REPUBLIQUE DU BURKINA FASO

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

UNITE D'ENSEIGNEMENT ET DE RECHERCHE DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE FIN DE FORMATION

POUR L'OBTENTION DU MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT

OPTION: GENIE CIVIL

THEME

ETUDE COMPARATIVE DE PLANCHERS A CORPS CREUX DE BETON ARME D'ACIER ET BETON ARME DE BOIS DE BORASSUS : APPLICATION A UNE VILLA DE TYPE F4

Présenté et soutenu publiquement le 11 juin 2011 par :

Omonlola Arnaude Colombe ***D*ANDJINOU**

Sous la direction de :

Dr Ing. Victor S**. GBAGUIDI**
Maître assistant des Universités
Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (BENIN)

Dr Ismaïla **GUEYE**
Dr Raffaeli **VINAI**
Enseignants Chercheurs au 2iE (BURKINA FASO)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Ismaïla **GUEYE**
Membres et correcteurs :

Dr Raffaeli **VINAI**
Dr Jean-Hugues **THOMASSIN**

Promotion : 2008 - 2011

REMERCIEMENTS

A mes parents Monsieur DANDJINOU Grégoire et Madame ATAKPA Marie-Chantal pour leur accompagnement,

A Monsieur ZOUNON Jean qui m'a donné la chance de découvrir le 2iE,

A Feu FREITAS Hyppolithe pour la rigueur et la discipline dont il a fait preuve tout au long de son enseignement,

A Monsieur BIAOU Angelbert pour ses conseils , recommandations, et soutien pour l'aboutissement de cette formation,

A Monsieur GBAGUIDI S. Victor et à tout le personnel de Engineering Consulting and Construction Office (ECCO-GC) pour leur prompt et chaleureux accueil,

A tout le personnel de l'Institut International de l'Ingenierie de l'Eau et l'Environnement notamment mesdames Sarah OUEDRAOGO, Conchita KEDOWIDE, Elodie HANFF, Nathalie WEISMAN et messieurs Frédéric TRAORE, Thiam SINAM , Fidel KABORE, Djim Doumbe DAMBA, Sébastien Kany GNOUMOU… pour leur soutien respectif tout au long de la formation,

A tous ceux qui de près ou de loin ont participé à l'édification de ma personne de quelque manière que ce soit que cette œuvre soit pour vous le témoignage de ma reconnaissance intarrissable ,

Foi, Détermination et sérénité sont mes crédo, pour une vie faite de plénitude en amour, de réussite , agrémentée de paix …

