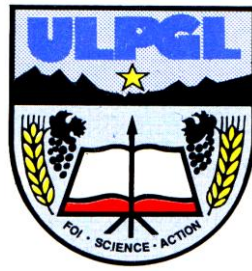


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUEES**

**CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT
D'UNE STRUCTURE EN BOIS AVEC
ISOLATION THERMIQUE, CAS D'UNE
MAISON D'HABITATION**

Travail de fin de cycle effectué en vue de l'obtention
du Diplôme de graduat en Sciences Appliquées

Par : ASHUZA LUBALIRO Ibrahim

Option : Génie Civil

Directeur : Dr. Ir. BISHWEKA B. CHERIF

Encadreur : Ass. Ir. KUBUYA Patient

ANNEE ACADEMIQUE 2021 - 2022

EPIGRAPHE

« Si le Seigneur ne bâtit la maison, les bâtisseurs travaillent en vain... »

Psaumes 126 :1

DEDICACE

A nos chers parents Bertin C. LUBALIRO & Nathalie K. FURAHA ;

ASHUZA LUBALIRO Ibrahim

REMERCIEMENTS

Ce que nous sommes aujourd'hui va bien au-delà de nos efforts personnels. Nous sommes une somme totale de ce que petits et grands rencontrés sur notre chemin nous ont enseigné. L'expression d'une gratitude particulière s'adresse à notre Dieu Tout Puissant, source de toutes sagesse, inspiration et connaissance. La réalisation du présent travail serait impossible sans la vie, la santé, la force, le courage et l'intelligence qu'il ne cesse de nous donner dans son immense bonté.

Notre gratitude s'adresse également aux autorités de l'Université Libre des Pays des Grands Lacs, aux enseignants affectés à notre chère Faculté de Sciences et Technologies Appliquées et en particulier au Dr. Ing. BISHWEKA Chérif et à l'assistant Ing. Patient KUBUYA, respectivement Directeur et Encadreur de ce travail, dont le dévouement manifesté dans l'encadrement reçu de leur part nous a permis de parachever ce travail.

Que nos chers parents, frères et sœurs ainsi que toute la famille trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance. Leur amour, leur attention, les sacrifices et les prières en notre faveur ne cessent de nous inspirer et d'être pour nous une source sûre d'encouragement.

Enfin nous disons grand merci aux camarades, aînés et cadets, amis et connaissances dont la collaboration et le soutien à tous les niveaux s'avèrent indispensables pour notre formation et notre réalisation personnelle.

ASHUZA LUBALIRO Ibrahim

LISTE DES FIGURES

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I. 1 Vue en coupe d'un troc d'arbre et de ses différentes parties (d'après site CNDB).. | 3 |
| Figure I. 2. Variation dimensionnelle en fonction de la teneur en eau du bois..... | 7 |
| Figure I. 3. Efforts mécaniques | 9 |
| Figure I. 4. Relation entre la densité et le module d'élasticité longitudinale pour de l'épica .. | 11 |
| Figure I. 5. Bois sciés | 22 |
| Figure I. 6.. Vue schématique d'une poutre en BLC et détail de l'aboutage par entures de deux lamelles..... | 22 |
| Figure I. 7. Vue d'une isolation intérieure | 25 |
| | |
| Figure III. 1.Représentation de la ferme. | 44 |
| Figure III. 2.Description des charges sur les pannes..... | 48 |
| Figure III. 3. Description des pannes sur l'arbalétrier..... | 49 |
| Figure III. 4. Poutre chargée..... | 61 |
| Figure III. 5. Illustration des actions sur le poteau..... | 62 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I. 1. Coefficient du retrait du bois..... | 6 |
| Tableau I. 2. Masses volumiques de différentes essences de bois | 7 |
| Tableau I. 3. Classification des bois d'après la densité..... | 8 |
| Tableau I. 4. Dureté du bois | 8 |
| Tableau I. 5. Caractéristiques mécaniques de quelques essences. | 13 |
| Tableau I. 6. Vitesse du son dans les matériaux..... | 13 |
| Tableau I. 7. La conductibilité thermique de quelques matériaux | 15 |
| Tableau I. 8. Réaction au feu des matériaux | 16 |
| Tableau I. 9. Contraintes caractéristiques des bois massifs (résineux) | 18 |
| Tableau I. 10. Contraintes caractéristiques des bois massifs (feuillus)..... | 18 |
| Tableau I. 11. Conductibilité thermique des matériaux isolants. | 26 |
| | |
| Tableau II. 1. Valeur des surfaces des pièces..... | 28 |
| Tableau II. 2. Valeurs des charges d'exploitation en fonction de l'usage du bâtiment..... | 31 |
| Tableau II. 3. Coefficients de sécurité pour la détermination des contraintes admissibles des bois durs et tendres..... | 33 |
| Tableau II. 4. Valeurs des coefficients Ψ pour les bâtiments..... | 41 |
| Tableau II. 5. Valeurs limites pour les flèches | 41 |
| | |
| Tableau III. 1. Dimensions des éléments de la ferme | 45 |
| Tableau III. 2. Données sur le coefficient du vent | 46 |
| Tableau III. 3. Charges sur les nœuds | 57 |
| Tableau III. 4. Efforts dans les barres et types de sollicitation | 57 |
| Tableau III. 5. Dimensions des éléments de la charpente et de la structure porteuse | 65 |

SOMMAIRES

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| <i>EPIGRAPHE</i> | <i>i</i> |
| <i>DEDICACE</i> | <i>ii</i> |
| <i>REMERCIEMENTS</i> | <i>iii</i> |
| <i>LISTE DES FIGURES</i> | <i>iv</i> |
| <i>LISTE DES TABLEAUX</i> | <i>v</i> |
| <i>SOMMAIRES</i> | <i>vi</i> |
| <i>SIGLES ET ABRÉVIATIONS</i> | <i>viii</i> |
| <i>INTRODUCTION GENERALE</i> | <i>1</i> |
| I.1 STRUCTURE ANATOMIQUE DU BOIS [2] | 3 |
| I.2.1 Propriétés physiques [3]..... | 4 |
| I.2.2 Propriétés chimiques [5] | 8 |
| I.2.3 Propriétés mécaniques [8] | 9 |
| I.2.4 Propriétés acoustiques | 13 |
| I.2.5 Propriétés thermiques | 14 |
| I.3 CLASSIFICATION ET CLASSEMENT DES BOIS | 16 |
| I.3.1 Classification des bois..... | 16 |
| I.3.2 Classement des bois | 17 |
| I.4 TRAITEMENT DU BOIS [4] | 18 |
| I.4.1. Séchage du bois..... | 18 |
| I.4.2 Protection du bois..... | 19 |
| I.5 LE BOIS DANS LA CONSTRUCTION | 20 |
| I.5.1 Aperçu [6] | 20 |
| I.5.2 Eléments bois utilisés en construction [5]..... | 21 |
| I.6 CONSTRUCTION EN BOIS ET ENVIRONNEMENT | 24 |
| I.7. NOTION D'ISOLATION THERMIQUE | 24 |
| I.7.1 L'isolation thermique par l'intérieur [7]. | 25 |
| I.7.2. Les principaux isolants utilisés [8]..... | 26 |
| I.7 CONCLUSION PARTIELLE | 27 |
| <i>CHAPITRE II. NORMES DE CONCEPTION, METHODES DE DIMENSIONNEMENT ET MISE EN PLACE DE L'ISOLANT</i> | <i>28</i> |
| II.1. Normes d'architecture, normes techniques | 28 |
| II.1.1 Localisation..... | 28 |
| II.1.2 Dimension des pièces..... | 28 |
| II.2. Aperçu sommaire de la norme : Eurocodes 5. | 29 |
| II.3. CONCEPTS DE DIMENSIONNEMENT | 29 |
| II.3.1 Le Prédimensionnement | 30 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|
| II.3.2 La Descente Des Charges | 30 |
| II.3.3 Le Dimensionnement..... | 32 |
| II.4 ETUDE DE MISE EN PLACE DE L'ISOLANT [7] | 42 |
| II.4.1. Isolation des murs par l'intérieur | 42 |
| II.4.2. Différentes techniques d'isolation par intérieure | 42 |
| II.5. CONCLUSION PARTIELLE..... | 43 |
| <i>CHAPITRE III. DIMENSIONNEMENT DE L'OUVRAGE ET ETUDE D'ISOLATION THERMIQUE</i> | <i>44</i> |
| III.1. DIMENSION ET REPRÉSENTATION DE LA FERME TYPE | 44 |
| III.2. LES LONGUEURS DES BARRES..... | 45 |
| III.3. HYPOTHESES DE CALCUL..... | 45 |
| III.3.1. Etude du vent..... | 45 |
| III.3.2. Surcharges d'exploitation et données du problème | 46 |
| III.3.3. Eventaires des forces | 47 |
| III.4. DIMENSIONNEMENT DES PANNES SUR L'ARBALETRIER | 48 |
| III.4.1. Description des pannes sur l'arbalétrier | 49 |
| III.4.2. Calculs des pannes faîtières | 49 |
| III.4.3. Calculs des pannes courantes sur l'arbalétrier | 53 |
| III.4.4. Pannes sablières sur arbalétrier..... | 54 |
| III.5. DETERMINATIONS DES CHARGES SUR LES NŒUDS ET EFFORTS DANS LE BARRES..... | 54 |
| III.5.1 Calcul des charges appliquées aux différents nœuds de la ferme | 55 |
| III.5.2 Efforts dans les barres | 57 |
| III.6 DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DE LA FERME | 57 |
| III.6.1 Dimensionnement du tirant | 58 |
| III.6.2 Dimensionnement de l'arbalétrier | 59 |
| III.6.3 Dimensionnement des diagonales | 59 |
| III.7 DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE PORTEUSE | 60 |
| III.7.1 Les Poutres | 60 |
| III.7.2 Poteaux | 61 |
| III.7.3. Tableau synthétique des dimensions retenues | 64 |
| III.8. ETUDE D'ISOLATION THERMIQUE DE LA STRUCTURE..... | 65 |
| III.8.1. Présentation des intérêts techniques | 65 |
| III.8.2. Expression de la température par une équation différentielle..... | 67 |
| III.9 CONCLUSION PARTIELLE | 69 |
| <i>CONCLUSION GENERALE</i> | <i>70</i> |
| <i>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</i> | <i>72</i> |
| <i>ANNEXES</i> | <i>73</i> |

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A : aire de la pièce en mm^2

C_e : Coefficient de pression extérieur

C_i : Coefficient de pression intérieur

DaN : déca Newton

DaN/ m^3 : déca Newton par mètre cube

f_{cod} : résistance de compression parallèle aux fibres

f_m : contrainte de flexion caractéristique en MPa

f_{md} : contrainte de résistance de flexion

f_{tok} : contrainte de flexion caractéristique en traction axiale en MPa

h : hauteur du poteau

I : moment quadratique en mm^4 pour une section rectangulaire

Ir : ingénieur

Kg : kilogramme

Kg/ cm^3 : kilogramme par centimètre cube

L : longueur, distance entre appuis en mm

M^3 : mètre cube

M^2 : mètre carré

$M_{f,y}$: moment de flexion en MPa

N : effort normal en MPa

Qh : pression dynamique agissant à la hauteur h

ULPGL : Université Libre des Pays de Grands Lacs

Θ : angle entre les barres

$\lambda_{\text{Réal}}$: enlacement relatif

INTRODUCTION GENERALE

La République Démocratique du Congo est un pays en voie de développement. Dans ses villes, les grandes églises, les écoles, les entreprises et particulièrement les locaux d'habitation ont besoin de l'amélioration du confort, particulièrement ceux faits en ossature bois [1].

Dans plusieurs pays la construction est un domaine qui évolue au fil du temps, plusieurs matériaux sont utilisés dans la réalisation des structures et le bois en fait partie. Néanmoins, il s'avère que plusieurs ressources en bois restent inexploitées convenablement par peur des risques d'incendie et de biodégradation alors qu'il est possible d'y remédier.

Il s'observe qu'en RD Congo en générale et particulièrement à Goma, le bois est utilisé comme matériau de construction mais aussi le béton. Plus couramment, le bois intervient comme matériau de construction d'ouvrages secondaires et simples à l'occurrence des échafaudages, des coffrages, des charpentes, etc. A la limite et cela de manière générale, le bois intervient dans la construction de maisons en plain-pied sans pour autant jouer le rôle d'un matériau de structure pour des ouvrages de grande envergure.

Il convient de constater que dans notre région nous avons différentes saisons climatiques, ce qui fait la variation de la température d'une période à une autre, pour ainsi dire que le besoin d'une isolation thermique est nécessaire et important. Il est vrai la saison de pluie est plus longue que la saison sèche ; cependant un ouvrage doit être doté d'une isolation thermique afin de doter l'intérieur de l'ouvrage d'une température ambiante permettant son bon fonctionnement.

De ce qui précède, il serait attrayant de baser cette recherche scientifique sur la question de vouloir savoir :

- S'il serait possible d'envisager la construction d'une structure en bois servant comme maison d'habitation avec une isolation thermique tout en respectant les normes de génie civil et en étudiant l'évolution de la température à l'intérieur de l'ouvrage.

Etant donné la question de recherche spécifiée, ce présent travail mobilise les efforts pour vérifier l'hypothèse selon laquelle il serait possible d'effectuer la conception d'une structure en bois à construire dans la ville de Goma qui soit structurellement résistante et architecturalement attrayant et en évaluer l'évolution de la température.

Le choix de ce thème tire son caractère scientifique dans la volonté de démontrer que le bois est non seulement une ressource disponible et durable mais également un matériau de construction à valoriser dans la région. Si le problème de non usage du bois est dû à la technologie utilisée dans la mise en place de ces ouvrages, chaque élément de structure sera calculé en vue de le rendre résistant à toute sorte de sollicitation (intempéries, surcharge,...)

Sur le plan académique, cette étude est faite, non seulement pour recevoir un diplôme mais aussi pour apporter une contribution dans la recherche aux questions similaires pouvant attirer l'attention des chercheurs ultérieurs.

Les objectifs de ce travail sont les suivants :

- Etudier une structure en bois
- Evaluer l'évolution de la température de l'extérieur à l'intérieur.

Pour atteindre ces objectifs, certaines méthodes et techniques ont servi de base, notamment :

- Méthode déductive : importante qualité car son raisonnement va des lois aux faits, ces lois ont été appliquées lors des calculs de dimensionnement.
- Méthode analytique : pour la décomposition de l'objet d'étude du plus complexe au plus simple.
- L'observation en situation : a permis de voir l'état actuel du restaurant au campus Salomon qui laisse à désirer.
- Technique documentaire : a permis d'étudier le dimensionnement de l'ouvrage partant des normes et ouvrages préexistants.

Hormis l'introduction et la conclusion générales, ce travail est constitué de trois chapitres : Le premier s'intéresse aux généralités sur le matériau bois et des notions d'isolation, la deuxième traite de la méthode de dimensionnement des structures en bois et le troisième effectue une application au dimensionnement de l'ouvrage et étude sur l'isolation thermiques.

Chapitre I. GENERALITES SUR LE BOIS ET NOTIONS D'ISOLATION THERMIQUE

Ce chapitre présente des généralités sur le matériau bois utilisé dans la construction. D'une manière succincte, il reprend la structure anatomique du bois, ses différentes propriétés, la classification ainsi que le traitement notamment le séchage et la protection, un aperçu sur l'utilisation du bois dans la construction, et son impact sur l'environnement. Mais aussi il présente quelques notions sur l'isolant comme matériau de protection.

I.1 STRUCTURE ANATOMIQUE DU BOIS [2]

Le bois est une matière ligneuse élaborée par un organisme vivant au milieu d'un écosystème. L'origine végétale du bois explique ses particularités, mais aussi sa richesse et sa variété. Matériau aux caractéristiques variables, présentant des singularités plus ou moins marquées, il se distingue sur ce plan des autres matériaux utilisés dans la construction : brique, ardoise, béton, acier, PVC, etc. Le bois a pour origine l'arbre et le matériau qui nous intéresse le plus particulièrement est celui tiré du tronc. Pris dans son ensemble, le tronc comprend 5 parties principales qui sont le rhytidome ou partie externe de l'écorce, le cambium, le liber, l'aubier et le duramen encore appelé bois du cœur ou bois parfait.

La figure I.1 illustre ces différentes parties.

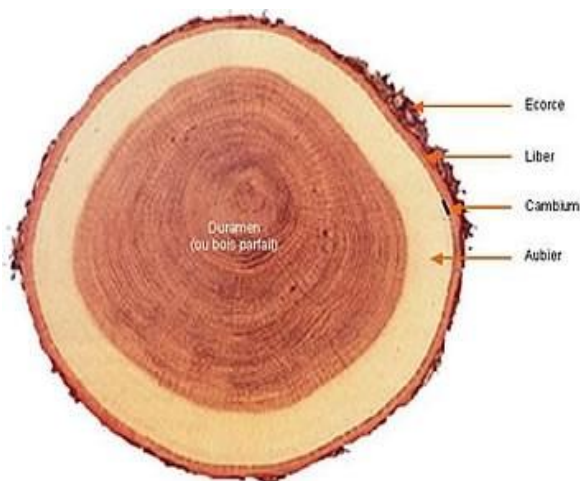


Figure I. 1 Vue en coupe d'un tronc d'arbre et de ses différentes parties (d'après site CNDB).

I.2 PROPRIETES DU BOIS

Le choix du matériau est la première étape pour la conception et le dimensionnement dans un projet de construction. Celui-ci doit être effectué en tenant compte de la résistance et

du coût. La résistance étant prioritaire, il convient donc d'étudier les différentes propriétés du matériau qui déterminent sa résistance parmi lesquelles les propriétés physiques, chimiques, mécaniques et acoustiques.

Avant de parler des propriétés du bois, il est important de souligner ces trois propriétés fondamentales qui lui sont conférées par sa structure et qui se retrouvent plus ou moins fortement dans toutes les essences :

– L'hétérogénéité.

Du fait que la composition des cellules n'est pas uniforme, les propriétés physiques du bois ne sont pas distribuées spatialement de façon homogène. On dit alors que le bois est un matériau aux propriétés hétérogènes. Il existe un effet d'échelle : plus une pièce de bois est grande, plus la probabilité d'avoir des défauts est forte.

– L'anisotropie.

Les propriétés mécaniques et physiques dépendent fortement de la direction considérée. On définit ainsi 3 directions privilégiées, la direction axiale (ou longitudinale) selon l'axe du tronc, les directions radiale et tangentielle (ou orthoradiale), perpendiculaire et parallèle respectivement, aux cernes dans le plan perpendiculaire à l'axe du tronc. Les résistances mécaniques sont maximales lorsque la sollicitation est orientée parallèlement à l'axe des fibres du bois (direction longitudinale) et minimales lorsque la sollicitation est perpendiculaire aux fibres.

– L'hygroscopie.

Les fibres du bois ont des liaisons sur lesquelles peuvent se fixer les molécules d'eau (liaison hydroxyles -OH). Selon l'humidité environnante, les fibres contiendront plus ou moins d'eau (eau dite liée). Les variations de la teneur en eau au sein du bois (les variations de son degré d'humidité) provoquent des déformations plus ou moins importantes selon la direction considérée.

I.2.1 Propriétés physiques [3]

Le bois est un matériau de construction qui présente de nombreuses caractéristiques physiques intéressantes. En vue de son emploi en construction on va considérer les caractéristiques ci-après :

- La teneur en eau : l'humidité relative
- La rétractibilité

- La masse volumique (la densité)
- La dureté

a. Teneur en eau

La teneur en eau est l'une des caractéristiques les plus importantes du bois étant donné qu'elle influe directement sur ses autres propriétés physiques et sur ses propriétés mécaniques. En effet, toute variation d'humidité entraîne des variations de dimensions, de forme, de volume (retrait ou gonflement selon que l'humidité baisse ou augmente), de densité et de résistance.

Le degré d'humidité joue aussi un rôle important dans la conservation, les bois humides peuvent être attaqués par les champignons ou les autres insectes des bois frais. Le degré d'humidité du bois (ou teneur en eau), noté H , est défini comme le poids de l'eau dans la pièce de bois divisé par le poids du bois anhydre, celui-ci étant obtenu après séchage à l'étuve à une température d'environ 100°C ou plus jusqu'au poids constant.

Il s'exprime en pourcentage et s'obtient d'après la formule (I.1) :

$$H = \frac{m_w - m_s}{m_s} \times 100 \quad (\text{I.1})$$

Avec H : le degré d'humidité
 m_w : la masse d'un échantillon avant dessiccation
 m_s : la masse du même échantillon anhydre

Le degré d'humidité H varie en fonction de l'ambiance à laquelle est exposée la pièce de bois. L'ambiance est contrôlée par la température et l'humidité de l'air au voisinage de la pièce de bois.

