel ROBOT.

$$W_{\text{inst}}(\mathbf{Q}) = 12,54 \text{ mm}$$

$$W_{\text{net,fin}} = W_{\text{inst}}(\mathbf{Q}) \left(\frac{k_{\text{def}} \cdot (G + \Psi_2 \cdot Q) + G}{Q} \right)$$

$$W_{\text{net,fin}} = 12,45 \times \left(\frac{0,8 \times (1,32 + 0 \times 1,73) + 1,32}{1,73} \right) = 17,09 \text{ mm}$$

✓ **Justification**

$$W_{\text{inst,lim}}(\mathbf{Q}) = \frac{L}{300}$$

$$W_{\text{inst,lim}}(\mathbf{Q}) = \frac{19415}{300} = 64,71 \text{ mm}$$

$$W_{\text{net,fin,lim}} = \frac{L}{200}$$

$$W_{\text{net,fin,lim}} = \frac{19415}{200} = 97,07 \text{ mm}$$

$$\frac{W_{\text{inst}}(\mathbf{Q})}{W_{\text{inst,lim}}(\mathbf{Q})} = \frac{12,45}{64,71} = 0,19 < 1 \text{ et } \frac{W_{\text{net,fin}}}{W_{\text{net,fin,lim}}} = \frac{17,09}{97,07} = 0,17 < 1$$

La condition vérifiée.

CONCLUSION

Au terme de ce mémoire de fin d'étude de Master de génie civil on peut conclure les points suivants :

Le bois est un matériau qui présente beaucoup de qualités et de caractéristiques qui lui permettent de concurrencer les autres matériaux de construction les plus utilisés comme le béton armé et l'acier.

La méthode des éléments finis, quoi que méthode rapprochée offre plusieurs avantages par rapport aux méthodes exactes comme la facilité de programmation ce qui permet de gagner beaucoup de temps dans les calculs.

Le logiciel de calcul ROBOT est très facile d'utilisation que ce soit dans la l'introduction des données que pour l'affichage de résultats.

Ne disposant pas de règlement de calcul de structure de bois en Algérie, l'Eurocode 05 nous a permis de vérifier les sections de la poutre calculée vis-à-vis des contraintes ultimes en ELU et de la flèche en ELS.

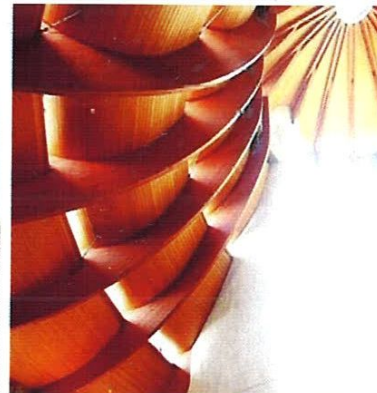
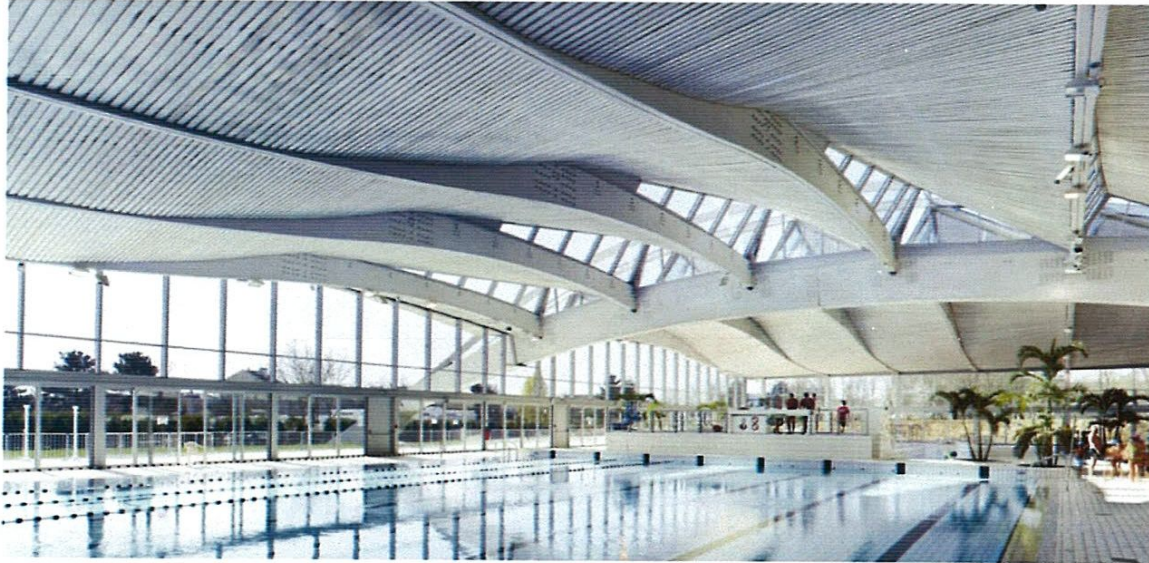
Certes on a beaucoup appris dans cette étude mais la contrainte temps nous a pas permis d'aller plus loin, on aurait pu faire l'étude des autres éléments principaux et secondaires de la structure de l'hangar et vérifier les différents assemblages.