LISTE DES ABREVIATIONS

% : Pourcentage

MPa : Mégapascal

E : Module d'élasticité longitudinal

m : Mètre

cm : Centimètre

g : gramme

σ : Contrainte

ε : Déformation

= : Égale

N : Newton

KN : kilonewton

f_e : Limite d'élasticité

NFP : Norme Française

f_{cj} : Résistance à la compression du béton à j jours d'âge

f_{tj} : Résistance à la traction du béton à j jours d'âge

ν : Coefficient de poisson

ELU : Etat limite ultime

ELS : Etat limite de service

γ_b : Coefficient de sécurité du béton

γ_{bb} : Coefficient de sécurité du bois borassus

A : section d'armature

f_{bu} : Contrainte limite ultime du béton

f_{bb} : Contrainte limite ultime du bois borassus

M : moment

L : longueur

Sommaire

REMERCIEMENTS i
LISTE DES ABREVIATIONS ii
LISTE DES TABLEAUX iv
LISTE DES FIGURES v
RESUME vi
ABSTRACT vii
INTRODUCTION 2
1. PARTIE INTRODUCTIVE 3
1.1. GENERALITES ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 3
1.1.1. GENERALITES 3
1.1.2. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 4
1.2. LE BETON 11
1.2.1. Les résistances caractéristiques à la compression et à la traction 11
1.2.2. Les modules de déformation longitudinale instantanée et différée 12
1.2.3. Le diagramme contrainte-déformation 12
1.3. L'ACIER 14
2. PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT DES ARMATURES LONGITUDINALES DES POUTRES EN BETON ARME DE BOIS DE BORASSUS ET EN BETON ARME D'ACIER 16
2.1. DEFINITION DE LA FLEXION SIMPLE 16
2.2. HYPOTHESES DE CALCUL 16
2.2.1. HYPOTHESES GENERALES DE CALCUL 16
2.3. PRINCIPE DE CALCUL DES ARMATURES LONGITUDINALES DES POUTRES EN BETON ARME DE BOIS DE BORASSUS 20
2.4. PRINCIPE DE CALCUL DES POUTRES EN BETON ARME D'ACIER : cas des sections rectangulaire et en « T » 27
3. APPLICATION 29
3.1. PRESENTATION DE L'OBJET D'APPLICATION DE L'ETUDE : Bâtiment de type F4 29
3.2. PREDIMENSIONNEMENT DES PLANCHERS ET DETERMINATION DES CHARGES PERMANANTES ET D'EXPLOITATION 29
3.2.2. Charges permanentes (NF P 06-004) 31
3.2.3. Charges d'exploitation (NF P 06-001) 31
3.3. DIMENSIONNEMENT DES POUTRELLES 32
3.3.1. Descente des charges 33
3.3.2. Dimensionnement des poutrelles 33
3.5. COUT ESTIMATIF DES ARMATURES LONGITUDINALES 35
3.6. ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS 35
CONCLUSION 38
BIBLIOGRAPHIE 39
ANNEXES 41

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification du genre Borassus..... 4

Tableau 2:Caractéristiques physiques du Borassus aethiopium..... 9

Tableau 3 : Variation de μlu en fonction de fc28, θ, γ 23

Tableau 4 : Surface des pièces dans le bâtiment de type F4 29

Tableau 5: Hypothèses de descente des charges 29

Tableau 6: Détermination des sections géométriques du plancher 30

Tableau 7: Résultats de la détermination de la géométrie du plancher..... 30

Tableau 8: Charges surfaciques des planchers courant et inaccessible en béton armé de bois de Borassus et béton armé d'acier..... 31

Tableau 9: Charges d'exploitation surfaciques 31

Tableau 10: Variation de la section d'armatures comprimées en fonction de fc28 32

Tableau 11: Descente des charges sur poutrelles 33

Tableau 12: Tableau récapitulatif du dimensionnement de poutrelles..... 33

Tableau 13: Tableau récapitulatif du dimensionnement de poutres..... 34

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Chaîne d'exploitation du rônier. 7

Figure 2 : Loi typique de comportement du bois 11

Figure 3 : Diagramme de contrainte-déformation de calcul à l'ELU du bois de Borassus aethiopium. 11

Figure 4: Courbe contrainte-déformation de calcul à l'ELU du béton 13

Figure 5 : Diagramme contrainte-déformation de calcul à l'ELU de l'acier 14

Figure 6 : Pièce soumise à la flexion simple 16

Figure 7: Diagramme des déformations limites :Pivots A,B et C 17

Figure 8 : schéma illustrant les équations de compatibilité 18

Figure 9: Diagrammes contraintes-déformations 19

Figure 10 : Centre de gravité d'un demi-secteur parabolique 20

Figure 11: Diagramme de calcul de **μlu** 22

Figure 12: Equilibre des forces et moments dans le cas où **MU** > M**L**pour une poutre à section rectangulaire 23

Figure 13 : Equilibre des forces et moments dans le cas où **MU** ≤ **MR** pour une poutre à section en « T » 25

Figure 14 : Equilibre des forces et moments dans le cas où **MU1** > M**L** pour une poutre à section en « T » 26

Figure 15 : Vue en plan d'un panneau de dalle représentatif pour la descente des charges. ... 31

Figure 16 : section type d'une poutrelle 33

RESUME

Le rônier (*Borassus aethiopum* Mart.) est un palmier dont le bois est assez utilisé pour sa résistance mécanique et sa tenue aux intempéries dans les constructions traditionnelles et même modernes en Afrique. De par ses caractéristiques physiques et mécaniques, il peut être utilisé comme armatures dans le béton. Face à l'inexistence de principe de dimensionnement, son utilisation demeure empirique. Ainsi dans le présent mémoire, une méthode de dimensionnement des éléments soumis à la flexion simple a été développée. Il s'agit notamment de la détermination des sections d'armatures tendues et comprimées dans les poutres de sections rectangulaire et en ''T'' en béton armé de Borassus.