On caractérise une pièce de bois en fonction de son degré d'humidité H :

- à $H = 0\%$, on parle de bois anhydre,
- de $H = 0\%$ à $H = 13\%$, on parle de bois desséché (obtenu par séchage artificiel uniquement),
- de $H = 13\%$ à $H = 17\%$, on parle de bois sec à l'air,
- de $H = 17\%$ à $H = 23\%$, on parle de bois commercialement sec,
- de $H = 23\%$ à $H = 30\%$, on parle de bois mi- sec,

A $H > 30\%$, le point de saturation est atteint. L'eau n'est plus simplement contenue dans les fibres du bois (eau liée), ce qui veut dire qu'elle commence à remplir les pores du bois (on parle alors de l'eau libre).

Les propriétés mécaniques et physiques réglementaires sont définies pour l'humidité normale correspondant à $H = 12\%$ d'après l'Eurocode 5 où l'on considère comme état d'équilibre une situation à une température de 20°C et une humidité relative de l'air de 65% .

Pour des pièces de dimensions importantes, l'humidité diffère suivant la partie de la pièce considérée, entre la surface et le cœur notamment, mais aussi éventuellement entre les parties plus ou moins exposées aux variations d'humidité.

Les autres propriétés dépendent de celle-ci, c'est pourquoi on les porte à un certain degré d'humidité de référence.

b. Rétractibilité

Tout bois humide gonfle, et s'il perd son humidité, il rétracte. On dit couramment que le bois « joue » ou encore qu'il « travaille ».

Les dimensions du bois varient donc en fonction de l'humidité. On peut observer un retrait ou gonflement selon le sens de variation de l'humidité.

On peut constater une forte anisotropie dans ce phénomène de retrait : les variations de longueur sont beaucoup plus faibles dans le sens des fibres que dans deux autres sens et le retrait tangentiel est de l'ordre de deux à trois fois le retrait radial.

Le tableau I.1 indique les différentes valeurs du coefficient de retrait du bois selon les 3 directions : axiale, radiale et tangentielle pour les bois légers et les bois lourds.

Tableau I. 1. Coefficient du retrait du bois

| Sens | Bois légers | Bois lourds |
|-------------------|---------------|---------------|
| Axial | Négligeable | Négligeable |
| Radial | 0.10 à 0.15 % | 0.15 à 0.20 % |
| Tangentiel | 0.20 à 0.30 % | 0.30 à 0.40 % |

Le bois contient de l'eau sous deux formes. En dessous du point de saturation $H < 30\%$, l'eau dite liée est uniquement localisée dans les parois des cellules (dans les fibres de bois). Pour $H > 30\%$, les parois ne peuvent plus stocker d'eau et l'excédent d'eau, nommée eau libre, commence à remplir les pores du bois. Pour $H < 30\%$, plus l'humidité diminue, plus le retrait est important (les dimensions de la pièce de bois diminuent quand H diminue) et meilleures sont les propriétés mécaniques. Au-delà de 30% , l'humidité du bois ne provoque plus des variations dimensionnelles et les propriétés mécaniques sont minimales mais elles ne sont plus influencées par une augmentation de l'humidité. C'est donc uniquement l'eau liée dans les fibres qui influence le retrait et les propriétés mécaniques.

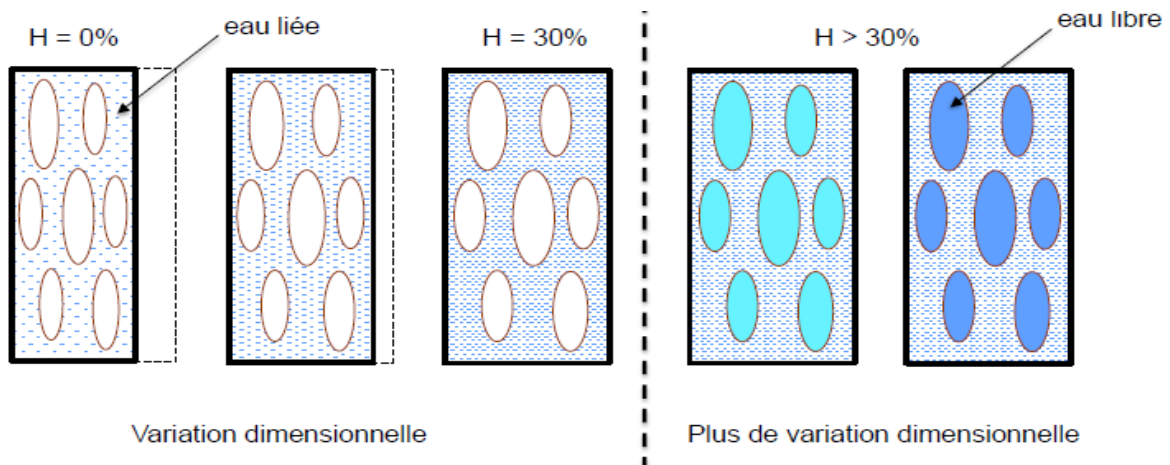


Figure I. 2. Variation dimensionnelle en fonction de la teneur en eau du bois

c. Masse volumique et la densité

La masse volumique d'un corps s'exprime en général en kilogrammes par mètre cube. La densité d'un corps est le rapport de sa masse volumique à la masse volumique de l'eau. C'est une grandeur sans dimension. La masse volumique et la densité du bois varient avec son humidité, sa structure et selon son essence. En effet, quelle que soit l'essence, la masse volumique des substances cellulosiques constitutives des parois cellulaires est identique et vaut $1\,540\text{ kg/m}^3$ pour $H = 15\%$. C'est donc l'organisation cellulaire, et plus particulièrement le ratio entre substance cellulaire et vide (la porosité) qui détermine la densité d'une essence. Le tableau I.2 donne la masse volumique pour différentes essences de bois.

Tableau I. 2. Masses volumiques de différentes essences de bois

| Essence | Masse volumique (kg/m^3) | Essence | Masse volumique (kg/m^3) |
|----------|-------------------------------------|-----------|-------------------------------------|
| Balsa | 100-250 | Red Cedar | 400-500 |
| Peuplier | 400-500 | Sapin | 400-500 |
| Orme | 550-650 | Epicéa | 400-500 |
| Hêtre | 550-650 | Douglas | 500-600 |
| Chêne | 650-750 | Pins | 500-600 |
| Olivier | 750-1000 | Mélèze | 600-700 |
| Azobé | 1000-1100 | Ebène | 1050-1250 |

Les bois peuvent être classés selon leur masse volumique, le classement se fait par essence avec une densité établie à 15% d'humidité (Tableau I.3). La densité dépend de l'organisation cellulaire de l'essence considérée. Les feuillus et les résineux sont classés par catégorie en : très légers, légers, mi-lourds, très lourds. La densité représente une sommation pratique des parois

résistantes contenues dans l'unité de volume, elle règle donc les résistances mécaniques d'un bois au sein d'une même essence.

Tableau I. 3. Classification des bois d'après la densité

| Densité à 15 % d'humidité | Qualification des bois | Essences |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| résineux | | |
| Inférieure à 0.4 | Très légers | pin weymouth |
| 0.4 à 0.5 | Légers | épicéa sapin |
| 0.5 à 0.6 | Mi-lourds | pin sylvestre |
| 0.6 à 0.7 | Lourds | pin laricio, mélèze |
| Supérieure à 0.7 | Très lourds | pitchpin |
| feuillus | | |
| Inférieure à 0.5 | Très légers | tilleul, marronnier |
| 0.5 à 0.65 | Légers | peuplier, aulne, merisier |
| 0.65 à 0.80 | Mi-lourds | chêne, frêne, hêtre |
| 0.80 à 1.00 | Lourds | charme, sorbier |
| Supérieure à 1 | Très lourds | azobé, ipé |

d. Dureté

D'une manière générale, la dureté d'un corps est la résistance qu'il oppose à la pénétration d'un corps étranger. On classe les bois en bois durs, mi-durs et tendres. Une corrélation étroite existe entre la densité et la dureté : les bois les plus denses sont les plus durs et les bois les plus légers sont les plus tendres. L'échelle de dureté des bois est normalisée. Le tableau I.4 donne quelques exemples des essences de bois et leur dureté fonction de la densité.

Tableau I. 4. Dureté du bois

| Classes de densité et de dureté | Densité | Dureté | Essences |
|----------------------------------|-------------|------------|------------------------------------------------|
| Bois très lourds et très durs | 0,85 | 9 | Azobé, ipé |
| Bois lourds et durs | 0,70 - 0,85 | 5 - 9 | Charme, movingui, chêne dur |
| Bois mi-lourds et mi-durs | 0,56 - 0,70 | 2,5 - 5 | Niangon, iroko, châtaigner, chêne tendre, pins |
| Bois légers et tendres | 0,45 - 0,55 | 1,25 - 2,5 | Framiré, douglas, épicéa, sapin, pins |
| Bois très légers et très tendres | 0,45 | 1,25 | Western red cedar, séquoia, peuplier |

I.2.2 Propriétés chimiques [5]

Chimiquement, le bois se compose presque toujours de 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% de matières minérales (qui se trouvent dans les

condres). La matière principale constitutive du bois est la cellulose ($C_6H_{10}O_5$)_n, qui entre pour 50% dans la composition, 20% d'hémicellulose et 30% de lignine. Dans un milieu acide, le bois commence à se détériorer pour un $pH \leq 2$ (le béton et l'acier commencent à $pH \leq 4$). Les bois sont sujets à diverses formes de corrosion dues à des microorganismes, en raison de la présence de matières nutritives comme les albuminoïdes et matières amylacées (contiennent l'amidon) se trouvant en réserve ou concentrées dans la sève et qui peuvent être solubilisées.

I.2.3 Propriétés mécaniques [8]

Les pièces de bois dans la construction sont sollicitées par différents efforts mécaniques dont les principaux sont représentés sur la figure I.3

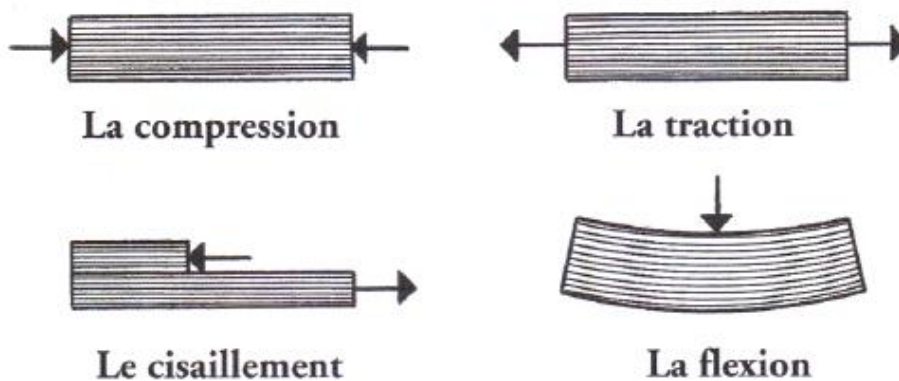


Figure I. 3. Efforts mécaniques

La résistance mécanique d'une pièce de bois dépend de nombreux facteurs :

- du mode de sollicitation (traction, compression, flexion simple, flexion composée, torsion, flexion déviée, . . .), et de l'inclinaison de la sollicitation par rapport aux fibres (anisotropie),
- de la nature du bois (essence et qualité),
- du degré d'humidité H ,
- de la durée du chargement (fluage).

L'ensemble des propriétés mécaniques est relativement bien corrélé à la densité du bois, mesurée pour un degré d'humidité de $H = 12\%$. Plus la densité est élevée, meilleures seront les propriétés mécaniques.

a. Résistance à la compression

Le bois est un matériau anisotrope comme nous l'avons expliqué plus haut. Il est organisé pour résister dans le sens des fibres et il offre des résistances remarquables dans cette direction, mais il est faible et peu cohérent dans le sens perpendiculaire. Les résistances

mécaniques sont maximales pour les bois anhydres, et l'humidité a une influence considérable sur la résistance en compression. Quand elle croît, la résistance diminue linéairement à raison de 4 % par pourcentage d'humidité. La résistance à la compression est très différente suivant qu'il s'agira d'une compression parallèle ou perpendiculaire aux fibres. La compression axiale proprement dite, sans flexion latérale, ne peut se réaliser pratiquement que sur des pièces relativement courtes, l'effort étant dirigé dans le sens des fibres. Lorsque l'effort est appliqué suivant un angle α par rapport au sens des fibres, on peut calculer la résistance ultime à partir de la formule (I.2) dite de Hankinson :

$$f_{\alpha} = \frac{f_0 f_{90}}{\sin^2 \alpha \times f_0 + \cos^2 \alpha \times f_{90}} \quad (\text{I. 2})$$

Avec $f = \frac{f_{\alpha}}{f_0}$; le rapport entre la résistance suivant un angle α et la résistance parallèle,

$\beta = \frac{f_{90}}{f_0}$; le rapport entre la résistance perpendiculaire et la résistance parallèle

Alors l'expression de Hankinson devient d'après la formule (I. 3) :

$$f = \frac{\beta}{\sin^2 \alpha + \beta \cos^2 \alpha} \quad (\text{I. 3})$$

En compression transversale, le bois subit des déformations élastiques, puis les cellules s'écrasent pour une charge qui est 7 à 8 fois moindre qu'en sens axial.

b. Résistance à la traction

Le bois se montre particulièrement résistant en traction axiale, c'est-à-dire aux efforts de tension s'exerçant dans le sens des fibres. La résistance ultime en traction axiale du bois parfait vaut 2 à 3 la résistance en compression dans le sens des fibres car celles-ci ne tendent ni à s'écarter ni à flamber individuellement contrairement à la compression. On n'exploite jamais pleinement cette résistance car l'interruption du fil par des boulons traversant, des changements de section, des pièces d'attache créent autant d'amorces de rupture.

La résistance à la traction transversale est l'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. Sa valeur ne vaut guère plus de 5% de la résistance en compression.

c. Résistance au cisaillement

Le cisaillement peut s'exercer soit dans le sens transversal soit dans le sens longitudinal. Le cisaillement longitudinal tend à faire glisser les fibres les unes par rapport aux autres tandis que celui transversal au contraire, tend à sectionner les fibres. La résistance sera donc différente selon le sens d'application de l'effort.

Elle aura une importance capitale 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 à la rupture par fendage parallèlement aux fibres. Le principe de réciprocité des contraintes tangentielles indique que ces plans sont les plus critiques. Elles valent environ 10% de la résistance en compression.

d. Résistance aux chocs

Elle est bonne en général, excepté les espèces très résineuses qu'il faut éviter, entre autres, pour les planches de service et des passerelles où peuvent circuler des ouvriers.

e. Module d'élasticité

Le module d'élasticité d'un matériau est la constante qui lie la variation de l'effort appliqué à la déformation du matériau.

Le module d'élasticité longitudinale est proportionnel à la densité, comme le montre la Figure I.4.

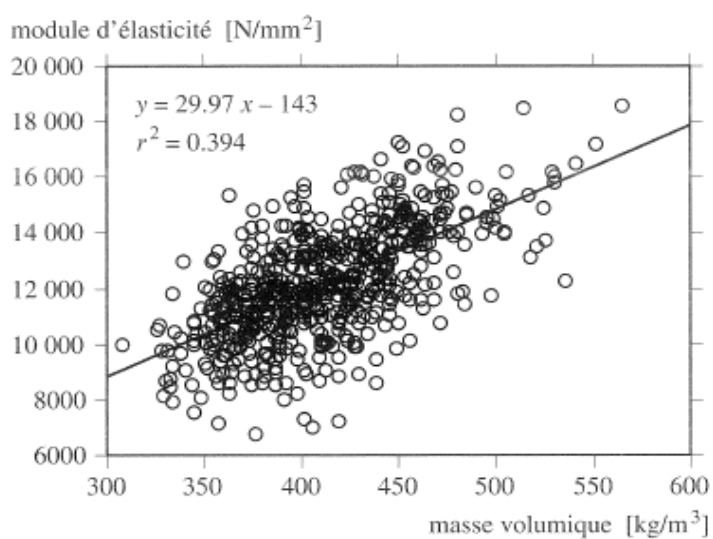


Figure I. 4. Relation entre la densité et le module d'élasticité longitudinale pour de l'épica

Faute d'anisotropie, il est nécessaire de distinguer différents modules d'élasticité et différents coefficients de Poisson ; on peut retenir comme ordre de grandeur :

- 12000 MPa pour le module longitudinal
- 12000 MPa pour le module radial
- 6000 MPa pour le module tangentiel
- $\nu_{0,90} = 0.45$ à 0.50
- $\nu_{0,90} = 0.02$ à 0.08

Ces deux dernières expressions 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 qui n'a que peu d'influence sur l'allongement longitudinal.

f. Flexion statique

Divers facteurs influencent la résistance à la flexion statique. L'arbre sur pied est soumis à d'importants efforts de flexion notamment sous l'action du vent et des tempêtes. Le bois est organisé pour y résister. En pratique un grand nombre de pièces de charpente (poutre, arbres, arbalétriers, pannes, chevrons, solives, etc.) travaillent en flexion statique. Les éléments suivants ont une influence sur la flexion : la portée, la charge, le type de charge, les appuis, l'équarrissage.

g. Flexion dynamique

Dans certains emplois, les pièces de bois sont appelées à supporter non pas, ou pas uniquement de charges permanentes ou progressives, mais également des contraintes instantanées dues à des chocs violents ou à des surcharges brutales. Il est donc nécessaire de bien connaître le comportement du bois en flexion dynamique dans des emplois exigeant une forte résilience et une grande endurance.

Le tableau I.5 donne le module d'élasticité E ainsi que les valeurs moyennes des résistances (en MPa) de quelques essences obtenues par essais (effectués dans le sens longitudinal du bois) en laboratoire sur des échantillons de bois.

Tableau I. 5. Caractéristiques mécaniques de quelques essences.

| Essence | Module d'élasticité | Compression | Traction | Flexion | Cisaillement |
|---------|---------------------|-------------|----------|---------|--------------|
| Épicéa | 11 000 | 43 | 90 | 66 | 6,7 |
| Pins | 12 000 | 47 | 104 | 87 | 10,0 |
| Mélèze | 13 800 | 55 | 107 | 99 | 9,0 |
| Hêtre | 16 000 | 62 | 135 | 105 | 10,0 |
| Chêne | 13 000 | 54 | 90 | 91 | 11,0 |

I.2.4 Propriétés acoustiques

Largement utilisé en architecture, le bois possède des propriétés acoustiques lui permettant d'atténuer ou d'accentuer les sons. Si le bois est depuis longtemps utilisé dans la fabrication des instruments de musique pour ses propriétés de résonance, il a également souvent été choisi pour sa capacité à amortir, voire confiner les ondes sonores.

Le bois est un excellent conducteur du son. Celui-ci s-y propage, dans le sens des fibres, à une vitesse de 9 à 14 fois plus grande que l'air. Cette vitesse peut être comparée à la vitesse de transmission dans les métaux et autres matériaux lourds, le tableau I.6 en donne quelques exemples.

Tableau I. 6. Vitesse du son dans les matériaux

| Vitesse du son dans le bois et dans divers matériaux | | |
|------------------------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------------------|
| Désignation | Densité en g/cm ³ | vitesse du son parallèlement aux fibres (en m/s) |
| Hêtre | 0.7 | 3412 |
| Chêne | 0.65 | 3380 à 4310 |
| Sapin | 0.4 | 5256 |
| Liège | 0.25 | 430 à 530 |
| Plomb | 11.34 | 1320 |
| Fer | 7.85 | 5000 |
| Air | | 330 |

Il doit notamment cette aptitude à sa faible densité et à sa structure alvéolaire constituée de cavités microscopiques organisées en réseau. Celles-ci transforment l'énergie acoustique en chaleur et atténuent ainsi les sons. C'est pourquoi, le bois est présent dans la structure et l'isolation de bon nombre de studios d'enregistrement, salles de concert, gymnases ou restaurants [6].

I.2.5 Propriétés thermiques

- La dilatabilité et la dilatation thermique
- La conductibilité thermique
- La résistance au feu

a. 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} dans le sens perpendiculaire 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 les variations thermiques sont généralement de sens contraire au retrait, on n'en tient pas compte, mais lorsque le bois est mélangé à d'autres matériaux pour former des éléments mixtes, bois-acier par exemple, il peut alors être nécessaire de tenir compte des coefficients de dilatation thermique différents.

b. Dilatabilité

Comme la plupart des corps solides, le bois augmente en dimension et donc en volume lorsque sa température s'élève. Dans la pratique cela peut être négligeable vis-à-vis de la rétractibilité due aux variations de l'humidité des bois.

Les deux phénomènes, en effet, se superposent et se contrarient habituellement. Le coefficient de rétractibilité est différent, qu'il soit selon le sens axial ou le sens transversal. Il peut être 8 à 10 fois plus élevé qu'en sens axial.