Le bois n'est pas très utilisé en structure en Algérie du fait du non disponibilité de bois locaux de bonne qualité, mais aussi de l'absence de bureaux d'études et d'entreprises qualifiées dans ce domaine. Nous recommandons que l'étude du matériau bois soit introduite dans les programmes d'études universitaires et l'organisation de manifestation scientifiques et économiques comme les expositions pour promouvoir l'utilisation du bois dans les structures.

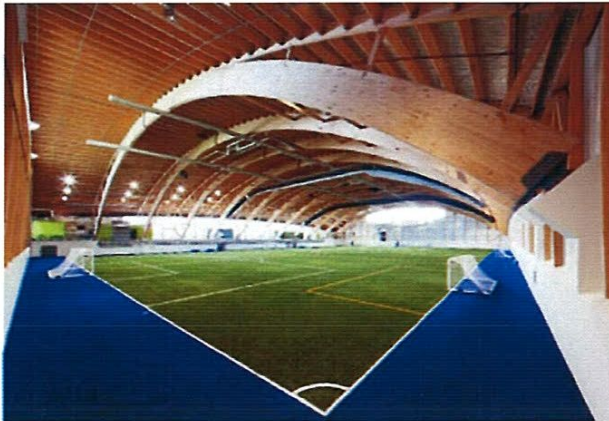
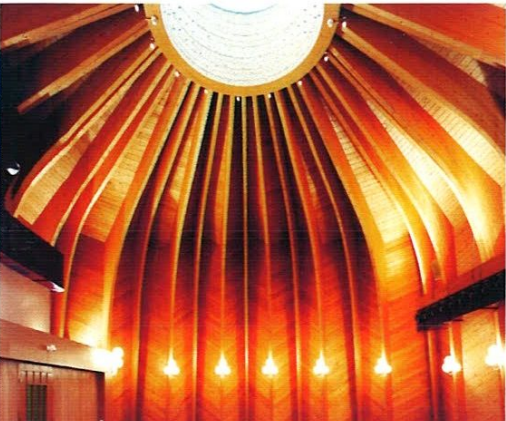
- | | |
|-------|---|
| 1 | 1) passerelle avec des éléments en bois lamellé collé, |
| 2 3 | 2) poutre en lamellé collé forme de courbe, |
| 4 5 | 3) poutre en lamellé collé forme de arc, |
| | 4) réalisation du un structure en lamellé collé forme coque , |
| | 5) toiture system treillis bois lamellé collé, |



- | | |
|---|---|
| 1 | 1) Piscine avec des éléments en bois lamellé collé, |
| 3 | 2) poutre en lamellé collé forme de courbe, |
| | 3) exemple de en lamellé collé, |
| 4 | 4) exemple de en lamellé collé, |
| | 5) toiture system treillis bois lamellé collé. |



- | | |
|---|---|
| 1 | 1) toiture system treillis bois lamellé collé, |
| 2 | 2) poutre en lamellé collé forme de courbe, |
| 3 | 3) poutre en lamellé collé forme de arc, |
| 4 | 4) réalisation du un structure en lamellé collé forme coque , |
| 5 | 5) sale de sport avec des poutre de grande porté en lamellé collé |



**Référence
bibliographie**

Référence bibliographie

- [1] **Constructions en bois** – Cours à l'intention de 1^{er} master en Constructions, Université de Liège, Faculté des Sciences Appliquées, Année académique 2007-2008.
- [2] **Constructions en bois** – Matériau, technologie et dimensionnement, J. Natterer, J.-L. Sandoz et M. Rey, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2000.
- [3] **Eurocode 5** – conception et Calcul des structures en bois, Partie 1 et 2.
- [4] **Manuel simplifié de Eurocode 5.**
- [5] **Aide sur Robot** – Autodesk ® Robot Structural Analyses 2010.
- [6] **Règlement neige et vent** – R.N.V Alger 1999.