Les résultats nous ont conduits aux expressions du moment limite ultime pour les poutres armées de bois Borassus :

- $10^4 \mu_{lu} = 1660\ (\theta\gamma) + 34{,}08\ \frac{fc28}{\theta} - 1969\ pour$ fc28 ≤ 35 MPa
- La contrainte dans les armatures comprimées

$$\sigma_{sce} = 41{,}35 \text{ MPa}$$

- Pour un chargement identique de poutre travaillant en flexion simple, les sections des armatures tendues de bois de Borassus sont environ le double de celles d'acier.
- Les armatures longitudinales de borassus sont sept (07) fois moins chères que l'acier.

Mots clés : Rônier, armatures, flexion simple, poutre, section.

ABSTRACT

Borassus aethiopum is a palm tree of which the wood is used enough for its mechanical resistance as well as for its resistance to natural harsh conditions, in old construction of housing in Benin. Based on its physical and mechanical characteristics, it can be used as main reinforcement bars in concrete .But unfortunately, the unknown dimensional analysis bring into its empirical use. Through the present research work, a dimensional analysis has been developed for the simple bending beams. It can be used to calculate the tension and compression reinforcement bars of rectangular and "T" section beams with Borassus reinforced concrete.

As result the expression of bending moment above which compression reinforcement bars of Borassus are used is:

- $10^4 \mu_{lu} = 1660\ (\theta\gamma) + 34{,}08\ \frac{fc28}{\theta} - 1969$

  $for\ concrete\ caracteristic\ compression\ stress\ after\ 28\ days$: $\mathrm{fc28}\ \leq 35\ \mathrm{MPa}$
- Compression Borassus reinforcement bars stress :

$$\sigma_{sce} = 41{,}35\ \mathrm{MPa}$$

- For the same loaded beam working in simple bending, the area of tension reinforce the double of the steel ones.
- main Borassus reinforcement bars are seven times cheaper than the steel 's ones

Words: *Borassus palm*, reinforcement bars, simple bending,beam, section.

Partie I:

GENERALITES ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

Inventé par Joseph Louis LAMBOT en 1848, le béton armé a connu sa première utilisation grâce à Edmond COIGNET sur un immeuble à Biarritz et n'a cessé d'être utilisé jusqu'à nos jours. Sa consommation fulgurante, cause d'une demande supérieure à l'offre entraîne sa surenchère notamment celle de l'acier. Dans un contexte de dynamique de développement durable, il importe de faire la promotion des matériaux locaux.

C'est dans ce sens que les Professeurs GBAGUIDI Victor S., GBAGUIDI AISSE Gérard L., GIBIGAYE Mohamed, ADJOVI Edmond, AMADJI T. Armel de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (Bénin) et le Professeur SINSIN Brice A de la Faculté des Sciences Agronomiques, Université d'Abomey-Calavi (Bénin) ont axé une partie de leurs recherches sur l'utilisation du bois de Borassus comme armatures dans le béton.

En effet, le Benin pays en voie de développement remplit les conditions nécessaires pour la culture et l'utilisation du Borassus comme matériau local de construction.

Avec ses propriétés physiques (imputrescibilité, résistance aux xylophages marins et termites) et mécaniques (la résistance élevée en traction de ses fibres longitudinales, proche de celle de l'acier [1]) , le rônier paraît susceptible de remplacer ce dernier comme armatures principales dans les éléments de béton, telles que les poutres, pour des constructions modernes.