Signalons toute fois que les coefficients de dilatabilité de l'acier et celui du plâtre sont au moins 3 à 4 fois plus élevés que celui du bois en sens axial ; c'est pour cette raison qu'en cas d'incendie les charpentes en bois présentent moins de danger que les charpentes métalliques qui exercent une poussée sur les murs et provoquent l'effondrement.

c. Conductibilité thermique

La conductibilité thermique est la caractéristique mesurant le pouvoir conducteur (c'est-à-dire l'aptitude d'un corps à transmettre l'énergie thermique de proche en proche) ou, à l'inverse, le pouvoir isolant de ce corps et la résistance qu'il oppose au transfert thermique de l'énergie.

La conductibilité varie largement avec le pouvoir conducteur du bois, selon l'essence et la densité. La conductibilité augmente rapidement avec l'humidité du bois. Il est, à cet égard, important d'éviter sa réhumidification. La conductibilité thermique est synonyme de conductivité thermique. Elle se note λ , plus la valeur de λ est élevée, plus la chaleur sera conduite rapidement à travers le matériau. Le tableau I.7 présente quelques valeurs de λ .

Tableau I. 7. La conductibilité thermique de quelques matériaux

| Matériaux | λ (W/m.K) |
|------------------------------------------|-------------------|
| Aluminium | 230 |
| Acier | 60 |
| Béton armé | 2.3 |
| Brique de terre cuite pleine | 0.64 |
| Feuillus mi-lourds, résineux très lourds | 0.23 |
| Feuillus légers, résineux mi-lourds | 0.15 |
| Résineux légers, feuillus très légers | 0.12 |
| Isolant ≈ | 0.04 |

d. Résistance au feu

Comme tous les produits organiques, le bois est combustible et inflammable à température assez basse surtout s'il est à l'état fragmenté. On sait qu'il est difficile d'enflammer une grosse bûche, on doit d'abord enflammer du menu bois. Avant de s'enflammer, le bois commence par se dessécher, puis distiller vers 150°C, en émettant des gaz dont le 2/5 sont combustibles.

- **Réaction du bois au feu**

Elle se manifeste par différents phénomènes : pyrogénéation ou distillation, inflammation, propagation des flammes, combustion vive, combustion lente ou incandescence, émission de fumée ou de gaz toxiques.

- **Propagation des flammes**

La progression du feu est beaucoup plus rapide en surface qu'en profondeur. Trois raisons peuvent expliquer cela : le rayonnement, les courants de convection qui étalent la flamme sur le combustible, et le libre contact de l'oxygène de l'air. Cette propagation se fait verticalement, puisque les flammes et l'air chaud s'élèvent.

La carbonisation du bois est quantifiable : 0.7 mm/min, avec cette propriété les pompiers peuvent déterminer le moment où le bâtiment va s'effondrer et orienter donc leurs opérations de secours. Le tableau I.8 donne un classement de bois d'après leur réaction au feu.

Tableau I. 8. Réaction au feu des matériaux

| classement du bois et des dérivés d'après leur réaction au feu | | |
|----------------------------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| | catégories | bois |
| M0 | incombustible | pierre, béton, brique, tuile, |
| M1 | non inflammable | bois et panneaux fortement ignifugés |
| M2 | difficilement inflammable | bois et panneaux normalement ignifugés |
| M3 | moyennement inflammable | Bois durs de plus de 15 mm d'épaisseur |
| M4 | facilement inflammable | En général les bois et les panneaux de moins de 15 mm d'épaisseur |

I.3 CLASSIFICATION ET CLASSEMENT DES BOIS

I.3.1 Classification des bois

Les bois rencontrés sur le marché sont de différentes essences. Il est donc important de pouvoir les classer, c'est à dire pouvoir les identifier sur base des caractéristiques spécifiques de chaque essence. Au cours de l'évolution, le règne des plantes ligneuses formant des arbres s'est divisé en résineux plus anciens, et feuillus plus jeunes et de structure plus complexe.

a. Les résineux

Les résineux ont des feuilles plus persistantes contrairement aux feuillus. L'anatomie des bois résineux (conifères) se distingue dans son principe même de celle des feuillus, apparus plus tard dans l'histoire phylogénétique. Parmi les essences des résineux on distingue : les pins, cyprès, épicéas, sapins, mélèzes, cèdres (classement par ordre de densité croissante)

b. Les feuillus

Les feuillus ont des feuilles caduques. Les fibres, constituant le tissu de soutien, sont de très petits diamètres, possèdent une paroi cellulaire très épaisse et n'ont quasiment plus de lumen (vide à l'intérieur de la cellule). Parmi les essences de feuillus on distingue :

- Les bois très légers (densité 0,4 à 0,5) : le peuplier, le saule, le tilleul,
- Les bois légers (densité 0,5 à 0,65) : l'aulne, le bouleau et le tremble,

- Les bois demi-lourds (densité 0,65 à 0,8) : le charme, le châtaignier, le chêne, l'érable, le frêne, le hêtre, le merisier, le noyer, l'orme, le platane, le poirier
- Les bois lourds (densité 0,8 à 0,95) : le buis, le chêne vert, le cornouiller, le sorbier, ...

I.3.2 Classement des bois

Les propriétés du bois sont optimales pour assurer la survie de l'arbre qui le produit, mais elles présentent de grandes variations en fonction du facteur génétique, des conditions de croissance et d'environnement. Elles ne varient pas seulement entre arbres (variabilité inter-arbre), mais aussi au sein d'un même arbre (variabilité intra-arbre). A cette variabilité naturelle s'ajoute une variabilité induite par les processus de transformation. La résistance à la flexion peut alors varier de manière considérable. Cette variabilité de qualité nécessite donc de classer chaque élément (pièce de bois) afin de positionner le bois comme un matériau fiable ayant des propriétés bien définies. Il existe deux méthodes de classement : le classement visuel et le classement par machine.

a. Classement visuel

La méthode visuelle, comme son nom l'indique, classe les bois en fonction des observations visuelles réalisées par un opérateur. Il s'agit de repérer les défauts à la surface de la pièce pouvant conduire à une diminution de la résistance (nœuds, loupe, . . .), les défauts géométriques sur l'ensemble de la pièce (flaches, voilement) et les potentielles attaques biologiques (champignons, insectes, . . .).

b. Classement par machine

Le classement par machine mesure directement par un essai non-destructif les propriétés mécaniques de la pièce de bois. Il s'agit en général d'un essai de flexion sur 3 points en continu : la pièce de bois circule sur une machine qui opère une légère flexion au travers du rouleau supérieur. Il existe aussi des machines mesurant les propriétés mécaniques par rayon X ou ultrason. Le classement par machine donne directement la classe de résistance du bois, qui correspond à la résistance caractéristique en flexion de la pièce de bois.

Les valeurs caractéristiques sont données pour différentes classes de résistance, notées CXk pour les résineux (Coniferous), DXk pour les feuillus (Deciduous), dans les tableaux suivants indiquant les contraintes admissibles pour les résineux (tableau I.9) et pour les feuillus (tableau I.10), suivant l'Eurocode 5.

Tableau I. 9. Contraintes caractéristiques des bois massifs (résineux)

| Classe | C14 | C16 | C18 | C22 | C24 | C27 | C30 | C35 | C40 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Propriétés de résistance en MPa | | | | | | | | | |
| Flexion | 14 | 16 | 18 | 22 | 24 | 27 | 30 | 35 | 40 |
| Traction axiale | 8 | 10 | 11 | 13 | 14 | 16 | 18 | 21 | 24 |
| Traction perpendiculaire | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,6 | 0,6 | 0,6 |
| Compression axiale | 16 | 17 | 18 | 20 | 21 | 22 | 23 | 23 | 26 |
| Compression perpendiculaire | 2 | 2,2 | 2,2 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 | 2,8 | 2,9 |
| Cisaillement | 1,7 | 1,8 | 2 | 2,4 | 2,5 | 2,8 | 3 | 3,4 | 3,8 |

Tableau I. 10. Contraintes caractéristiques des bois massifs (feuillus)

| Classe | D30 | D35 | D40 | D50 | D60 | D70 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Propriétés de résistance en MPa | | | | | | |
| Flexion | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| Traction axiale | 18 | 21 | 24 | 30 | 36 | 42 |
| Traction perpendiculaire | 0,8 | 0,8 | 0,9 | 1 | 1,1 | 1,4 |
| Compression axiale | 23 | 25 | 26 | 29 | 32 | 34 |
| Compression perpendiculaire | 8 | 8,4 | 8,8 | 9,7 | 10,5 | 13,5 |
| Cisaillement | 3 | 3,4 | 3,8 | 4,6 | 5,3 | 6 |

Ces valeurs moyennes (en MPa) sont obtenues par essais (effectués dans le sens longitudinal du bois) en laboratoire sur des échantillons de bois.

I.4 TRAITEMENT DU BOIS [4]

I.4.1. Séchage du bois

Le bois issu de la coupe de troncs d'arbres n'est pas utilisable directement. Il est débité puis mis à sécher à l'air libre de nombreuses années afin que son eau soit éliminée et que les planches utilisées ne se déforment pas. On distingue le séchage naturel et le séchage artificiel.

a. Séchage naturel

Afin d'éviter que le bois ne subisse des retraits après mise en œuvre, ce qui pourrait entraîner des désordres notamment dans les assemblages, il est indispensable de le sécher avant tout usinage et utilisation en construction.

Ce séchage peut être réalisé naturellement en stockant le bois sous abri, en piles bien ventilées, avec litage entre chaque rangée de planches et à une hauteur suffisante du sol. Cette méthode a l'inconvénient d'immobiliser les stocks de bois pendant plusieurs mois, ce qui représente des frais financiers importants, de plus elle ne permet pas d'atteindre les taux d'hygrométrie exigés pour certaines applications comme les parquets, lamellés collés, etc.

b. Séchage artificiel

Afin de pallier les inconvénients du séchage naturel, des méthodes de séchage artificiel ont été mises au point dans des cellules de séchage à plus ou moins haute température et dont le taux d'humidité de l'air ambiant est parfaitement maîtrisé. La conduite du séchage dépend notamment de l'essence du bois, de sa qualité, de son humidité initiale, de l'épaisseur des pièces. La conduite d'une opération de séchage peut être manuelle, semi-automatique ou automatique, à l'aide des mesures faites sur les caractéristiques de l'air et sur l'humidité du bois, suivies par l'intermédiaire de sondes. Des contrôles réguliers sont nécessaires pour un séchage de qualité. La durée du séchage à l'air chaud climatisé est très variable selon l'essence et l'épaisseur. A titre indicatif, pour amener de 50% à 12% des sciages avivés de 27 mm d'épaisseur, il faut environ 20 jours pour du chêne et seulement 3 jours pour du sapin.

I.4.2 Protection du bois

La désaltération du bois dans son milieu de service est lié soit à la biodégradation, ou soit à la dégradation par le feu.

- la biodégradation ou dégradation biologique: le bois devient une alimentation pour les organismes xylophages qui sont des organismes vivants dont la croissance nécessite la consommation du bois. Ce sont essentiellement des champignons et les insectes ; ou de
- la dégradation par le feu : le bois dans le bâtiment doit pouvoir résister au feu pendant une certaine durée exprimée en minutes.

Pour le pérenniser, un système de préservation doit être appliqué. Il doit pour cela subir des traitements qui le rendent impropre à la consommation pour ses prédateurs ainsi que des traitements ignifuges pour ralentir les phénomènes du feu [5].

La préservation tient compte avant tout de la classe de service du bois en question. Il s'agit de son degré d'exposition aux intempéries, et par là aux risques biologiques (insectes, champignons lignivores ou térébrants marins).

a. Durabilité du bois naturelle [5]

La durabilité du bois exprime son aptitude à durer longtemps, c'est à dire à résister au dépérissement dû à la vétusté ou aux attaques. La durabilité naturelle est la capacité d'un bois de résister à la dégradation de par sa constitution, elle représente sa résistance intrinsèque aux attaques d'organismes destructeurs en absence de tout traitement de préservation.

Celle-ci est fonction du potentiel naturel génétique de l'arbre ; type d'essence, des conditions environnementales de croissance, de la mise en œuvre, des conditions d'exposition, etc. Quand

elle n'atteint pas la durée escomptée, on envisage limiter le risque d'attaque par des insectes ou champignons, ou rendre le bois plus résistant aux organismes biologiques par un traitement adéquat.

b. Traitements de protection du bois

Lorsque la durabilité naturelle est insuffisante par rapport à l'emploi prévu et aux risques associés, on recourt au traitement pour protéger un certain volume de bois.

Les traitements augmentant la durabilité du bois sont de deux sortes [5] :

Préservation du bois : Il s'agit d'introduire dans le tissu ligneux, plus ou moins profondément, un agent répulsif biocide qui va éviter le développement de champignons ou de larves lignivores. La modification du bois consiste à modifier certaines substances constitutives du bois de manière à les rendre inassimilables par les agents biologiques.

I.5 LE BOIS DANS LA CONSTRUCTION

I.5.1 Aperçu [6]

Abondant, peu coûteux, facile à travailler, le bois a de tout temps été le matériau de construction par excellence. Léger, résistant et souple, il convient à de multiples usages d'autant que chaque essence possède ses qualités. Employé par l'homme depuis la nuit des temps. Ses usages comme matériau de construction sont variés : structure porteuse (dont la charpente), façade (panneaux, bardage), menuiseries extérieures, aménagements intérieurs, parements et meubles, revêtements des sols et murs (lambris, parquets), etc.

Le choix de l'essence pour un type de construction se fait sur base des raisons mécaniques, esthétiques, économiques, politique (appel à utiliser le bois local par exemple) et des exigences spécifiques des différents ouvrages. Il faut pouvoir choisir entre une essence ayant une durabilité naturelle suffisamment durable pour la classe de service retenue, et une autre qui demandera des traitements si l'essence à durabilité naturelle présente certaines difficultés comme le prix, l'accessibilité, la durée de service, etc.

Par bois de construction (ou bois d'œuvre), on entend :

- Le bois utilisé pour réaliser des charpentes, fermes, supports de toiture,
- Le bois d'ossature des bâtiments industriels, d'habitation, de loisir et scolaires,
- Le bois de structure des ouvrages d'art (passerelles piétons et cycles notamment).

Le bois n'est pas utilisé pour les ouvrages directement en contact avec le sol (fondations).

I.5.2 Eléments bois utilisés en construction [5]

Le bois est utilisé dans la construction sous diverses formes. On distingue le bois utilisé à l'état naturel : bois massif et les matériaux dérivés du bois.

A. Bois massif

Ici le bois ne subit pas de traitement modifiant sa structure anatomique. Selon le procédé mécanique utilisé, on distingue les matériaux ronds et les bois sciés.

a. Matériaux ronds

Ils sont généralement utilisés pour le transport de l'énergie électrique (longueur = 6,5 à 18 m; épaisseur = 20 à 32 cm) et comme traverses pour les chemins de fer (longueur = 2,7 à 5,4 m; épaisseur = 24 cm). L'humidité ne doit pas dépasser 25% pour les rondins employés pour les éléments portants des maisons et les tabliers des ponts. Pour les pieux et palplanches, elle peut être quelconque.

b. Bois sciés

Le bois utilisé pour le sciage doit être de haute qualité et libre de toutes anomalies. Les bois sciés se subdivisent en :

- planches avec un rapport larg./épais > 2 , 27x100, 27x150 mm,
- bastaings avec le rapport larg./épais > 2 , 63x180, 50x150 mm
- madriers 75x225, 100x225mm,
- poutres 120x120 ou 200x200 mm

Leur rapport poids/résistance les rend particulièrement adaptés à l'utilisation en structure. Sur la figure ci-dessous une représentation des bois sciés tels qu'ils sont obtenus à partir du bois rond (Figure I.5).

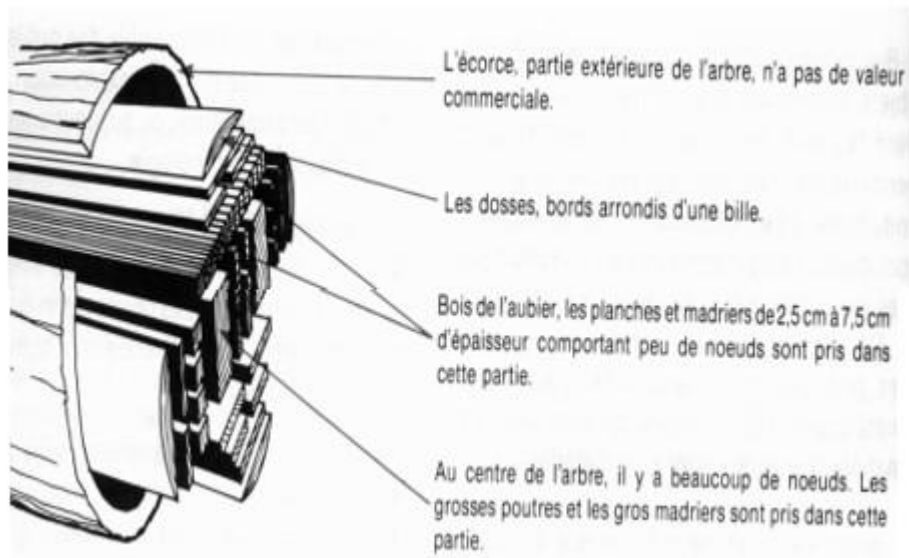


Figure I. 5. Bois sciés

B. Produits dérivés du bois

De nombreux produits à base de bois ont été développés afin de réduire la variabilité intrinsèque du bois massif. Ces produits sont plus fiables (écarts types des caractéristiques mécaniques plus faibles) car plus homogènes et souvent moins anisotropes.

a. Le Bois Lamellé-Collé BLC

Le Bois Lamellé-Collé (BLC) est constitué de lamelles de bois aboutées et collées sur champ. Les lamelles sont généralement réalisées en résineux de classes visuelles ST-I ou ST-II, mais on trouve aussi des BLC réalisés en feuillus. Les lamelles sont des planches d'épaisseur de 19 à 45 mm, collées entre elles et aboutées par des entures (surface de collage augmentée par une liaison en dent de scie, voir Figure I.6). Les dimensions classiques des sections de BLC ont des hauteurs comprises entre 100 et 600 mm et des largeurs de 60 à 240 mm.

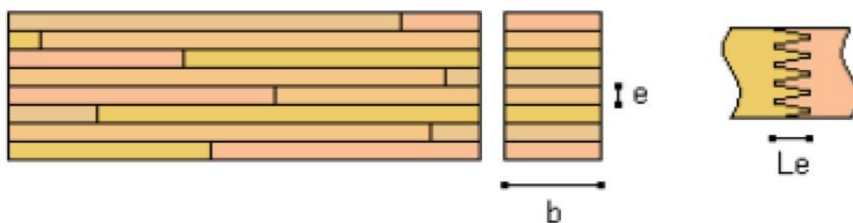


Figure I. 6.. Vue schématique d'une poutre en BLC et détail de l'aboutage par entures de deux lamelles

(D'après document CTBA).

b. Lamibois

Le Lamibois ou LVL (Laminated Veneer Lumber) est composé de placages minces de bois (3 mm) purgés de défauts structurels et collés à chaud sous haute pression. Il se décline en deux types : le Lamibois à plis parallèles et le Lamibois à plis croisés, selon que les placages ont leurs fibres orientées dans la même direction ou alternées à 90°. Deux plis dans le même plan sont aboutés par scarfage (coupe et collage des bords en sifflets allongés). On trouve le lamibois sous la forme de plateau de $1.80 \times 18 \text{ m}^2$ en épaisseur de 25 à 75 mm.

c. Panneaux dérivés du bois

Il existe plusieurs types de panneaux dérivés du bois (contreplaqués, particules de bois, OSB, . . .). Le plus utilisé dans la construction est le panneau OSB (Oriented Strand Board ou panneau de lamelles orientées), constitué de lamelles orientées de bois résineux, disposées en 3 couches croisées. Ces panneaux, connus sous les dénominations Triply R, Laméply R et Isoply R, sont très utilisés pour le contreventement, les caissons de planchers ou de toitures.

On trouve ces panneaux en épaisseur de 6 à 22 mm, de largeur 1.20 à 2.50 m et longueur de 2.50 à 5.00 m. Du fait que le panneau OSB est constitué de 3 couches croisées de lamelles orientées, le rapport d'anisotropie entre les directions parallèle et perpendiculaire au grand côté du panneau est proche de 2 (soit bien inférieur à celui du BM entre directions axiale et transversale). Quatre types de panneaux peuvent se rencontrer :

- OSB 1 : panneau pour usage général en milieu sec
- OSB 2 : panneau travaillant utilisé en milieu sec
- OSB 3 : panneau travaillant utilisé en milieu humide
- OSB 4 : panneau travaillant sous contraintes élevées en milieu humide

d. Bois Contrecollé : Xlam

Le bois contrecollé consiste en des panneaux de grandes dimensions assemblés à partir de planches en bois massif empilées en couches croisées à 90° et collées entre elles sur toute leur surface. L'épaisseur des planches est en générale comprise entre 17 et 40 mm. Ces panneaux sont destinés à la réalisation de planchers, de murs porteurs et de support de couverture. Le procédé du bois contrecollé est fortement industrialisé, après fabrication, les panneaux sont découpés en fonction de leur destination dans la structure (découpe des portes, fenêtre, etc.). Seul l'assemblage final est réalisé sur chantier à l'aide de connecteurs métalliques.