Malgré les qualités de ce bois qui lui confèrent un énorme avantage, son utilisation optimale se heurte à l'inexistence de méthodes de calcul de sections. C'est dans ce cadre que le présent mémoire s'est fixé comme objectif principal la détermination d'une méthode de calcul des armatures tendues et comprimées des pièces soumises à la flexion simple.

1. PARTIE INTRODUCTIVE

1.1. GENERALITES ET REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1.1. GENERALITES

1.1.1.1. OBJECTIFS

Le présent mémoire intitulé : « **ETUDE COMPARATIVE DE PLANCHER A CORPS CREUX EN BETON ARME D'ACIER ET BETON ARME DE BOIS DE BORASSUS : APPLICATION A UNE VILLA DE TYPE F4** » a pour objet, le dimensionnement des éléments porteurs (poutres et nervures) de béton armé de borassus.

L'objectif général est de faire ressortir une méthodologie de calcul des poutres en béton armé de bois de Borassus pour son utilisation efficiente. Il est décliné en trois objectifs spécifiques :

- ressortir le principe de dimensionnement des armatures longitudinales des poutres,
- obtenir les dimensions de la section d'une poutre soumise à la flexion simple
- déduire la configuration d'armature la plus économique

1.1.1.2. METHODOLOGIE ET RESULTATS ATTENDUS

Il s'agira :

- de déterminer les charges appliquées au plancher et de faire la descente des charges sur les éléments porteurs (poutres et poutrelles) ;
- à l'aide d'un programme de calcul conçu à partir d'Excel du pack Microsoft Office 2007, calculer les poutres et poutrelles dans le cas du béton armé d'acier et dans le cas de béton armé de bois de borassus ;
- de procéder à une comparaison des sections ainsi obtenues. Avant l'étude proprement dite, un tour d'horizon sur les travaux déjà effectués à ce propos s'avère nécessaire.

1.1.1.3. LES HYPOTHESES ET LIMITES DE L'ETUDE

Hypothèses

- Le bois de borassus joue le même rôle et travaille dans les mêmes conditions que l'acier dans une poutre en béton armé.
- Les hypothèses pour les poutres soumises à la flexion simple en béton armé d'acier sont valables ici.

Limites de l'étude

Le présent travail ne prend pas en compte le calcul des armatures transversales. L'état limite utilisé pour les matériaux (béton et bois de borassus) dans ce travail est l'état limite ultime de résistance.

1.1.2. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1.2.1. Le Borassus aethiopum Mart

Le rônier (Borassus) est un genre de palmier qui comprend neuf espèces natives des régions tropicales d'Afrique sahélienne, de l'Éthiopie, du Nigeria, du Nord du Togo, du Bénin, ….. , d'Asie et de la Nouvelle-Guinée. Originaire des plateaux éthiopiens, il fut découvert vers 1750 au Sénégal par le botaniste ADAMSON qui le baptisa « ron » comme les Ouolofs, mot qui ultérieurement fut transformé en « rônier » [2].

Tableau 1: Classification du genre Borassus

CLASSSIFICATION DU BORASSUS	
Règne	Végétal
Sous-règne	Eucaryotes
Super-Embranchement	Cormophytes
Embranchement	Spermaphytes
Sous-embranchement	Angiospermes
Classe	Monocotylédones
Ordre	Spadiciflores ou Spathifloraraleses
Familles	Arécacées ou Palmiers
Sous-familles	Borassoïdées
Tribu	Borassées
Sous-tribu	*Lataniinae*

Genre	*Borassus*
Espèces	*Borassus aethiopum* Mart, *Afrique Tropicale*
	Borassus deleb Becc. Soudan
	Borassus dichotomus Whotes Inde orientales,Asie du Sud-est
	Borassus heineana Becc. Nouvelle-guinée
	Borassus flabellifer Cambodge, L. Sri Lanka Inde,Asie du Sud-Est, Malaisie, Nouvelle Guinée
	Borassus madagascariensis Bojer & Becc

	Madagascar,Mayotte
	Borassus sundaica Becc. Soudan
	Borassus tunicata Lour Vietnam
	Borassus akeassii Bayton.Burkina Faso

Source :Malick Diallo,1987

Au BENIN, d'après les résultats des enquêtes, les populations interrogées ne reconnaissent qu'une seule espèce de rônier ; il s'agit du *Borassus aethiopum* [3].