I.6 CONSTRUCTION EN BOIS ET ENVIRONNEMENT

Du point de vue écologie, le bois est un matériau merveilleux à nombreux titres, c'est un matériau idéal pour construire de manière éco-responsable : ressource naturelle et renouvelable dont l'énergie grise est très faible, ressource souvent locale, recyclable facilement, avec peu d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre. Le bois est « la » solution pour réduire l'empreinte carbone de la construction et préserver les ressources de la planète [4].

L'utilisation du bois dans les projets de construction contribue à la lutte contre les changements climatiques en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. En effet, construire en bois permet de stocker du CO₂ pendant toute la durée de vie de la construction (1m³ de bois utilisé dans une construction permet de réduire une tonne de CO₂ de l'impact de la construction en termes de gaz à effet de serre). De plus, la fabrication du bois de construction requiert moins d'énergie et est moins polluante que celle d'autres matériaux. A titre de comparaison, transformer une tonne de bois d'arbre pour faire du bois de construction nécessite $\approx 1\text{MJ}$, tandis qu'il faut $\approx 4\text{MJ}$ pour produire une tonne de béton et $\approx 60\text{MJ}$ pour une tonne d'acier. Qui plus est, pour une même portée, une poutre en bois sera plus légère qu'une poutre en BA ou en même en acier, augmentant d'autant plus l'avantage du bois en termes d'énergie grise.

C'est dans ce sens que l'on encourage l'utilisation des panneaux de bois lamellé-croisé, une variante du lamellé-collé. Ce système constructif permet de produire des composants aussi résistants, mais plus légers, que le béton. En raison des multiples avantages qu'ils offrent, les panneaux de bois lamellé-croisé révolutionnent la conception et l'exécution en matière de construction résidentielle. En plus d'être écologiques, les panneaux, qui sont préfabriqués, permettent de réduire le temps de construction. Ils assurent l'efficacité thermique et acoustique des bâtiments et les dotent d'une bonne résistance au feu et aux secousses sismiques.

I.7. NOTION D'ISOLATION THERMIQUE

Principes

L'isolation se divise en deux branches principales : l'isolation thermique d'une part, la plus lourde et la plus importante, qui vise à la conservation d'une température plus au moins constante à l'intérieur de l'habitation, et d'autre part l'isolation acoustique, qui vise à atténuer la propagation des sons dans la maison, souvent l'objet de travaux plus légers.

I.7.1 L'isolation thermique par l'intérieur [7].

L'isolation thermique par l'intérieur consiste à renforcer par l'intérieur, c'est-à-dire du côté de la partie habitable, la résistance thermique des murs extérieurs (façade), des planchers ou des cloisons séparant les volumes chauffés des espaces non chauffés, des sous-faces horizontales ou inclinées des charpentes de couverture ainsi que des pieds droits des combles aménagés.

L'isolation thermique par l'intérieur des bâtiments existants est particulièrement pertinente :

- Lorsque l'aspect extérieur des façades ne peut pas ou ne doit pas être modifié.
- Lorsque les revêtements intérieurs nécessitent d'être rénovés ou le volume habitable restructuré.

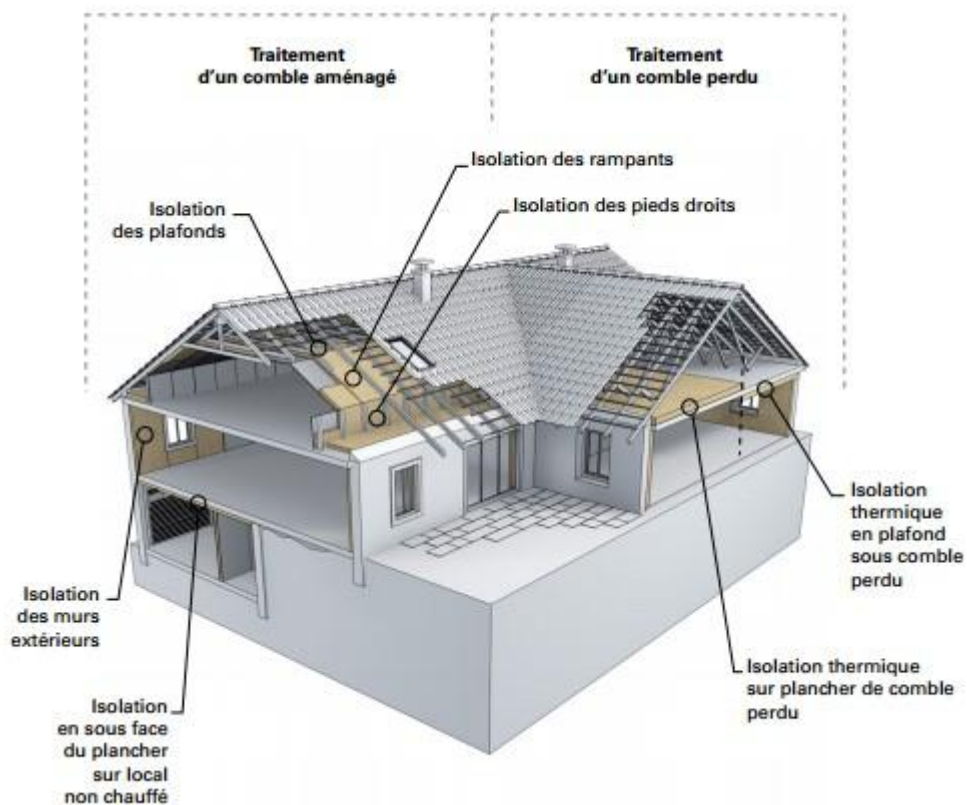


Figure I. 7. Vue d'une isolation intérieure

Les parois non isolées appelées « parois froides » ainsi que la couverture et les sols sont à l'origine de la plus grande part des pertitions de chaleur. Toutefois, il ne faut pas négliger le phénomène des ponts thermiques qui sont constitués dès que la barrière isolante est rompue, soit concrètement dès qu'il y a discontinuité entre les matériaux ou entre les parois de structure, donc aux jointures entre les différentes parois.

I.7.2. Les principaux isolants utilisés [8].

La liste des principaux isolants utilisés est la suivante :

- Laine minérale de verre ou de roche sous forme des panneaux, rouleaux, souple, semi-rigides, revêtus ou non de surfaçage.
- Mousse de plastique alvéolaire (mousse de polystyrène expansé, mousse de polystyrène extrudé, mousse de polyuréthane, polyisocyanurate...) sous forme de panneaux rigides ;
- Produits d'origine végétale (à base de fibres de cellulose, de chanvre, de lin, de coton, de bois, etc.) ou animale (à base de poils, plumes, fourures) issus en majorité de filières de recyclage ou de filières dédiées. Ils se présentent sous forme de panneaux rigides, semi-rigides ou de rouleaux revêtus ou non de surfaçage.

Tableau I. 11. Conductibilité thermique des matériaux isolants.

| Type d'isolant | Performance thermique (λ) |
|---------------------|-------------------------------------|
| Laine de verre | 0,030 à 0,040 |
| Laine de roche | 0,034 à 0,040 |
| Laine de chanvre | 0,041 à 0,044 |
| Polystyrène PSE | 0,030 à 0,038 |
| Polystyrène XPS | 0,029 à 0,035 |
| Plume de canard | 0,040 à 0,042 |
| Polyuréthane | 0,021 à 0,028 |
| Laine de bois | 0,038 à 0,060 |
| Laine de mouton | 0,039 à 0,042 |
| Laine de lin | 0,037 à 0,041 |
| Ouate de cellulose | 0,038 à 0,040 |
| Laine de coton | 0,039 à 0,042 |
| Textiles recyclés | 0,039 à 0,042 |
| Verre cellulaire | 0,042 à 0,050 |
| Isolant mince (PMR) | selon nature et nombre de couches |

I.7 CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce premier chapitre, il a été question de présenter le matériau bois en considérant son origine, ses différentes propriétés ainsi que les diverses formes sous lesquelles il est employé en construction. Nous avons aussi présenté quelques notions sur les isolations thermiques en présentant quelques isolants sous leurs formes et leurs conductibilité thermique.

CHAPITRE II. NORMES DE CONCEPTION, METHODES DE DIMENSIONNEMENT ET MISE EN PLACE DE L'ISOLANT

Pour ce chapitre il est question de présenter la méthodologie à suivre en vue de faire la conception de l'ouvrage selon les normes d'architecture d'après Neurfert. Mais aussi faire les dimensionnements des éléments structuraux de l'ouvrage notamment les colonnes, les poutres et les assemblages. Néanmoins a présenté un aperçu sommaire de la norme de dimensionnement, à savoir Eurocodes 5.

II.1. Normes d'architecture, normes techniques

Plusieurs facteurs entrent en jeu afin de répondre aux normes d'architecture d'une structure. Pour le cas de ce travail, c'est un bâtiment d'habitation de taille moyenne destiné au logement d'une famille divisée en plusieurs pièces.

II.1.1 Localisation

Le terrain le plus préférable doit être :

- Bien nivelé, bien drainé,
- Proche des réseaux (accès aux routes secondaires et autres services) et proche d'un accès à l'eau existant et utilisable,
- Bénéficiant d'un réseau d'assainissement,

II.1.2 Dimension des pièces

La surface choisie de chaque pièce devra être entre la surface minimale et la surface confortable d'après NEUFERT [9]

Tableau II. 1. Valeur des surfaces des pièces

| Nomination | Surface min. (m ²) | Surface conf. (m ²) | Surface choisi. (m ²) |
|----------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Séjour | 20 | 36 | 20 |
| Terrasse salon | - | - | 8 |
| Cuisine | 6 | 15 | 8,75 |
| Chambre parent | 9 | 16 | 10,5 |
| Chambre enfant | 8 | 12 | 10,5 |
| Couloir | - | - | 6 |
| Toilette | 3 | 5 | 3 |

II.2. Aperçu sommaire de la norme : Eurocodes 5.

Les Eurocodes permettent les échanges entre les pays européens et harmonisent les méthodes de calcul de structure. Les sous-parties de l'Eurocodes 5 sont les suivantes : Règles communes et règles pour les bâtiments ; Règles de calcul au feu ; Règles applicables au pont.

Les sections importantes de la partie relative aux règles communes et règles pour les bâtiments sont :

Section 3 : Propriétés des matériaux

Section 6 : États limites ultimes (ELU)

Section 7 : États limites de service (ELS)

Section 8 : Assemblages par organes métalliques

L'Eurocode 5 ne suffit pas pour conduire un calcul de structure en bois. D'autres normes européennes définissent de nombreuses données nécessaires qui complètent cette dernière. Comme exemple, les valeurs des résistances caractéristiques pour le bois massif sont données dans la norme EN 338.

L'Eurocode 5 utilise certaines notations pour spécifier les variables utilisées dans un calcul :

On note f une résistance, τ et σ les contraintes tangentielle et normale engendrées par les sollicitations, m la flexion, c la compression, t la traction, v le cisaillement, θ l'orientation de la sollicitation par rapport au fil avec α l'angle compris entre 0° et 90° , k une valeur caractéristique, d une valeur de calcul, $f_{m,k}$ la valeur caractéristique de la contrainte de la rupture en flexion et $f_{t,o,d}$ la valeur de calcul de la contrainte de rupture en traction parallèlement au fil du bois

II.3. CONCEPTS DE DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement consiste à attribuer à la structure porteuse les dimensions nécessaires pour adapter et compléter les détails de conception et de construction. Il s'agit de déterminer les sections des différents éléments de la structure : poutre, poteaux, semelles des fondations, etc. Il constitue une des mesures appropriées pour garantir l'aptitude au service et

la sécurité structurale qui découlent de l'analyse des états d'utilisation et des situations de risque. C'est l'étape cruciale d'un projet de construction. Il dépend généralement des matériaux de construction et des charges agissant sur la structure [10].

Il est effectué pour les « états limites » de service (ELS) et ultime (ELU) appropriés. Il permet, au moyen des vérifications de l'aptitude au service et la sécurité structurale, de fixer les dimensions des éléments porteurs en comparant, par exemple, les effets des actions aux flèches admissibles ou aux résistances des éléments porteurs.

Chaque matériau possède des méthodes des calculs retrouvés sous forme des normes ou abaques. La structure étant en bois, nous avons opté pour les méthodes de calcul basé sur la norme Eurocode 5 et la norme française Neige et Vent (NV56).

Le principe est basé sur différentes étapes à suivre dont le pré dimensionnement, la descente des charges et enfin le dimensionnement proprement dit.

II.3.1 Le Prédimensionnement

Il s'agit d'une première étape, il consiste à déterminer les différentes sections des éléments de la structure en considérant seulement la distance entre les éléments. Le pré dimensionnement est grossier et ne peut être maintenu que pour les bâtiments à un niveau. Pour ceux à plusieurs niveaux il faut bien tenir compte de la descente des charges pour approuver les dimensions des éléments.

II.3.2 La Descente Des Charges

Après le pré dimensionnement vient la descente des charges. Celle-ci permettra de passer au dimensionnement proprement dit. La descente des charges est aussi définie selon chaque norme et considère trois grandes catégories des charges ou actions, celles-ci étant classées ici d'après leur variation dans le temps [10].

- Les actions permanentes sur la structure notées G : il s'agit du poids propre des éléments de la structure. Parmi ces charges permanentes on inclue aussi le poids propre des équipements.
- Les actions variables notées Q : ce sont les charges d'exploitation notamment les charges dues aux usagers, meubles et autres, ainsi que les charges climatiques de neige et de vent.

- Les actions accidentelles : explosions, chocs, incendies, ainsi que les actions sismiques.

Notons que seules les charges permanentes et les charges d'exploitation seront prises en compte dans le dimensionnement. Les valeurs des charges permanentes, ou précisément le poids propre des éléments de la structure, dépendent essentiellement du poids volumique des matériaux de construction. Les masses volumiques de différentes espèces de bois à prendre en compte pour la détermination des actions permanentes. Les valeurs des charges d'exploitation sont fonction de l'usage du bâtiment. L'Eurocode5 classe 9 catégories de bâtiments selon leur usage tels que résumés dans le tableau II.1.

Tableau II. 2. Valeurs des charges d'exploitation en fonction de l'usage du bâtiment[11]

| Catégorie | q_k (kN/m ²) | Q_k (kN) |
|----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------|
| A Logements | | |
| Plancher | 1,5 | 2 |
| Balcon | 2,5 | 2 |
| Escalier | 3,5 | 2 |
| B Bureaux | | |
| Bureaux | 2,5 | 4 |
| C Locaux publics | | |
| C1 Locaux avec tables (écoles, restaurants...) | 2,5 | 3 |
| C2 Locaux avec sièges fixes (théâtres, cinémas...) | 4 | 4 |
| C3 Locaux sans obstacles à la circulation (musées, salles d'exposition) | 4 | 4 |
| C4 Locaux pour activités physiques (dancings, salles de gymnastique...) | 5 | 7 |
| C5 Locaux susceptibles d'être surpeuplés (salles de concert, terrasses...) | 5 | 4,5 |
| D Commerces | | |
| D1 Commerces de détails courants | 5 | 5 |
| D2 Grands magasins | 5 | 7 |
| E Aires de stockage et locaux industriels | | |
| E1 Surfaces de stockage (entrepôts, bibliothèques...) | 7,5 | 7 |
| E2 Usage industriel | Cf. CCTP | |
| H Toitures | | |
| Si pente ≤ 15 % + étanchéité | 0,8* | 1,5 |
| Autres toitures | 0 | 1,5 |
| I Toitures accessibles | | |
| Pour les usages des catégories A à D | Charges identiques à la catégorie de l'usage | |
| Si aménagement paysager | ≥ 3 | |

II.3.3 Le Dimensionnement

Le dimensionnement sous-entend la détermination des dimensions définitives de différents éléments constituant la structure et la vérification de différentes sections afin que la structure soit stable et résistante aux charges qui lui sont appliquées. Le dimensionnement proprement dit passe par différentes étapes :

- Détermination des contraintes (σ) et efforts intérieurs (effort normaux, cisaillement, torsion, etc.) par différentes méthodes de calculs de structures et de résistance de matériaux.
- Détermination de la contrainte admissible σ_{adm} , en fonction des caractéristiques physique du matériau (bois, béton, etc.)
- Comparaison entre la contrainte admissible et la contrainte imposée à la structure :
Si $\sigma_{adm} \geq \sigma$, on garde les valeurs prises lors du pré dimensionnement, sinon on augmente les valeurs des dimensions prises précédemment de manière à vérifier cette relation ci-haut après une ou plusieurs itérations.

Pour ce travail, nous allons considérer, après évaluation des charges, les poteaux, les poutres, les fermes et les pannes pour le dimensionnement. Pour chaque catégorie nous prendrons en compte l'élément le plus chargé pour le dimensionner et par la suite étendre ses dimensions aux autres éléments moins chargés. Les sections convenables obtenues seront présentées dans le chapitre des résultats avec des notes de calculs explicitant leur détermination.

a. Détermination des contraintes et efforts intérieurs

La détermination des contraintes et efforts intérieurs va permettre de vérifier la sollicitation subie par chacune des barres. Pour cette fin, plusieurs méthodes sont envisageables selon que la structure à étudier est isostatique ou hyperstatique (dans ce travail il s'agira des portiques constituant l'ossature). Parmi ces méthodes on peut citer :

- Méthode analytique des nœuds
- Méthode de Ritter
- Méthode graphique ou méthode de Cremona
- Méthode de forces ou méthode des coupures
- Méthode des déplacements
- Méthode de Cross

Pour ce travail on a utilisé la méthode analytique des nœuds, la section du bois se calcule suivant la nature de l'effort qui la sollicite :

Pour une pièce soumise à la traction, la section se calcule nette, après la déduction du trou de boulon. Pour une pièce soumise à la compression la règle précédente reste valable, mais en plus, apparaît le phénomène de flambement selon l'élancement de la pièce.

b. Détermination de la contrainte admissible σ_{adm}

La contrainte admissible est la contrainte lors de la rupture divisée par un coefficient de sécurité.

Dans le cas où les essais précis ne peuvent être exécutés, les valeurs des contraintes de base et des contraintes admissibles sont déterminées forfaitairement à partir des contraintes de rupture du bois suivant chaque mode de sollicitation. Les contraintes admissibles sont déduites des contraintes de base par application de coefficients de réduction tenant compte de l'importance des défauts que présente le bois naturel. Ces coefficients varient en fonction des sollicitations pour tenir compte du caractère anisotrope du bois.

Dans de nombreux pays d'Afrique, il n'existe pas de classification des bois en catégorie. Le bois utilisé est de qualité aléatoire et d'origine souvent inconnue.

En conséquence, pour garantir la sécurité et prévenir tout risque de ruine, les contraintes admissibles sont déterminées par application de coefficient de sécurité sur les contraintes de base. Les valeurs de ces coefficients sont données en fonction de chaque sollicitation et selon la nature du bois (bois dur, ou bois tendre). Le tableau II.2 en donne quelques exemples [11].

Tableau II. 3. Coefficients de sécurité pour la détermination des contraintes admissibles des bois durs et tendres

| | Coefficient de sécurité | |
|-----------------------------------------|-------------------------|-------------|
| | BOIS DUR | BOIS TENDRE |
| Compression axiale | 1,90 | 2,25 |
| Traction axiale | 4,40 | 4,20 |
| Flexion statique | 3,50 | 2,30 |
| Cisaillement longitudinal | 2,10 | 2,00 |
| Traction transversale sans cisaillement | 1,50 | 1,70 |
| Compression transversale | 1,25 | 1,37 |
| Fendage | 1,50 | 1,70 |

b. Comparaison entre la contrainte admissible et la contrainte imposée à la structure

Les contraintes et efforts intérieurs imposés à la structure sont déterminés pour permettre de dimensionner les éléments afin qu'ils résistent aux sollicitations.

D'après Eurocode5, en l'ELU, il faut vérifier la relation II.1 c'est-à-dire vérifier si les sollicitations de calculs σ_d restent inférieures aux résistances de calcul f_d d'après la formule (II.1)

$$\sigma_d \leq f_d \quad (\text{II.1})$$

En ELS, il faut vérifier que la valeur de calcul de l'effet des actions E_d reste inférieure à une valeur prescrite à ne pas dépasser C_d , d'après la formule (II.2)

$$E_d \leq C_d \quad (\text{II.2})$$

En général, cette comparaison porte sur le déplacement maximal d'un élément (flèche), et E_d correspond donc à la flèche obtenue sous l'effet des actions. Pour chaque sollicitation, ces critères prennent des formes légèrement différentes (coefficients propres à chaque type de sollicitation), qui sont présentées ci-après :

d. Vérification des sections de bois à l'ELU [9]

Il convient ici de signaler que les formules qui suivent sont données pour des poutres droites à inertie constante.