- **DESCRIPTION DU Borassus aethiopum Mart**

Le rônier, encore connu sous le nom de « agontin » (fon : langue du Bénin) est un palmier dont la hauteur peut aller jusqu'à 25 m avec un fût long et droit atteignant les 60 cm de diamètre. Son stipe peut présenter jusqu'à trois renflements. Le premier débute entre 7 et 9 mètres de hauteur et peut se prolonger jusqu'à 10 ou 11 mètres à 20 ou 30ans, le deuxième vers 90ans et le troisième à 120ans, **[4].** Les rôniers peuvent posséder plusieurs troncs. Les feuilles, quant à elles sont longues, en éventail, flabelliformes et peuvent mesurer jusqu'à deux ou trois mètres de longueur. C'est un arbre de type dioïtique dont la floraison se passe sur des sujets séparés donnant lieu à des fruits de forme ovoïde, lisse et de couleur jaune marron ou orange comestibles sous forme de grappe.

Photo 1: Jeune plant de rônier Photo 2: Un plant de rônier adulte

❖ CONDITIONS OPTIMALES DE CROISSANCE

Il se développe sur des sols de types sablo- limoneux ou alluvionnaires et sous des pluviométries annuelles de l'ordre de 400 mm à 1600 mm. C'est un arbre indicateur de la présence d'eau à une faible profondeur et d'absence d'inondation prolongée grâce à son système pivotant et superficiel. Sa forte adaptabilité lui permet d'être planté en toute saison de l'année grâce à des semis de graines fraiches mise sous terre pendant 2 à 4 semaines.

Il se développe dans une température comprise entre 25°C et 35°C et nécessite une intense lumière. Notons que le rônier a une très lente croissance environs 30 à 40 cm par an.

Photo 3: Fruit mure du *Borassus*

❖ UTILISATION DANS LA CONSTRUCTION

Classé parmi les espèces à vocation de bois d'œuvre en Afrique intertropicale [5], le rônier fait partie des bois traditionnellement acceptés ou localement utilisés pour les travaux portuaires et la construction navale [2]. Il a une forte densité et il résiste bien aux termites et aux xylophages marins. C'est un bois qui peut conserver son intégrité en usage pendant plusieurs siècles. L'usage du bois de rônier comme matériau de construction est d'une tradition très ancienne et remonte même au néolithique [4].

Par ailleurs, les pieds de rônier destinés à la construction sont ceux coupés sur le mâle à cause de la faible résistance de la structure de la femelle. Une fois abattu, on scie à quelques centimètres en dessous du renflement et au dessus du sol. Cette opération porte le nom de tronçonnage et a pour but d'obtenir un stipe de 5 à 10 m de long ayant une valeur commerciale .Ensuite, on procède au fendage du stipe en des lattes sur lesquelles sont retirés la fibre moelle .N'ayant besoin d'aucun

traitement (bois imputrescible), les lattes sont simplement séchées.