1. Traction axiale

La traction axiale correspond à un effort normal $N_u > 0$ orienté selon le fil du bois. Les éléments soumis à la traction axiale sont les entrants, les éléments de contreventement, les membrures inférieures de poutre composite, etc.

On vérifiera la relation II.3

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} \leq 1 \quad (\text{II.3})$$

Avec

$\sigma_{t,0,d}$: la contrainte de calcul due à l'effort de traction, donnée par la relation II.4

$$\sigma_{t,0,d} = \frac{N_u}{A} \quad (\text{II.4})$$

A étant la section de l'élément sollicité.

$f_{t,0,d}$: La résistance de calcul à la traction axiale.

2. Compression

→ Compression axiale

La compression axiale correspond à un effort normal $N_u < 0$ orienté selon le fil du bois. Pour les pièces élancées, il faut prendre en compte le risque de flambement. Les poteaux, les montants de maison ossature bois, les éléments de contreventement sont des éléments qui peuvent être soumis à la compression axiale.

On s'assurera que la relation II.5 est vérifiée

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c \cdot f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (\text{II.5})$$

Avec

$\sigma_{c,0,d}$: la contrainte de calcul due à l'effort de compression et donnée par la relation II.6

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_u}{A} \quad (\text{II.6})$$

A étant la section de la pièce sollicitée en compression

$f_{c,0,d}$: est la résistance de calcul à la compression axiale

$k_c = \min(k_{c,y}; k_{c,z})$: le coefficient de flambement le plus défavorable. Le coefficient de flambement est ≤ 1 et vient pénaliser les éléments dont l'élancement est important.

→ Compression transversale

La compression transversale se produit lorsqu'une pièce de bois subit une action perpendiculaire aux fibres. C'est le cas au niveau des appuis pour une poutre. Pour y remédier on doit s'assurer que la relation II.7 est vérifiée.

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} \leq 1 \quad (\text{II.7})$$

Avec

$\sigma_{c,90,d}$: la contrainte de calcul due à l'effort de compression transverse aux fibres donnée par la relation II.8

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F}{b \cdot l} \quad (\text{II.8})$$

F étant l'effort de compression, b la largeur de l'élément et l sa longueur

$f_{c,90,d}$: La résistance de calcul à la compression transverse

→ **Compression oblique**

C'est le cas d'une pièce soumise à un effort de compression incliné par rapport aux fibres, comme dans certains assemblages où les éléments ne sont pas perpendiculaires les uns par rapport aux autres. On doit vérifier la relation II.9.

$$\frac{\sigma_{c,\alpha,d}}{f_{c,\alpha,d}} \leq 1 \quad (\text{II.9})$$

Avec

$\sigma_{c,\alpha,d}$: la contrainte de calcul due à l'effort de compression incliné de α par rapport aux fibres du bois et obtenue par la relation II.10

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{F}{b.l} \quad (\text{II.10})$$

$f_{c,\alpha,d}$: la résistance de calcul à la compression

3. Flexion simple

La flexion simple concerne de nombreuses pièces : solives, poutres et tous les autres éléments soumis à un chargement perpendiculaire à la fibre neutre. On parle de flexion simple lorsque l'élément n'est soumis qu'à de la flexion dans un seul plan et que l'effort normal est nul. C'est souvent le critère de déformation qui est dimensionnant.

On vérifiera la relation II.11

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{II.11})$$

Avec

$\sigma_{m,d}$: la contrainte de flexion maximale, obtenue par la relation II.12

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_u}{I_{Gzz}/v} \quad (\text{II.12})$$

Où M_u est le moment de flexion ultime, I_{Gzz} le moment quadratique de la section et v la distance entre l'axe neutre et les bords supérieur et inférieur de la section.

$f_{m,d}$: la résistance de calcul à la flexion,

k_{crit} : le coefficient d'instabilité de déversement qui prend en compte le risque de déversement de la poutre. Dans le cas où le déplacement latéral de la face comprimée est bloqué, le risque de déversement est évité et $k_{crit} = 1$. Dans les autres cas, on détermine k_{crit} en fonction de l'élanement relatif en flexion.

4. Cisaillement

Pour une poutre fléchie, il faut vérifier au droit des appuis que la contrainte tangentielle de calcul $\tau_{v,d}$ due à l'effort tranchant ultime V_u respecte la condition de la relation II.13

$$\frac{\tau_{v,d}}{k_v \cdot f_{v,d}} \leq 1 \quad (\text{II.13})$$

Avec

$\tau_{v,d}$: la contrainte de cisaillement de calcul obtenue par la relation II.14

$$\tau_{v,d} = \frac{V_u \cdot m_{Gz}}{I_{Gzz} \cdot b} \quad (\text{II.14})$$

Où m_{Gz} et I_{Gzz} sont respectivement les moments statique et quadratique de la section

$f_{v,d}$: la résistance de calcul au cisaillement

$k_v \leq 1$: le coefficient d'entaillage qui prend en compte l'affaiblissement des sections d'appui lorsque celles-ci sont entaillées. Il n'est à prendre en compte que lorsque la section est entaillée dans la zone tendue de la poutre au niveau de l'appui.

5. Sollicitations composées

Les sollicitations composées résultent de la superposition de sollicitations simples. Une pièce soumise à de la flexion composée supportera de la flexion et de la traction ou de la flexion et de la compression. Lorsque la pièce est fléchie dans ses deux plans principaux (hauteur et épaisseur), on observe de la flexion déviée et lorsqu'elle supporte l'ensemble de ces sollicitations, on parle de flexion composée déviée.

→ **Flexion composée** [12]

Un élément est soumis à de la flexion composée lorsque le moment fléchissant et l'effort normal coexistent c'est-à-dire $M_u \neq 0$ et $N_u \neq 0$). On distingue la flexion avec traction, qui peut se produire dans les chevrons-arbalétriers fixés sur la panne faîtière, de la flexion

avec compression, qui elle se produit dans ces mêmes éléments mais s'ils sont fixés sur la panne sablière.

Dans le cas de la **flexion avec traction**, on vérifiera la relation II.15

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{II.15})$$

L'expérimentation montre un effet positif de l'interaction entre la compression et la flexion tant que le risque de flambement est faible.

Dans le cas de la **flexion avec compression**, on vérifiera donc :

- S'il n'y a pas de risque de flambement, la relation II.16

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{II.16})$$

- S'il y a risque de flambement, la relation II.17

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{II.17})$$

Avec $k_{c,z}$ défini dans la Section 4.2.1 et k_{crit} dans la Section 4.3.

→ Flexion déviée

La flexion déviée correspond à l'existence simultanée des deux moments de flexion M_{u_y} et M_{u_z} dans l'élément. C'est par exemple le cas des pannes posées à dévers lorsque les chevrons n'empêchent pas leur flexion selon l'axe faible.

Dans ce cas, on s'assurera que la relation II.18 est vérifiée.

$$\mathbf{Min} \left[\frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} ; k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \right] \leq 1 \quad (\text{II.18})$$

Où k_m est le coefficient de redistribution des contraintes maximales, qui vaut 1 sauf pour les sections rectangulaires en BM, BLC et LVL où il vaut $k_m = 0,7$. La pièce étant déjà déversée, le coefficient k_{crit} de déversement latéral n'est pas à prendre en compte. Les contraintes normales induites par la flexion sont données par la relation II.19.

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_{u_z}}{I_{Gzz}/v_z} \text{ et } \sigma_{m,y,d} = \frac{M_{u_y}}{I_{Gyy}/v_y} \quad (\text{II.19})$$

Où pour une section rectangulaire $b \times h$, on a $I_{Gzz} = bh^3/12$, $I_{Gyy} = b^3h/12$; $v_z = h/2$ et $v_y = b/2$.

e. Vérification des sections de bois à l'ELS

Nous nous limiterons ici à la vérification des flèches des poutres droites à inertie constante simplement fléchies.

1. Différentes composantes de la flèche

L'eurocode5 définit les composantes suivantes pour la flèche :

- w_{inst} est la flèche instantanée sous l'effet des charges de poids propre et des charges variables due aux déformations élastiques seules.
- $w_{inst, G}$ est la flèche instantanée sous l'effet des seules charges de poids propre.
- $w_{inst, Q}$ est la flèche instantanée sous l'effet des charges variables uniquement.
- w_{creep} est la flèche différée due au fluage pour l'ensemble des charges.
- w_c est la contreflèche si elle existe.
- $w_{fin} = w_{inst} + w_{creep}$ est la flèche finale, sans tenir compte de la contreflèche.
- $w_{net,fin} = w_{fin} - w_c$ est la flèche nette finale prenant en compte une éventuelle contreflèche.

2. Calcul pratique de la flèche

Pour le calcul de la flèche, on utilise toujours le module d'élasticité moyen $E_{0,mean}$. Contrairement aux matériaux béton et acier, du fait de la faible rigidité en cisaillement du bois (valeur du module d'élasticité en cisaillement faible par rapport au module d'élasticité axial, avec $E_{0,mean}/G_{mean} \approx 16$), la flèche due aux déformations de cisaillement ne peut pas être négligée devant celle induite par les déformations de flexion. La flèche due au cisaillement peut facilement représenter 10 à 15% de la flèche totale.

D'une manière générale, on calculera la flèche par intégration de l'équation II.20 :

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M_z(x)}{E_{0,mean} \cdot I_{Gzz}} + \frac{p(x)}{G_{mean} \cdot A_y} \quad (\text{II.20})$$

Avec

I_{Gzz} : le moment quadratique

A_y : la section réduite définie à partir du moment statique m_{Gz} par la relation II.21

$$A_y = \text{Min} \left[\frac{I_{Gzz} \cdot b(y)}{m_{Gz}(y)} \right] \quad (\text{II.21})$$

Pour une section rectangulaire $b \times h$, on a $A_y = 2b \cdot h/3$ et pour une section circulaire de rayon R , $A_y = 3\pi R^2/4$

3. Valeurs de calcul des flèches

Les vérifications portent sur la flèche instantanée due aux seules charges variables $w_{inst, Q}$, la flèche nette finale $w_{net, fin}$ et la flèche finale w_{fin} .

Ces différentes flèches sont toutes évaluées à partir des flèches instantanées pour les différentes charges. On note $w_{inst, G}$ la flèche instantanée due aux charges permanentes et w_{inst, Q_j} la flèche instantanée due à la charge variable Q_j .

La flèche instantanée due aux actions variables seules $w_{inst, Q}$ vaut :

$$w_{inst, Q} = w_{inst, Q_1} + \sum_{j>1} [w_{inst, Q_j} \Psi_{0,j}] \quad (\text{II.22})$$

Où Q_1 est la charge variable dominante et les Q_j ($j > 1$) les charges variables d'accompagnement à leur valeur de combinaison ($\Psi_{0,j} Q_j$).

La flèche finale w_{fin} est calculée de la façon suivante :

$$w_{fin} = w_{inst, G} (1 + k_{def}) + w_{inst, Q_1} (1 + \Psi_{2,1} \cdot k_{def}) + \sum_{j>1} [w_{inst, Q_j} (\Psi_{0,j} + \Psi_{2,j} \cdot k_{def})] \quad (\text{II.23})$$

Où pour le fluage on utilise la valeur quasi-permanente des charges variables (coefficients Ψ_2) pondérée par le coefficient k_{def} .

La flèche nette finale vaut :

$$w_{net, fin} = w_{fin} - w_c \quad (\text{II.24})$$

Où w_{fin} est donnée par la formule (II.23), w_c étant la contreflèche.

Les valeurs des coefficients Ψ_i sont données dans le tableau II.3 et sont réparties suivant leurs catégories telles que précisées dans le tableau II.1 [10]

Tableau II. 4. Valeurs des coefficients Ψ pour les bâtiments

| Action | ψ_0 | ψ_1 | ψ_2 |
|--------------------------------------------------|----------|----------|----------|
| Charges d'exploitation des bâtiments | | | |
| - Catégorie A | 0.7 | 0.5 | 0.3 |
| - Catégorie B | 0.7 | 0.5 | 0.3 |
| - Catégorie C | 0.7 | 0.7 | 0.6 |
| - Catégorie D | 0.7 | 0.7 | 0.6 |
| - Catégorie E | 1.0 | 0.9 | 0.8 |
| Charges dues à la circulation dans les bâtiments | | | |
| - Catégorie F | 0.7 | 0.7 | 0.6 |
| - Catégorie G | 0.7 | 0.5 | 0.3 |
| - Catégorie H | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Charges dues à la neige | | | |
| - si $h < 1000m$ | 0.5 | 0.2 | 0.0 |
| - si $h > 1000m$ (et St-Pierre et Miquelon) | 0.7 | 0.5 | 0.2 |
| Charges dues au vent | 0.6 | 0.2 | 0.0 |

4. Valeurs limites des flèches

Les valeurs limites sont données dans le Tableau II.4. Lorsqu'il n'y a pas de contreflèche $w_c = 0$, on a $w_{net,fin} = w_{net}$ et il convient alors de vérifier la valeur limite la plus défavorable, c'est-à-dire celle donnée pour $w_{net,fin}$.

Tableau II. 5. Valeurs limites pour les flèches [9]

| | Bâtiments courants | | | Bâtiments agricoles et similaires | | |
|----------------------|--------------------|---------------|-----------|-----------------------------------|---------------|-----------|
| | $w_{inst,Q}$ | $w_{net,fin}$ | w_{fin} | $w_{inst,Q}$ | $w_{net,fin}$ | w_{fin} |
| Chevrons | - | $l/150$ | $l/125$ | - | $l/150$ | $l/100$ |
| Éléments structuraux | $l/300$ | $l/200$ | $l/125$ | $l/200$ | $l/150$ | $l/100$ |

Pour les panneaux de planchers ou supports de toiture, on vérifiera $w_{net,fin} \leq l/250$.
 Pour les consoles et porte-à-faux, les valeurs limites données dans le Tableau II.4 s'appliquent en remplaçant l par deux fois la portée de la console.

II.4 ETUDE DE MISE EN PLACE DE L'ISOLANT [7]

II.4.1. Isolation des murs par l'intérieur

L'isolation des murs par l'intérieur est la technique d'isolation la plus répandue, elle est entrée dans les mœurs des professionnels du bâtiment car simple à mettre en place et avec une large gamme de produits isolants.

Dans le premier temps, il convient d'analyser l'isolation du toit. En effet, les déperditions de chaleur sont plus importantes par le toit que par les murs, on agit donc en priorité sur ce poste.

Si le toit est bien isolé, l'isolation des murs apporte un meilleur confort thermique car les parois intérieures sont moins froides. Cela contribue aussi à une baisse de la température car pour une maison non isolée on estime les pertes de chaleur au niveau des murs à environ 25%, c'est la cause qui fait qu'on privilégie généralement l'isolation des murs par l'intérieur pour raison budgétaires.

II.4.2. Différentes techniques d'isolation par intérieure

L'isolation des murs par l'intérieur peut se réaliser de différentes manières :

- Application directe de panneaux
- Application dans une structure
- Isolation projetée ou intercalée dans un double mur

Pour notre travail nous avons utilisé l'application directe des panneaux grâce à leurs faciliter e mise en place.

a. Application directe de panneaux

Il s'agit de panneaux rigides ou semi-rigides à venir coller directement sur le mur intérieur à l'aide de colle ou de chevilles. Cette technique possède l'avantage de ne pas trop réduire la surface habitable car les panneaux sont assez efficaces thermiquement. Les produits peuvent être à base de polyuréthane, de polystyrène, de fibre de bois ou de ouate de cellulose, la laine de chanvre. Lors du choix de l'isolant, il faut prendre garde à sa compatibilité avec le mur existant.

II.5. CONCLUSION PARTIELLE

Pour bien exécuter ce travail, l'ingénieur doit connaître les normes de l'architecture relatives à l'ouvrage qu'il veut concevoir ainsi que les formules qu'il doit appliquer pour le dimensionnement. C'est ainsi que, dans ce chapitre, nous avons essayé de donner une idée générale sur les normes architecturales relatives basées sur NEUFERT ainsi que les formules qui vont nous guider dans détermination des sections de l'ossature et leur vérification. Ainsi que sur la mise en place de l'isolant.

CHAPITRE III. DIMENSIONNEMENT DE L'OUVRAGE ET ETUDE D'ISOLATION THERMIQUE

Au cours de ce chapitre nous allons présenter les détails des calculs qui nous conduiront à adopter des sections utiles pour les différents éléments de la charpente et de la structure porteuse.

Nous partirons de la toiture en présentant le modèle des fermes qui vont la constituer pour ensuite déterminer la longueur des barres d'une ferme type étant donné que toutes les fermes auront une même dimension.

Ensuite on procédera à la détermination des actions appliquées sur la structure, établir les sections des éléments constitutifs de la structure selon les critères de résistance et de déformation. Ainsi que revérifier soigneusement les sections adoptées.

III.1. DIMENSION ET REPRÉSENTATION DE LA FERME TYPE

Le dimensionnement de la structure commence par la toiture et cela par la présentation des fermes qui constitueront la toiture. Nous allons commencer par déterminer la longueur des barres qui constituent la ferme symétrique de la charpente. Elle aura une portée de 8m et une hauteur de 3m ainsi que les éléments de la base auront une longueur de 2m. La charpente devra couvrir une étendue de $8 \times 10 \text{m}^2$.

Etant donné que la ferme est symétrique ; nous allons effectuer le calcul d'un seul versant.

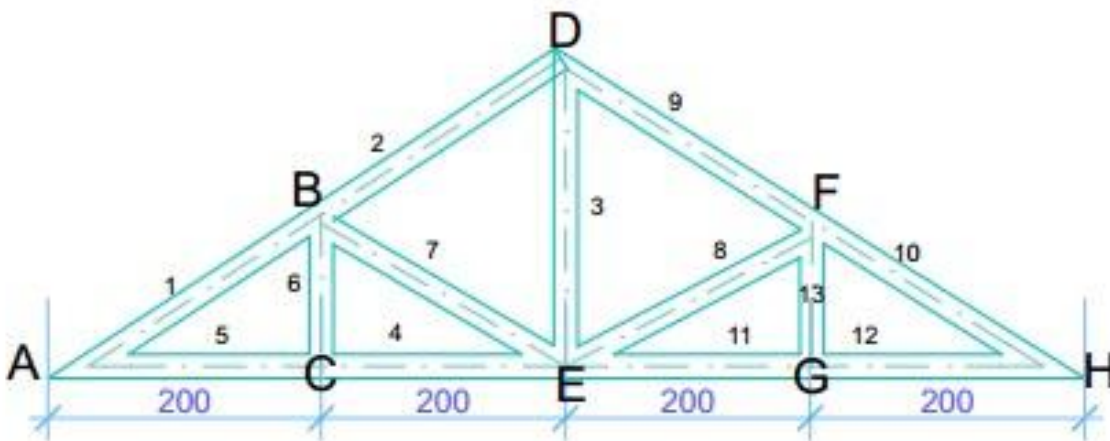


Figure III. 1.Représentation de la ferme.

Pour le calcul de la pente ; on a un triangle rectangle dont la hauteur est de 2,5 m et la longueur de 4m. C'est-à-dire $H=2,5\text{m}$ et $L=4\text{m}$,

$$\text{On a : } \text{Tg}\Theta = \frac{2,5\text{m}}{4\text{m}} = 0,625$$

$$\Theta = \text{arc tg } 0,625 \quad \Theta = 32,0053^\circ \sim 32^\circ$$

III.2. LES LONGUEURS DES BARRES

Selon la figure III.1. Calculons les longueurs des différents éléments de la charpente, soit $L_{A-C}, L_{C-E}, L_{E-G}, L_{G-H}$ les longueurs des éléments de la ferme.

- $L_{A-C} = L_{C-E} = L_{E-G} = L_{G-H} = 2\text{m}$.
- Selon triangle rectangle ABC, on sait que $L_{A-C} = L_{A-B} \cos\Theta$

$$L_{A-B} = \frac{2\text{m}}{\cos 32^\circ} = 2,35\text{m}$$

- Selon ce même triangle rectangle

$$L_{C-B} = \text{tg}\Theta * L_{A-C} = 0,624 * 2\text{m} = 1,24\text{m}$$

- Selon le triangle ADE

$$\text{On a } L_{A-E} = 4\text{m}, \text{tg}\Theta = L_{D-E} \div L_{A-E} \quad \text{et } L_{A-D} = 4,7\text{m}$$

- Selon le triangle BCE

$$L_{B-E} = \frac{2\text{m}}{\cos 32^\circ} = 2,35\text{m}$$

Tableau III. 1. Dimensions des éléments de la ferme

| Barre | Longueur (m) | Barre | Longueur (m) |
|-------|--------------|-------|--------------|
| 1 | 2,35 | 8 | 2,35 |
| 2 | 2,36 | 9 | 2,36 |
| 3 | 2,5 | 10 | 2,35 |
| 4 | 2 | 11 | 2 |
| 5 | 2 | 12 | 2 |
| 6 | 1,24 | 13 | 1,24 |
| 7 | 2,35 | | |

III.3. HYPOTHESES DE CALCUL

III.3.1. Etude du vent

Pour nos calculs de construction ; nous avons tenus compte des effets du vent qui engendrent des effets non négligeables et nous supposons que la direction de l'ensemble moyen

du vent est horizontale. L'action exercée par le vent sur une des faces d'une structure est considérée comme normale à cette structure et est fonction de :

- La vitesse du vent ;
- La catégorie de la construction et ses proportions d'ensemble ;
- L'emplacement de l'élément considéré dans la construction et son orientation par rapport au vent ;
- Les dimensions de l'élément considéré et ;
- La forme de la paroi à laquelle appartient cet élément.

En matière de vent, le Nord-Kivu appartient à la région 3 d'après les résultats des mesures faites par le service national de la météorologie. La charge du vent est donnée par subdivision de région selon le cours de construction en bois ; dans le cas le plus défavorable nous retiendrons la valeur extrême qui est de $q_v = 157,5 \text{ daN/m}^2$. Les données complémentaires se retrouvent dans le tableau III.2 [12].

Dans les calculs, la pression dynamique que nous allons considérer est donnée par :

$$q_h = 2,5 * \frac{h+18}{h+60} * q_{10}$$

Avec la hauteur des poteaux de 3m donc $h = 5,5\text{m}$:

Ce qui fait que la pression dynamique soit de :

$$q_h = 2,5 * \frac{5,5+18}{5,5+60} * 157,5$$

$$q_h = 141,26 \text{ daN/m}^2$$

- La première direction de q_h est donnée par la formule $Q_h = q_h * \sin\theta$;

Avec $\theta = 32^\circ$ on a donc $Q_h = 141,26 * \sin 32^\circ = 74,856 \text{ daN/m}^2$

- La deuxième direction de q_h est donnée par la formule : $Q_h = q * 0,3$.

$$\text{Alors } Q_h = 0,3 * 141,26 = 56,504 \text{ daN/m}^2$$

Tableau III. 2. Données sur le coefficient du vent

| Coefficient | Pression intérieure | Pression extérieure |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| Face au vent | $\pm 0,3$ | $\pm 0,8$ |
| Face sous le vent | $\pm 0,3$ | $-0,5$ |
| Toiture | $\pm 0,3$ | $-0,5$ |

III.3.2. Surcharges d'exploitation et données du problème

En nous référant, aux valeurs des charges d'exploitation en fonction de l'usage du bâtiment ; celui-ci qui doit servir à l'habitation, fait partie de la catégorie A Logements, d'où la valeur de surcharges d'exploitation à prendre en compte est de 1500 N/m^2 , le poids propre de tôles est de 100 N/m^2 .

➤ **Données du problème**

- Surcharge d'exploitation $q_{\text{expl}}=1500\text{N/m}^2$ d'après le tableau (II.1)
- Poids propre des tôles d'où $q_{\text{tôles}}=100\text{N/m}^2$
- Bois de qualité moyenne [9]
 - Poids spécifique du bois $q_{\text{propre bois}}=7500\text{N/m}^2$
 - Module de young $E_{\text{meam}}=13.10^9 \text{ N/m}^2$
 - Contrainte admissible $\sigma_{\text{adm}}=10\,791\,000 \text{ N/m}^2$
- Vent de base $q=157,5 \text{ daN/m}^2$.
- Vent effectif $q_{\text{eff}}=1,25*157,5=196,87 \text{ N/m}^2$
- Action du vent extérieur (vers la toiture) à gauche de l'arbalétrier :

$$q_{\text{v ext1}}=0.8*q_{\text{eff}}=157,5 \text{ N/m}^2$$
- Actions du vent intérieur (suppression):

$$q_{\text{v int1}}=0.3*q_{\text{eff}}=59,06\text{N/m}^2$$
- Action du vent extérieur (quittant la toiture) à droite de l'arbalétrier :

$$q_{\text{v ext2}}=0.5*q_{\text{eff}}=98,43\text{N/m}^2$$
- Flèche max $l/250$.

III.3.3. Eventaires des forces [12]

Pour cet éventaire nous aurons à faire à des forces ci-après :

- Charge morte ou permanente G : - Poids de la couverture de 8daN/m^2
 - Poids des attaches de 6daN/m^2
 - Poids des matériaux bois de 10daN/m^2

D'où G est de 24 daN/m^2

- Surcharge climatique : $141,26\text{daN/m}^2$
- Charge d'exploitation :

Supposons que deux ouvriers peuvent se retrouver sur la structure au même moment et que chacun pèse une masse de 85kg et porte avec lui ses outils de 15kg ; d'où la charge des ouvriers avec leurs outils sera donnée par $Q_{\text{expl}}=(85\text{kg}+15\text{kg})*10\text{m/S}^2$

$P_{\text{expl}}=1000\text{N/m}^2$ pour un ouvrier

Et pour les deux ouvriers on a : $Q_{\text{expl}}=2000\text{N/m}^2$ soit 200daN/m^2

Pour arriver à trouver les charges concentrées ; cherchons d'abord les surfaces d'influence en reconnaissant que la distance entre les fermes est de $2,5\text{m}$ et pour cela cette structure nous aurons 5 fermes.

En ELU

$$P= 1,35G+ 1,5Q+ 0,7Q_v$$

$$= 1,3*24 \text{ daN/m}^2+ 1,5*200\text{daN/m}^2+ 0,7*98,43\text{N/m}^2$$

$$=400,101 \text{ N/m}^2$$

Surface d'exploitation

$$S_1= 2,5\text{m}*\frac{2,35\text{m}}{2}=2,937\text{m}^2$$

$$S_2=2,5\text{m}*1,17\text{m} + 1,18\text{m}= 5,87 \text{ m}^2$$

$$S_3=2,5\text{m}*1,18\text{m} + 1,18\text{m} =5,95\text{m}^2$$

Recherche des charges concentrées

$$P_1=P*S_1=400,101 *2,937; P_1=1172,2 \text{ daN}$$

$$P_2=P*S_2=400,101 *5,87; P_2=2348,59 \text{ daN}$$

$$P_3=P*S_3=400,101 *5,95; P_3=2380,6 \text{ daN}$$

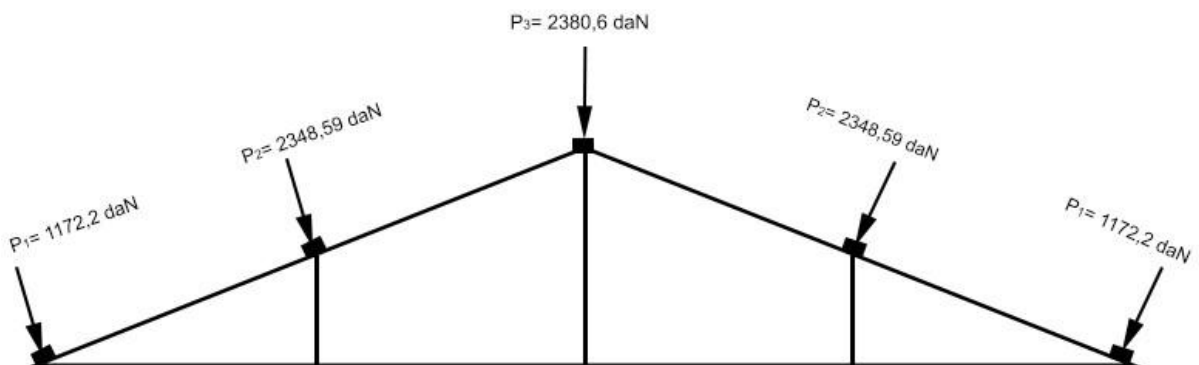


Figure III. 2. Description des charges sur les pannes

III.4. DIMENSIONNEMENT DES PANNES SUR L'ARBALETRIER

Par hypothèse nous allons considérer que la panne a une section carrée : $b=h$, son poids propre est non négligeable, la structure est isostatique et les pannes reposent sur des fermes distantes de 2,5m. L'entraxe entre panne étant de 2,35 et l'angle de la pente $\theta=32^\circ$.

La section de la panne A vaut donc :

$$A=b*h=h^2 \text{ car } h=b$$

$$\text{Le moment d'inertie } I_{yy}=I_{zz}=\frac{b*h^3}{12}=\frac{h^4}{12}$$

III.4.1. Description des pannes sur l'arbalétrier

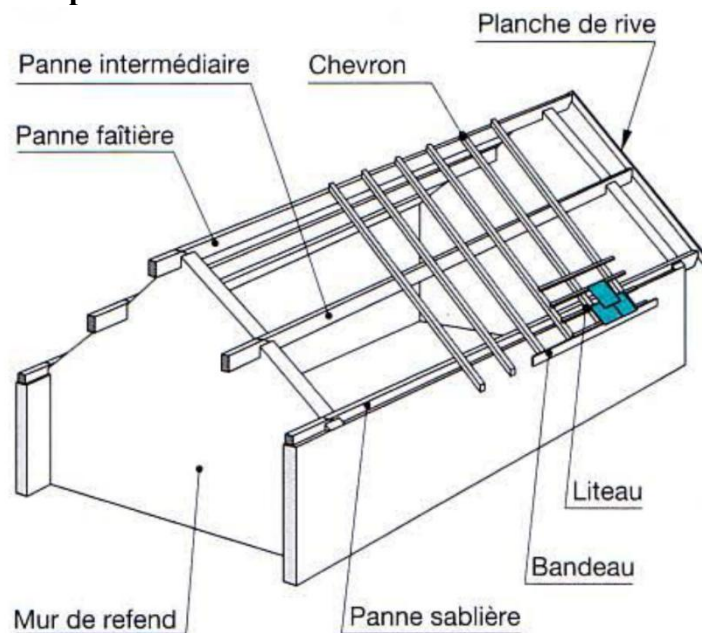


Figure III. 3. Description des pannes sur l'arbalétrier

Actions à considérer

- Actions du vent extérieur : $q_{\text{vext}1}=157,5 \text{ N/m}^2*2,35\text{m}*1/2=587,5 \text{ N/m}$
 $q_{\text{vext}2}=312,5 \text{ N/m}^2*2,35\text{m}*1/2=367,18 \text{ N/m}$
- Poids propre des tôles : $100 \text{ N/m}^2*2,35\text{m}*1/2=117,5 \text{ N/m}^2$
- Poids propre de la panne : $7500h^2 \text{ N/m}^2$
- Surcharge d'exploitation $q_{\text{expl}}=1500\text{N/m}^2*2,35\text{m}*1/2=1762,5\text{N/m}^2$

III.4.2. Calculs des pannes faitières

La charge totale par unité de longueur sur la panne faîtière notée q_{tpf} est donnée par la sommation de l'action du vent $q_{v_{ext}}$, le poids propre de la panne $q_{prop,pan}$, le poids de toles q_{toles} et la surcharge d'exploitation q_{expl} .

$$q_{tpf} = q_{v_{ext}} + q_{prop,pan} + q_{toles} + q_{expl}$$

Dans la suite les notations ci-dessous désignerons :

$q_{tpfG/Z}$ = Charge totale par unité de longueur sur la panne faîtière de gauche suivant l'axe OZ.

$q_{tpfG/Y}$ = Charge totale par unité de longueur sur la panne faîtière de gauche suivant l'axe OY.

$q_{tpfD/Z}$ = Charge totale par unité de longueur sur la panne faîtière de droite suivant l'axe OZ.

$q_{tpfD/Y}$ = Charge totale par unité de longueur sur la panne faîtière de droite suivant l'axe OY.

a. Panne faîtière de gauche

Le calcul de la charge totale par unité de longueur sur la panne faîtière de gauche notée q_{tpfG} est donné par :

➤ Suivant OZ : $q_{tpfG/Z} = (q_{prop,pan} + q_{toles} + q_{expl}) \cos \theta$

$$= (7500h^2 + 117,5 + 1762,5) \cos 32^\circ$$

$$= 6360,36h^2 + 1594,33 \text{ (N/m)}$$

➤ Suivant OY : $q_{tpfG/Y} = (q_{prop,pan} + q_{toles} + q_{expl}) \sin \theta + q_{v_{ext}}$

$$= (7500h^2 + 117,5 + 1762,5) \sin 32^\circ + 587,5$$

$$= 3974,39h^2 + 996,24 \text{ (N/m)}$$

Le calcul du moment max suivant Z noté $M_{max/z}$ et suivant Y noté $M_{max/Y}$ est donné pour ce cas par les relations :

$$M_{max/z} = q_{tpfG/Z} * \frac{l^2}{8} = \frac{2,5^2}{8} (6360,36h^2 + 1594,33) = 4969,03h^2 + 1245,57 \text{ (Nm)}$$

$$M_{max/Y} = q_{tpfG/Y} * \frac{l^2}{8} = \frac{2,5^2}{8} (3974,39h^2 + 996,24) = 3104,99h^2 + 778,31 \text{ (Nm)}$$

$L=2,5m$ est la longueur de la panne qui correspond donc à l'espacement entre fermes.

➤ Critère de résistance :

Il est donné par la relation : I_{YY}

$$\sigma_{\text{eff,max}} = \frac{M_{\text{max}/z}}{\frac{I_{yy}/z}{Y/2}} + \frac{M_{\text{max}/Y}}{\frac{I_{zz}/z}{Z/2}} \leq \sigma_{\text{adm}}$$

Comme $b=h$, $y=z$

$$\text{On a: } \frac{I_{yy}}{Z} = \frac{I_{zz}}{Z} = \frac{h^2 * 2}{12} = \frac{h^3}{6}$$

En remplaçant les moments par leurs valeurs respectives dans la relation précédente nous obtenons :

$$\sigma_{\text{eff,max}} = 48444,12h^2 + 12143,28 = 10791000h^3$$

Ce qui permet d'obtenir : $h \geq 0,100532085\text{m} \approx 10 \text{ cm}$

Le critère de résistance donne une section de $10 \text{ cm} * 10 \text{ cm}$ pour la panne de gauche.

➤ Critère de déformée

Il est donné par la relation :

$$F_{\text{max}/G} = \sqrt{\left(\frac{5 * q_{\text{tpf}G/Y} * l^4}{384EI_{zz}}\right)^2 + \left(\frac{5 * q_{\text{tpf}G/Z} * l^4}{384EI_{zz}}\right)^2} \leq f_{\text{limite}} = \frac{l}{250} = 0,010 \text{ m}$$

$$= \sqrt{\left[5 * \frac{(4969,03h^2 + 1245,57)}{384E_{\text{mean}}\left(\frac{h^4}{12}\right)} * 2,5^4\right]^2 + \left[5 * \frac{(3104,99h^2 + 778,31)}{384E_{\text{mean}}\left(\frac{h^4}{12}\right)} * 2,5^4\right]^2} \leq 0,01\text{m}$$

C'est-à-dire

$$h \geq 0,105632078\text{m} \approx 10,5 \text{ cm}$$

Le critère de déformée donne une section de $10,5\text{cm} * 10,5\text{cm}$ pour la panne gauche

b. Panne faîtière de droite

Le calcul de la charge totale par unité de longueur sur la panne faîtière de droite notée $q_{\text{tpf}D}$ est donné par :

$$\begin{aligned} \text{➤ Suivant OZ : } q_{\text{tpf}D/Z} &= (q_{\text{prop,pan}} + q_{\text{toles}} + q_{\text{expl}}) \cos \theta \\ &= (7500h^2 + 117,5 + 1762,5) \cos 32^\circ \\ &= 6360,36h^2 + 1594,33 \text{ (N/m)} \end{aligned}$$

$$\text{➤ Suivant OY : } q_{\text{tpf}D/Y} = (q_{\text{prop,pan}} + q_{\text{toles}} + q_{\text{expl}}) \sin \theta + q_{\text{vext}2}$$

$$=(7500h^2+117,5+1762,5)\sin 32^\circ+367,18$$

$$=3974,39h^2+1363,42(\text{N/m})$$

Le calcul du moment max suivant Z notée $M_{\max/Z}$ et suivant Y notée $M_{\max/Y}$ est donné pour ce cas :

$$M_{\max/z}=q_{\text{tpf}}D/Z*\frac{l^2}{8}=\frac{2,5^2}{8}(6360,36h^2+1594,33)=4969,03h^2+1245,57(\text{Nm})$$

$$M_{\max/Y}=q_{\text{tpf}}D/Y*\frac{l^2}{8}=\frac{2,5^2}{8}(3974,39h^2+1363,42)=3104,99h^2+1065,17(\text{Nm})$$

$l=2,5\text{m}$ est la longueur de la panne qui est aussi l'espace entre fermes.

➤ Critère de résistance :

Il est donné par la relation : I_{YY}

$$\sigma_{\text{eff,max}}=\frac{M_{\max/z}}{\frac{I_{yy}}{Y}/2}+\frac{M_{\max/Y}}{\frac{I_{zz}}{Z}/2}\leq\sigma_{\text{adm}}$$

Comme $b=h$, $y=z$

$$\text{On a: } \frac{I_{yy}}{Y}=\frac{I_{zz}}{Z}=\frac{h^2}{12}*\frac{2}{h}=\frac{h^3}{6}$$

En remplaçant les moments par leurs valeurs respectives dans la relation précédente nous obtenons :

$$\sigma_{\text{eff,max}}=48444,12h^2+2310,74=10791000h^3$$

Ce qui permet d'obtenir : $h\geq 0,101374\text{m}\approx 10\text{ cm}$

Le critère de résistance donne une section de $10\text{ cm}*10\text{ cm}$ pour la panne de droite.

➤ Critère de déformée

Il est donné par la relation :

$$F_{\max/G}=\sqrt{\left(\frac{5*q_{\text{tpf}}D/Y*l^4}{384EI_{zz}}\right)^2+\left(\frac{5*q_{\text{tpf}}D/Z*l^4}{384EI_{zz}}\right)^2}\leq f_{\text{limite}}=\frac{1}{250}=0,010\text{ m}$$

$$=\sqrt{\left[5*\frac{(4969,03h^2+1245,57)}{384E\text{mean}\left(\frac{h^4}{12}\right)}*2,5^4\right]^2+\left[5*\frac{(3104,99h^2+1065,17)}{384E\text{mean}\left(\frac{h^4}{12}\right)}*2,5^4\right]^2}\leq 0,01\text{m}$$

C'est-à-dire

$$h \geq 0,105518 \text{ m} \approx 10,5 \text{ m}$$

Le critère de déformée donne une section de 10,5cm*10,5cm pour la panne droite.

Pour des raisons de sécurité et de disponibilité sur le marché, nous adoptons pour les pannes faîtières une section $h=12\text{cm}^2$.

III.4.3. Calculs des pannes courantes sur l'arbalétrier

Ce calcul est valable pour les pannes courantes sur les deux arbalétriers, celui de gauche et celui de droite.

Sur la figure III.2. Nous avons une représentation de différentes pannes. Considérons une panne courantes quelconque.

Hypothèse :

- Le poids propre de panne est pris en compte.
- Les pannes ont une section carrée $b=h$ et sont distantes entre elles de 2,35 m.

Le calcul de la charge totale par unité de longueur de la panne courante sur l'arbalétrier, notée par q_{tpc}/A donnée par :

$$\text{➤ Suivant OZ : } q_{tpc}/Z = (q_{prop,pan} + q_{toles} + q_{expl}) \cos \theta$$

$$= (7500h^2 + 117,5 + 1762,5) \cos 32^\circ$$

$$= 6360,36h^2 + 1594,33 \text{ (N/m)}$$

$$\text{➤ Suivant OY : } q_{tpc}/Y = (q_{prop,pan} + q_{toles} + q_{expl}) \sin \theta + q_{V_{ext1}}$$

$$= (7500h^2 + 117,5 + 1762,5) \sin 32^\circ + 587,5 * 2,5$$

$$= 3974,39h^2 + 2464,99 \text{ (N/m)}$$

Le calcul du moment max suivant Z noté $M_{max/z}$ et suivant Y noté $M_{max/Y}$ est donné pour ce cas par les relations :

$$M_{max/z} = q_{tpc}/Z * \frac{l^2}{8} = \frac{2,5^2}{8} (6360,36h^2 + 1594,33) = 4969,03h^2 + 1245,57 \text{ (Nm)}$$

$$M_{max/Y} = q_{tpc}/Y * \frac{l^2}{8} = \frac{2,5^2}{8} (3974,39h^2 + 2464,99) = 3104,99h^2 + 1925,773 \text{ (Nm)}$$

$L=2,5\text{m}$ est la longueur de la panne qui correspond donc à l'espacement entre fermes.

- Critère de résistance :

Il est donné par la relation : I_{yy}

$$\sigma_{\text{eff,max}} = \frac{M_{\text{max}/z}}{\frac{I_{yy}/2}{Y/2}} + \frac{M_{\text{max}/Y}}{\frac{I_{zz}/2}{Z/2}} \leq \sigma_{\text{adm}}$$

Comme $b=h$, $y=z$

$$\text{On a: } \frac{I_{yy}}{2} = \frac{I_{zz}}{2} = \frac{h^2}{12} * \frac{2}{h} = \frac{h^3}{6}$$

En remplaçant les moments par leurs valeurs respectives dans la relation précédente nous obtenons :

$$\sigma_{\text{eff,max}} = 48444,12h^2 + 19028,057 = 10791000h^3$$

Ce qui permet d'obtenir : $h \geq 0,12498547\text{m} \approx 12\text{ cm}$

Le critère de résistance donne une section de $12\text{ cm} * 12\text{ cm}$ pour la panne de gauche.

➤ Critère de déformée

Il est donné par la relation :

$$F_{\text{max}} = \sqrt{\left(\frac{5 * q_{\text{tpc}}/Y * L^4}{384EI_{zz}}\right)^2 + \left(\frac{5 * q_{\text{tpc}}/Z * L^4}{384EI_{zz}}\right)^2} \leq f_{\text{limite}} = \frac{1}{250} = 0,010\text{ m}$$

$$= \sqrt{\left[5 * \frac{(6360,36h^2 + 1594,33)}{384E_{\text{mean}}\left(\frac{h^4}{12}\right)} * 2,5^4\right]^2 + \left[5 * \frac{(3974,39h^2 + 2464,99)}{384E_{\text{mean}}\left(\frac{h^4}{12}\right)} * 2,5^4\right]^2} \leq 0,01\text{m}$$

C'est-à-dire

$h \geq 0,118206\text{ m} \approx 11\text{ cm}$

Le critère de déformée donne une section de $11\text{cm} * 11\text{cm}$ pour la panne courante sur arbalétrier.

III.4.4. Pannes sablières sur arbalétrier

Son principe de calcul est le même que celui de la panne faîtière de gauche (ou droite). On adopte donc le résultat de cette dernière.

III.5. DETERMINATIONS DES CHARGES SUR LES NŒUDS ET EFFORTS DANS LE BARRES

III.5.1 Calcul des charges appliquées aux différents nœuds de la ferme

Signalons que dans la suite nous allons désigner par :

- F_y la composante horizontale appliquée au nœud (suivant Oy), projection de toutes les actions sur l'horizontale Oy.
- F_z la composante verticale appliquée au nœud (suivant Oz), projection de toutes les actions sur la verticale Oz.
- $q_{prop-bois\ arbalétrier} = 7500 \times h^2 (N/m)$ Avec h la dimension de la panne sur l'arbalétrier

Nous allons nous servir des équations fondamentales de la statique dans la détermination des charges :

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \\ \sum F_z = 0 \end{cases}$$

1. Charges appliquées sur l'arbalétrier

A. A gauche de l'arbalétrier

→ Nœud A :

- $F_y = q_{vext1} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \cos 32^\circ \times \frac{2,35\ m}{2} \times 2,5\ m + q_{vint1} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \sin 0^\circ \times \frac{2,35\ m}{2} \times 2,5 = 845,57\ N$
- $F_z = q_{vext1} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \sin 32^\circ \times \frac{2,35\ m}{2} \times 2,5\ m + q_{vint1} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \cos 0^\circ \times \frac{2,35\ m}{2} \times 2,5\ m + (q_{expl} + q_{tôles}) \times 2,35\ m \times \frac{2,5\ m}{2} + (q_{expl} + q_{plafond}) \times 1,35\ m \times \frac{2,5\ m}{2} + (q_{prop-bois\ tirant} + q_{prop-bois\ arbalétrier}) \times \frac{2,35\ m}{2} = 16\ 372,43\ N$

→ □ Nœud B :

- $F_y = q_{vext1} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \cos 32^\circ \times \left(\frac{2,35\ m}{2} + \frac{2,35\ m}{2} \right) \times 2,5\ m = 1537,4\ N$
- $F_z = [(q_{vext1} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \sin 32^\circ + q_{expl} + q_{tôles}) \times 2,35\ m + q_{prop-bois\ arbalét}] \times 2,5\ m = 14\ 391,79\ N$

B. A droite de l'arbalétrier

→Nœud H

- $$F_y = -q_{vint2} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \sin 0^\circ \times \frac{2,35 m}{2} \times 2,5 m + q_{vext2} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \cos 32^\circ \times \frac{2,35 m}{2} \times 2,5 m$$

$$= 693,53 N$$
- $$F_z = -q_{vext2} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \sin 32^\circ \times \frac{2,35 m}{2} \times 2,5 m + q_{vint2} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \cos 0^\circ \times \frac{2,35 m}{2} \times 2,5 m + (q_{expl} + q_{tôles}) \times 1,35 m \times \frac{2,5 m}{2} + (q_{expl} + q_{plafond}) \times 2,35 m \times \frac{2,5 m}{2} + (q_{prop-bois tirant} + q_{prop-bois arbalétrier}) \times \frac{2,5 m}{2}$$

$$= 14 941,6 N$$

→Nœud F

- $$F_y = -q_{vext2} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \cos 32^\circ \times \left(\frac{2,35 m}{2} + \frac{2,35 m}{2} \right) \times 2,5 m$$

$$= -971,38 N$$
- $$F_z = [(-q_{vext2} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \sin 32^\circ + q_{expl} + q_{tôles}) \times 2,5 m + q_{prop-bois arbal}] \times 2,5 m$$

$$= 14 649,97 N$$

C. Au sommet

→Nœud D

- $$F_y = [q_{vext1} \left(\frac{N}{m^2} \right) + q_{vext2} \left(\frac{N}{m^2} \right)] \times \cos 32^\circ \times \frac{2,35 m}{2} \times 2,5 m$$

$$= 1839,79 N$$
- $$F_z = (q_{vext1} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \cos 32^\circ + q_{expl} + q_{tôles}) \times \frac{2,35 m}{2} \times 2,5 m + (q_{expl} + q_{tôles} - q_{vext2} \times \sin 32^\circ) \times 2,35 m \times \frac{2,5 m}{2} + 2 \times q_{prop-bois arbalét} \times 2,5 m$$

$$= 16 943,51 N$$

2. Charges appliquées sur le tirant

→□Nœud C-E-G

- $$F_y = q_{vint} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \cos 0^\circ \times \frac{2,35 m}{2} \times 2,5 m = 473,52 N$$
- $$F_z = -q_{vint} \left(\frac{N}{m^2} \right) \times \sin 0^\circ \times \frac{2,35 m}{2} \times 2,5 m + (q_{expl} + q_{plafond}) \times 2,35 m \times \frac{2,5 m}{2} + q_{prop-bois entrant} \times \frac{2,5 m}{2} = 8372 N$$

1. Résultats du calcul des charges appliquées aux nœuds

Les charges appliquées aux différents nœuds sont résumées dans le tableau III.3.

Tableau III. 3. Charges sur les nœuds

| Nœuds | $F_y(N)$ | $F_z(N)$ |
|---------------|----------------|-----------------|
| A | 845,57 | 16972,43 |
| B | 1537,4 | 14391,79 |
| C | 473,52 | 8372 |
| D | 1839,79 | 16943,51 |
| E | 473,52 | 8372 |
| F | -971,38 | 14649,97 |
| G | 473,52 | 8372 |
| H | 693,52 | 14941,6 |
| \sum Forces | 5355,46 | 103015,3 |

III.5.2 Efforts dans les barres

Les efforts seront calculés en suivant la demie ferme représenté. Nous procédons à la recherche des efforts dans les barres par la méthode analytique des nœuds. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau III.4 :

Tableau III. 4. Efforts dans les barres et types de sollicitation

| N° BARRE | EFFORT (N) | SIGNE | SOLLICITATION |
|----------|------------|-------|---------------|
| 1 | 15751,19 | - | Compression |
| 2 | 24755,57 | - | Compression |
| 3 | 26318,31 | + | Traction |
| 4 | 15348,08 | + | Traction |
| 5 | 15348,08 | + | Traction |
| 6 | 0 | | |
| 7 | 15666,34 | - | Compression |

III.6 DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS CONSTITUTIFS DE LA FERME

La ferme en étude étant constituée de :

- Arbalétriers : membrures supérieures

- Tirant : membrure inférieure
- Diagonales.

Nous allons nous servir des formules qui ont été expliciter au chapitre précédent et ici nous serons entrain de présenter les résultats nets sans y mettre tous les détails des calculs.

Les différents éléments des barres de la ferme sont sollicités soit en traction soit en compression comme on a pu le constater dans le tableau III.4.

Leur dimensionnement se fera donc de la manière suivante :

- Les barres sollicitées en compression seront dimensionnées d'abord par la vérification du critère de résistance ensuite par la vérification du risque de flambement.
- Celles qui sont sollicitées en traction seront dimensionnées seulement par la vérification du critère de résistance.

III.6.1 Dimensionnement du tirant

Pour cette demie ferme ; les entrants sont sur les barres 5 et 4 et nous remarquons que les deux barres sont égales ; c'est-à-dire soumis à la traction ; leur effort est de $N_4=N_5= 15348,08$ N pris en valeur absolue.

- Condition de compression

$$\sigma_{c//,d} \leq f_{c//,d}$$

Avec $\sigma_{c//,d}$ valeur de calcul de la contrainte de compression parallèle aux fibres,

$$\sigma_{c//,d} = N/A$$

$f_{c//,d}$ résistance en compression parallèle aux fibres

$f_{c//,d} = 1,8$ daN selon la classe de resistance C18 pour les résineux et peuplier d'où

$$N/A \leq f_{c//,d}$$

$$A \geq \frac{N \cdot \gamma M}{f_{c//,d}} \quad \gamma M = 1.3 \text{ coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau}$$

$$A \geq \frac{15348,08 \cdot 1,3}{1800} = 110,847 \text{ cm}^2$$

$$A \geq 111 \text{ cm}^2$$

D'où la section du tirant prise en compte est cm^2 soit **10 cm X 12 cm**

III.6.2 Dimensionnement de l'arbalétrier

Pour la demie ferme, les arbalétriers sont sur les barres 1 et 2 et nous constatons que c'est la barre 2 qui est sollicité plus en compression et son effort est $N_2 = 24755,57 \text{ N}$

➤ Vérification du critère de résistance

En compression nous avons $f_{c,0,d} = 0.8 \times \frac{1800 \text{ N/cm}^2}{1.3} = 1107,692 \text{ N/cm}^2$

$$A \geq \frac{24755,57 \text{ N}}{1107,692 \text{ N/cm}^2 \times 0,5} = 191,697 \text{ Cm}^2$$

- Vérification au flambement

En considérant les barres bi-articulées, nous obtenons l'élanement avec la relation

$$\lambda = \frac{l_{flamb}}{\sqrt{\frac{I}{A}}}; l_{flamb} = K_o \times l; K_o = 1$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \text{ avec } b=16 \text{ et } h=12$$

En remplaçant les termes par leurs valeurs nous avons $\lambda = 135,86$; l'élanement ne se trouve pas dans l'intervalle $\lambda =] 96, 200]$ D'où il n'y a pas de risque de flambement ;

D'où la section de l'arbalétrier prise en compte est de $A = 192 \text{ cm}^2$ soit **16 cm X 12 cm**

III.6.3 Dimensionnement des diagonales

Pour la demie ferme nous n'avons que la barre 3 et faisant l'objet de notre poinçon car l'effort dans la barre 6 est nul. Si cette barre peut être mise ce serait par objet d'esthétique. Et cette barre 3 est sollicité en traction, $N_3 = 26318,31 \text{ N}$

La barre 3 est sollicitée en traction avec $N_{15} = 26318,31 \text{ N}$

En procédant comme pour le cas de traction précédent, nous obtenons

$$A \geq \frac{26318,31 \times 1,3}{1800} = 19,008 \text{ cm}^2$$

- Vérification au flambement

En considérant les barres bi-articulées, nous obtenons l'élanement avec la relation suivante

$$\lambda = \frac{l_{flamb}}{\sqrt{\frac{I}{A}}}; l_{flamb} = K_o \times l; K_o = 1$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \text{ Avec } b = 4 \text{ cm et } h = 5 \text{ cm}$$

Par calcul, on trouve : $\lambda = 183.67$; l'élancement ne se trouve pas dans l'intervalle] 96, 200] ; il n'y a pas flambement.

D'où la section de la diagonale prise en compte est de $A = 20 \text{ cm}^2$ soit **5 cm X 4 cm**

III.7 DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE PORTEUSE

III.7.1 Les Poutres

Nous allons tout d'abord trouver le volume total des éléments constitutifs de la charpente sachant au préalable leurs différentes sections.

Nous obtenons $V_{total} = 33.38 \text{ m}^3$;

Et la surface de la toiture rabattue sur le plan :

$$S_{tot} = 85 \text{ m}^2$$

La charge de la charpente sera trouvée comme suit :

$$P_{p.charpente} = V_{total} \times \rho_k \times g = 206956 \text{ N};$$

$$\text{Avec } g = 10 \text{ m/s}^2$$

$$\rho_k = 620 \text{ Kg / m}^3$$

$$V_{total} = 33.38 \text{ m}^3$$

La charge surfacique est :

$$P = \frac{P_{p.charpente}}{S_{toit}} = 2434,77 \text{ N/m}^2 ;$$

En ajoutant le poids propre de la toiture 100 N/m^2 , les surcharges d'exploitation 1500 N/m^2 , le chargement maximal sera alors donné par :

$$C_{max} = 1,35G + 1,5Q = 2544,14 \text{ N/ m}^2$$

$$\text{Avec } G = 294,14 \text{ N/m}^2 ;$$

$$Q = 1500N/m^2$$

La poutre ayant une plus grande portée qui est de 2 m et la plus grande distance entre deux appuis est de 2 m, on a le chargement maximum linéaire :

$$C_{max.linéaire} = 2544,14N/m^2 \times 2m = 5088,28N/m$$

Poutre chargée uniformément avec charge répartie uniformément $q = \frac{5088,28N}{m}$

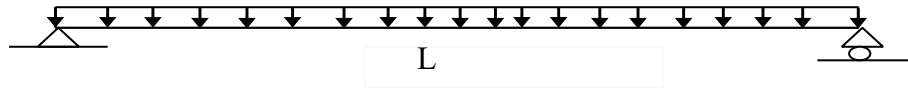


Figure III. 4. Poutre chargée

Nous calculons alors le taux de travail,

Nous considérons $b=0.06$ m fixée, nous devons donc trouver h . En remplaçant chaque terme par sa valeur on a :

$$\sigma_{m,d} = 5088,28/h^2$$

$$f_{m,d} = 101765,6N/m^2 ;$$

$$K_{crit} = 1$$

Le taux de travail sera alors : $\frac{\frac{5088,28}{h^2}}{1 \times 101765,6} \leq 1$ et nous trouvons $h \geq 0.223m$;

Au final, la section de la poutre sera de **22 cm x 6 cm** ;

III.7.2 Poteaux

- **Prédimensionnement**

Comme nous l'avons dit précédemment, nous proposons une section de $25 \times 25cm^2$ qu'il sera question de vérifier moyennant les critères de résistance.

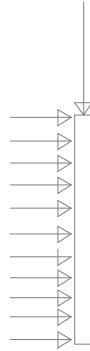
- **Hypothèses simplificatrices**

- Le poteau est rigidement encasté à sa base inférieure, il ne va porter que le poids de la ferme et l'action du vent.
- Le matériau bois constitutif des poteaux reste celui des autres éléments de la structure.

- **Bilan des actions sollicitant les poteaux**

Les poteaux sont sollicités en flexion composée comme illustré au chapitre deuxième que nous reprenons sur la figure III.4 :

Figure III. 5. Illustration des actions sur le poteau



Les actions qui sollicitent les poteaux sont de diverses formes entre autres :

- **Poids propre des poteaux**

Le poids propre des poteaux est donné par sa masse multipliée par l'accélération de la pesanteur. Ici il s'agit de calculer les poteaux du rez-de-chaussée car elles sont plus sollicitées.

Appelons P_p le poids propre des poteaux, m leur masse, V le volume des poteaux, ρ sa masse volumique et g l'accélération de la pesanteur. On écrit

$$P_p = V \cdot \rho \cdot g \text{ or } V = \text{section} \times \text{longueur}$$

$$\Leftrightarrow P_p = 0,0625 \times 3,1 \times 420 \times 9,81 = 798,29N$$

- **L'action du vent**

L'action du vent extérieur est donnée dans le tableau II.4, en effet la pression dynamique de base est donnée dans le tableau II.2 et sa valeur est $q_{10} = 500 \text{ N/m}^2$ car le milieu d'étude se situe dans la zone 3(Nord-Kivu).

$$q_h = 2,5 \times (18 + 3) \times \frac{157,5}{(60 + 3)} = 416,66 \frac{N}{m^2}$$

$$q_{veff} = 416,666 * (0,8 + 0,3) = 379,808 \frac{N}{m^2}$$

- **Poids de la ferme et des pannes**

Le calcul du poids de la ferme et des pannes revient à calculer le poids propre des éléments constitutifs de la ferme. Ainsi si on appelle p_{fp} le poids de la ferme et des pannes alors on écrit ce qui suit :

$$p_{fp} = p_{pannes} + p_{arbalétrier} + p_{montants} + p_{entrait} + p_{diagonales} \Leftrightarrow p_{fp} = 7533,8889529N$$

- **Poids des tôles**

$$q_{tôles} = 100 N/m^2$$

La surcharge d'exploitation notée S vaut $1500 \frac{N}{m^2}$ (valeur tabulée). Pour rendre cette charge concentrée, il faut la multiplier par la surface d'influence qui est donnée par

$$S_{infl} = 2,5 \times 2,35 = 5,875m^2$$

Note : Pour trouver l'action qui agit sur un poteau, il faudra trouver la résultante de toutes les actions qui agissent sur le poteau, cette résultante sera la sommation du poids de la ferme, des pannes, des tôles, le poids propre des poteaux, ainsi que le plancher.

Trouvons la charge permanente des murs ;

Sachant que $\rho = 350Kg/m^3$ pour BM C24

Or, $\gamma = \rho \times g$.

$$\gamma = 3433,5 \frac{N}{m^3} \text{ avec } g = 9,81 \frac{m}{s^2}$$

Etant donné que l'épaisseur du mur est de 2,5cm nous pouvons trouver la surface qui est : $S = e \times h \Leftrightarrow S = 0,025 \times 3 = 0,075m^2$

La résultante des efforts dans les poteaux est de : $37009,93526N = 37,00993526KN$

- **Vérification des sections des poteaux**

La contrainte de compression sera calculée par :

$$\sigma_c = \frac{37009,93526N}{0,0625m^2} = 592158,963Pa$$

Le moment de flexion M sera donné par :

$$M = \frac{128,390625 \times 9,61}{8} = 154,2292Nm$$

La formule permettant de vérifier la section des poteaux est donnée par :

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \left(\frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,d}} \right)^2 \leq 1$$

- **Vérification du risque de flambement**

$k_{c,z} = 1$ S'il n'y a pas de risque de flambement

L'élancement maximal $\lambda_{max} = \frac{l_0 \sqrt{12}}{b}$ est donné par : $l_0 = \frac{l}{\sqrt{2}}$

$$\lambda_{max} = \frac{3\sqrt{12}}{\sqrt{2} \times 0,25} = 30,37367m$$

L'élancement relatif maximal est calculé par la formule II.10 dont l'application numérique est :

$$\lambda_{rel,max} = \frac{110,227}{\pi} \sqrt{\frac{21 \times 10^6}{7 \times 310 \times 10^6}} = 0,034$$

Comme $\lambda_{rel,max} \leq 0,3$ donc il n'y a pas de risque de flambement et on prendra $k_{cz} = 1 = k_{cy}$.

Pour vérifier la section des poteaux on va faire l'application numérique de la formule III.1, ainsi on écrit ce qui suit :

$$\frac{559366,3914}{14538461,54} + \left(\frac{98604}{18276923,08} \right)^2 = 0,038504043 \leq 1$$

Comme nous venons de trouver une valeur inférieure à 1 alors la section pré-dimensionnée vérifie les conditions de résistance. On vérifiera aisément que le poteau pré dimensionné vérifie aussi le critère de la déformée.

Cela étant fait, nous adoptons pour une section carrée de $25 \times 25 cm^2$ pour tous les poteaux de la structure.

III.7.3. Tableau synthétique des dimensions retenues

Pour des raisons économiques, la disponibilité de différentes sections des bois retrouvés sur le marché, la résistance du bois utilisé mais aussi pour des raisons d'assemblage, les sections

retenues après dimensionnement des éléments constitutifs des fermes ainsi que de la structure porteuse se résument dans le tableau III.5 :

Tableau III. 5. Dimensions des éléments de la charpente et de la structure porteuse

| ELEMENTS | SECTION |
|-------------|--------------|
| Pannes | 12cm x12 cm |
| Arbalétrier | 15cm x12 cm |
| Tirant | 14cm x12 cm |
| Diagonale | 5 cm x 4cm |
| Poutres | 16 cm x 6 cm |
| Poteaux | 25cm X 25cm |

III.8. ETUDE D'ISOLATION THERMIQUE DE LA STRUCTURE

L'isolation thermique permet d'accroître le confort d'une maison elle permet de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Le confort thermique dépend de plusieurs paramètres, de manière simplifiée on considère que la température ressentie réellement par l'individu correspondant à la moyenne entre la température de l'air et la température des parois.

Dans un bâtiment mal isolé, les parois de l'enveloppe seront froides tandis que un bâtiment bien isolé, elle se rapprocheront fortement de la température de l'air. Le confort de l'occupant s'en trouvera donc amélioré.

III.8.1. Présentation des intérêts techniques [8]

- **Niveau de performance thermique**

La première étape consiste à fixer les objectifs de performance thermique que l'on souhaite atteindre. En construction surtout dans les bâtiments classés, il n'est pas toujours possible d'arriver à un coefficient de transfert thermique de $0,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ recommandé ou exigé dans le cas d'une construction de paroi. Les épaisseurs d'isolation posées du côté intérieur sont souvent limitées, que ce soit pour préserver l'esthétique des parois ou l'habitabilité des espaces quand ceux-ci sont déjà exigus.

- **Climat intérieur**

Le comportement hygrothermique des parois est aussi influencé par le climat intérieur. En effet, tous les transferts d'humidité et de chaleur qui se créent à travers la paroi sont dus à la différence de climat qui existe entre l'extérieur et l'intérieur. Si la prise en compte du climat intérieur et de la quantité de l'air fait partie de l'analyse de l'état existant, il est important de noter que le climat intérieur sera certainement différent après la réalisation du système d'isolation par l'intérieur. De plus, le climat intérieur pourra être différent dans chaque zone du bâtiment.

- **Résistance thermique et la norme**

Il est important de connaître la conductivité thermique et l'épaisseur du mur. Il est parfois nécessaire d'effectuer une analyse afin d'évaluer la densité du bois et de pouvoir en déduire une conductivité thermique probable.

La norme produit NF EN 13171 et RT 2012 produits isolants thermiques pour les bâtiments à ossature bois. Ce sont des isolants flexibles ou rigides, élaborés à base d'au moins 80% de masse de fibres de bois et d'un liant dont la composition peut varier suivant le fabricant.

- **La conductibilité thermique de l'isolant choisis**

L'isolant choisi pour notre ouvrage est la laine de chanvre, c'est l'isolant le plus utilisé pour l'isolation des ouvrages à ossature bois, avec une performance thermique λ de 0,041 à 0,044 W/m.K.

La laine de chanvre peut être présentée sous forme de rouleaux, des panneaux et peut être coulée sur chantier, il est utilisé le plus fréquemment pour l'isolation de toitures, toiture-terrasse et pour les murs non porteurs (ossature bois).

La résistance thermique d'un isolant est symbolisée par la lettre R, s'exprime en mètre carré kelvin par watt ($m^2.K/W$). Elle est égale au rapport entre l'épaisseur e de l'isolant et sa conductivité thermique λ .

Sachant que la conductivité thermique λ est la quantité de chaleur pouvant être transférée dans un matériau en un temps donné. Elle est exprimée en watt par mètre kelvin (W/m.K).

Pour une épaisseur e donnée, plus sa valeur λ est petite, plus la résistance thermique R est grande et donc plus le matériau.

Pour le cas de notre ouvrage :

L'épaisseur $e = 250 \text{ mm} = 0,25 \text{ m}$

La conductivité thermique de l'isolant est de 0.042 W/m.K

Alors la résistance thermique est : $R = \frac{e}{\lambda}$

$$R = \frac{0,25 \text{ m}}{0.042 \text{ W/m.K}} = 5,952 \text{ m}^2.\text{K/W}$$

- **La transmission thermique d'une paroi**

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est symbolisé par la lettre U et s'exprime en $\text{W/m}^2.\text{K}$. Il représente la quantité de chaleur traversant cette paroi par unité de temps et par mètre carré, lorsqu'il existe une différence de température entre les deux cotés (l'intérieur et l'extérieur) de 1°C . Ce coefficient est l'inverse de la résistance thermique ($1/R$). Moins la valeur U d'un élément de construction est élevée, moins on perd de chaleur vers l'extérieur par l'intermédiaire de cet élément c'est-à-dire plus la quantité de chaleur retenue à l'intérieur est grande.

III.8.2. Expression de la température par une équation différentielle

Grâce à cet équation différentielle, il nous permet d'exprime cette différence de température intérieure et extérieure au bout du temps avec les conditions posés comme l'espace et le temps.

Nous avons l'équation :

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{D \partial^2 u}{\partial x^2} = 0 \text{ (l'équation de la chaleur)}$$

Nous allons procéder par la modélisation pour déterminer les températures linéiques présents à l'intérieur la structure.

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{D \partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

$u(x,t)$: représentation de la température qui dépend x et de t .

En générale c'est un champs scalaire définie sur l'espace et sur le temps pour résoudre cette équation, mathématiquement elle n'est pas suffisante, il faut avoir des conditions aux bords et des conditions aux initiales.

Conditions Initiales

$U(x, t=0) = f(x)$: comme $\forall x$

Conditions aux bords

$U_0 = U(x=0, t) = \text{connue } \forall x$

$U_a = U(x=a, t) = \text{connue } \forall x$

Discrétisation de l'équation

$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u(x, t+ht) - u(x, t)}{ht}$ qui nous permet d'utiliser la formule progressive en fonction de t , et la discrétisation sur le temps donne $t_0 = 0, t_1 = h_t, t_2 = 2 * h_t, \dots, t_M = M * h_t$

Avec h_t : pas et M : dernier point

$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{u(x+hx, t) - 2 * u(x, t) + u(x-hx, t)}{hx^2}$ qui nous permet d'utiliser la formule centré de x , et la discrétisation de l'espace $x_0 = 0, x_1 = h_x, x_2 = 2 * h_x, \dots, x_N = N * h_x$

En posant $x = i$ et $t = j$ on a la forme de l'équation de la chaleur :

$$\frac{u(i, j+1) - u(i, j)}{ht} = D * \frac{u(i+1, j) - 2 * u(i, j) + u(i-1, j)}{hx^2}$$

Forme algorithmique

$$u(i, j+1) = \frac{D * ht}{hx^2} [u(i+1, j) - 2 * u(i, j) + u(i-1, j)] + u(i, j)$$

Posons $r = D * \frac{ht}{hx^2}$ pour une bonne stabilité de l'algorithme on a la condition $r < \frac{1}{2}$

$$U(i, j+1) = u(i, j) + r[u(i+1, j) + 2 * u(i, j) + u(i-1, j)]$$

$$U(i, j+1) = r * u(i-1, j) + (1 - 2 * r) * u(i, j) + r * u(i+1, j)$$

Forme matricielle

$$u(i, j+1) = A * u(i, j)$$

$$u_0 = u_0$$

$$u(1, 1) = r u(0, 0) + (1 - 2 * r) u(1, 0) + r * u(2, 0)$$

$$u(2, 2) = r u(1, 1) + (1 - 2 * r) u(2, 1) + r * u(3, 1)$$

...

$$U(i, j+1) = r u(i-1, j) + (1 - 2 * r) * u(i, j) + r * u(i+1, j)$$

$$\begin{pmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_3 \\ \vdots \\ u_N \end{pmatrix} (j+1) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ r & 1-2r & r & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & r & 1-2r & r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} u_0 \\ u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_N \end{pmatrix} (j)$$

Avec cette matrice on peut observer l'évolution de la température dans l'ouvrage qui dépend de l'espace et du temps. Cette température se transmet par conduction car elle s'effectue sans déplacement de la matière. Mais aussi déterminer la valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire.

III.9 CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce dernier chapitre consacré au dimensionnement et à l'étude l'isolation thermique de l'ouvrage, il s'agit de déterminer les différentes sections des éléments structuraux pour son exploitation en toute sécurité. L'étude à été basée donc sur le dimensionnement des éléments de la charpente et le dimensionnement de la structure porteuse ainsi aux éléments de l'isolation thermique de l'ouvrage.

Vue la délimitation de ce travail, nous n'avons pas pu dimensionner la fondation en considérant que la contrainte créée par la structure au sol reste inférieure à la contrainte effective du sol lui-même.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail intitulé « CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UNE CONSTRUCTION EN BOIS AVEC ISOLATION THERMIQUE, CAS D'UNE MAISON D'HABITATION » avait pour objectif de concevoir et dimensionner une maison d'habitation en bois avec l'isolation thermique, résistante et respectant les normes de conception moderne.

En premier temps nous avons présenté le matériau bois avec toutes comme matériau de construction et quelques notions sur l'isolation thermique. Ensuite nous avons les normes de conception selon Neufert et les normes bien adaptées de calculs de structure en bois à savoir Eurocode 5, puis procédé au dimensionnement des éléments de la ferme et évaluer le confort thermique de l'ouvrage.

Ces calculs de vérification faits nous ont permis de maintenir les sections répondant aux critères à savoir :

- Les pannes : 12 cm X 12 cm
- Les arbalétriers : 15 cm X 12 cm
- Les tirants : 14 cm X 12 cm
- Les diagonales : 5 cm X 4 cm
- Les poutres : 16 cm X 6 cm
- Les poteaux : 25 cm X 25 cm

Après le dimensionnement nous avons procédé à l'isolation thermique de l'intérieur, dont la valeur de la résistance thermique du mur est de $5,952 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. Cette isolation conserve le confort de la surface habitable de la maison, protège également de manière efficace le mur des intempéries, des infiltrations, des différences thermiques entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment.

L'isolation thermique limite les déperditions thermiques dans le bâtiment, augmenter le confort et réduit les factures d'énergie alors qu'une maison sans isolation présente une perturbation de la température ambiante de l'intérieur et un climat non paisible.

Il est clair que nous n'avons pas abordé tous les aspects de notre travail compte tenu de sa complexité mais nous avons donné des éléments intéressants pouvant servir d'orientation aux étudiants et chercheurs passionnés par ce domaine.

Pour finir, nous estimons que la suite de notre formation au département de Génie Civil de la Faculté des Sciences et Technologies appliquées de l'Université Libre des Pays des Grands

Lacs nous permettra de comprendre d'avantage et de solutionner au mieux les problèmes liés à la conception et au dimensionnement des ouvrages en béton, en acier ou en construction mixte rencontrés dans la pratique du métier d'Ingénieur civil.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ". RDC", Le charbon de bois vital pour les foyers, mortel pour les forêts, COP25, 2019.
- [2] B. P., Le séisme et les constructions en métal et en bois, 2011.
- [3] G. F., Cours de sciences des matériaux de constructions, UNIVERSITÉ ABOUBEKR BELKAID.
- [4] T. H. & M. VOLZ, Construire en bois, Troisième édition, 2012.
- [5] A. (collectif), Manuel de l'ingénierie du bois, Ed. Eyrolles, 2003.
- [6] Construire en bois, manuel de l'ingénieur.
- [7] Guide, Isolation thermique intérieure, 2012.
- [8] M. & C. BRANCHU, Isolation thermique et acoustique, EYROLLES.
- [9] U. B. R. G. e. C. M. ALLINTER A., Les éléments des projets de construction ERNST NEUFERT, PARIS: DUNOD 7^e EDITION.
- [10] H. THONIER, Conception et calculs des structures des bâtiments, presse de l'école nationale de ponts et chaussées.
- [11] B. L. & V. T. Y. BENOIT, Eurode 5 Calcul des structures des bâtiments, Edition EYROLLES, Deuxième tirage 2008.
- [12] M. CALIRE, Conception et dimensionnement d'un hangar en bois couvrant le parking du campus Moïse ULPGL, Goma, TFC 2017 2018.
- [13] C. BISHEKWA, Cours de construction en bois G3, Goma: FSTA/ ULPGL, 2021-2022.

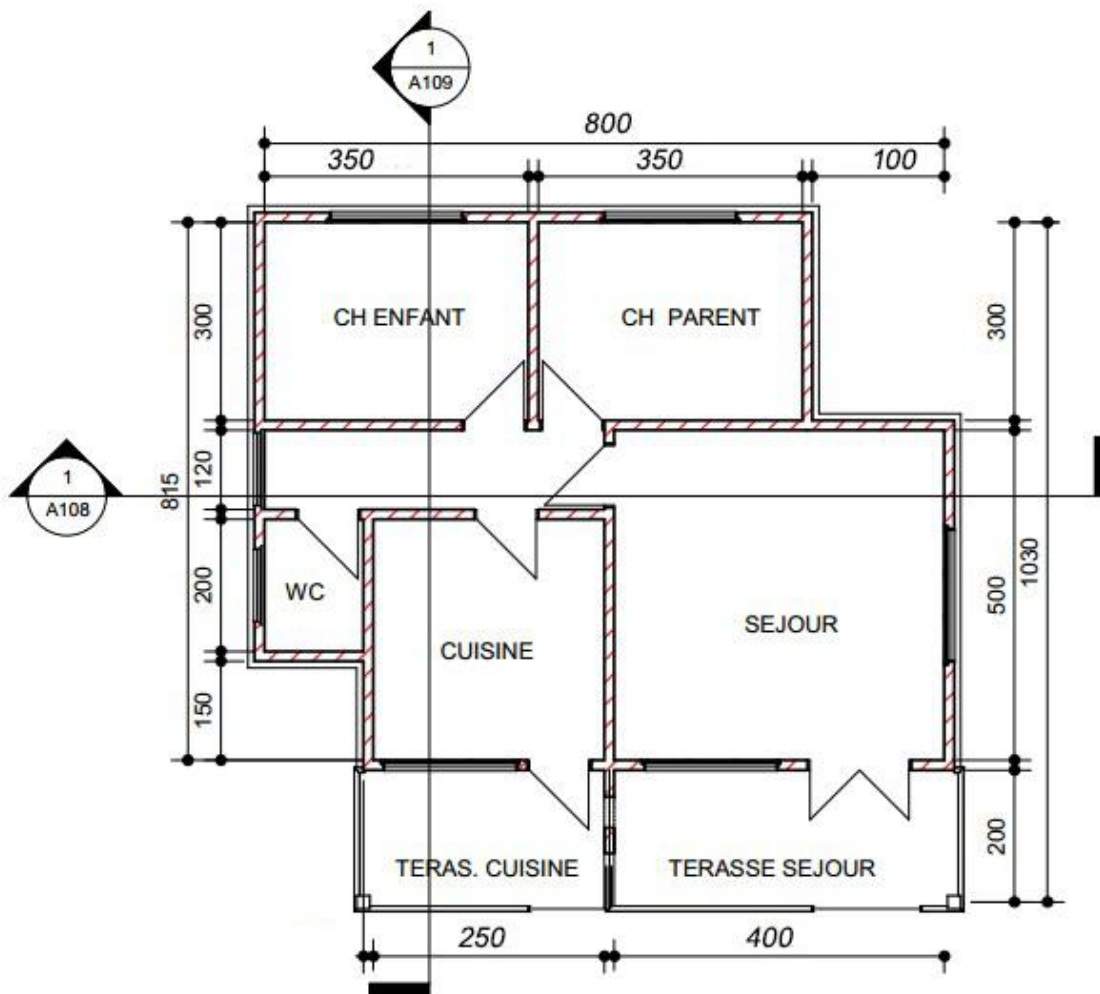
ANNEXES

1. Perspectives

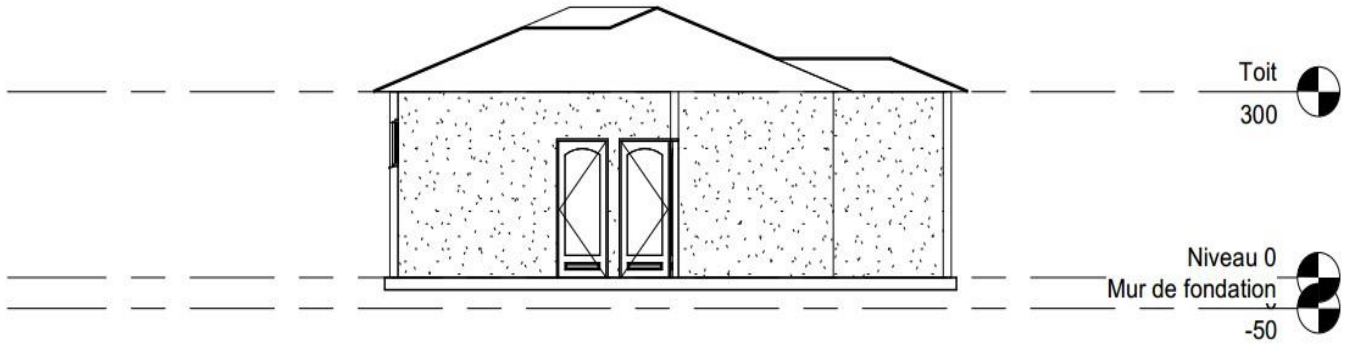




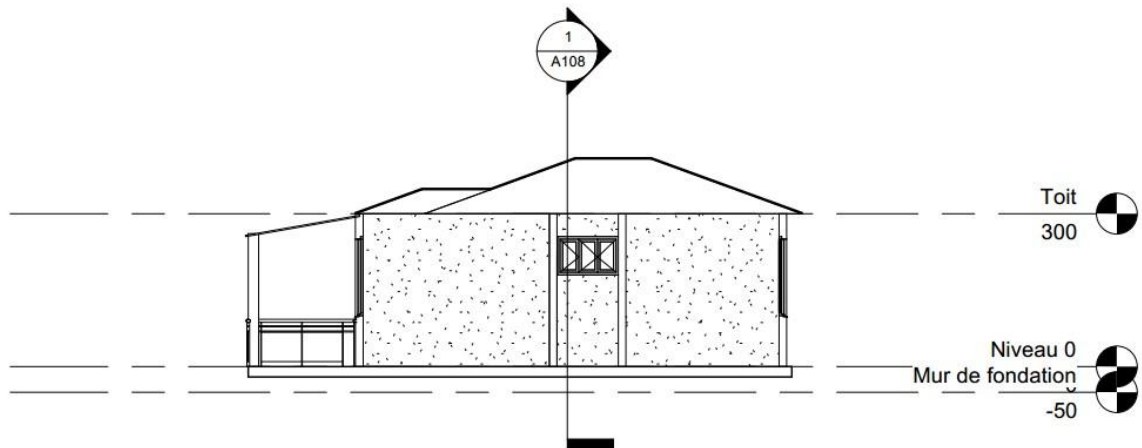
2. Vue en plan



3. Vue en coupe

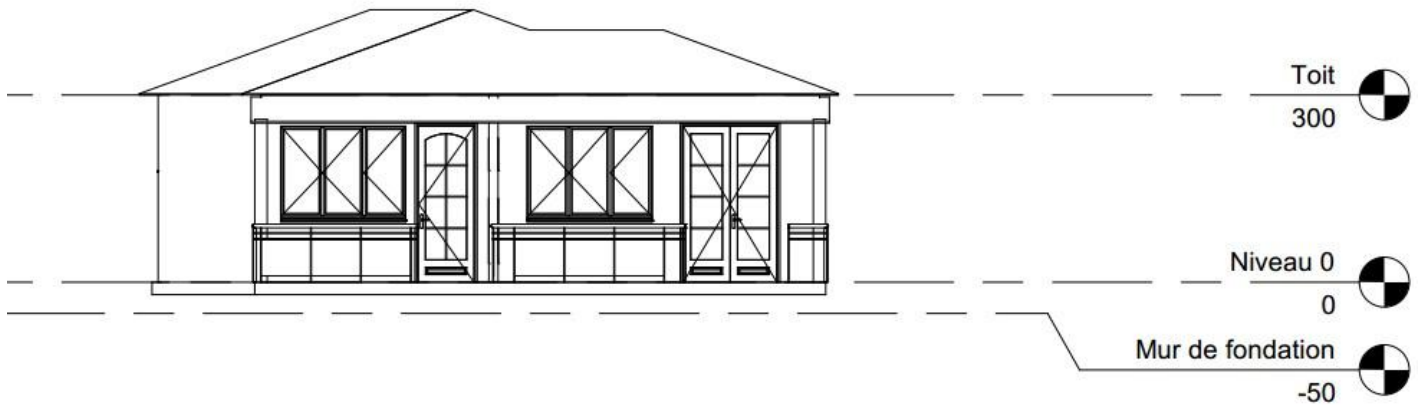


1 Coupe 1
1 : 100



1 Coupe 2
1 : 100

4. Façade principale



5. Façade droite