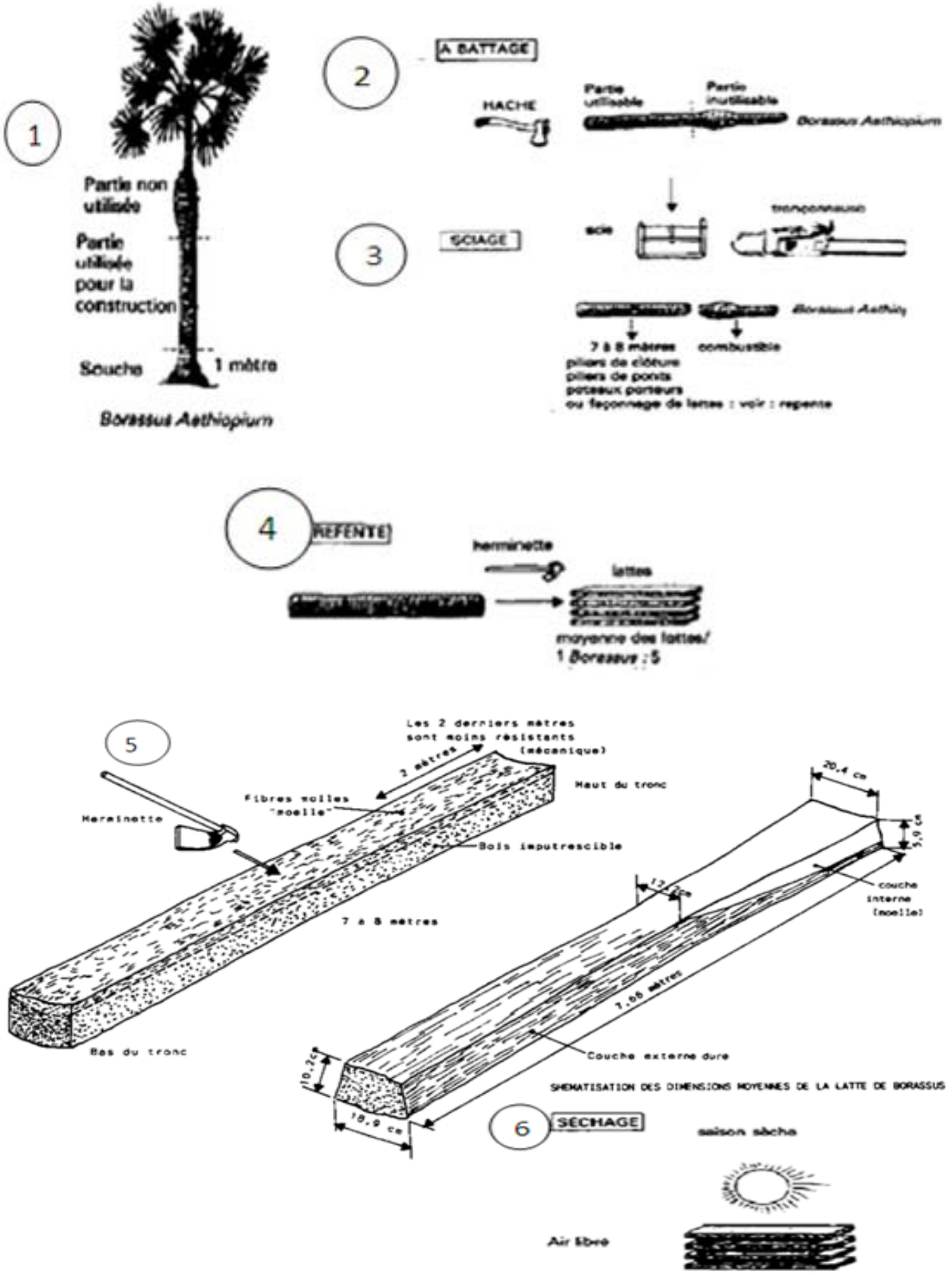


Figure 1 : ***Chaîne d'exploitation du rônier.***

Il a été très utilisé dans la construction pendant l'époque coloniale dans la ville de Porto Novo comme :

- ✓ montant, diagonale et arbalétrier pour la réalisation des fermes et, comme panne, chevron, en tant qu'éléments de répartition
- ✓ poutre, sont consacrés par la technique de réalisation des planchers utilisant des planches en bois d'Iroko qui prennent appui sur des poutres en bois de rônier.
- ✓ Dans les constructions traditionnelles (constructions en terre), le rônier est utilisé sous forme de platelage servant de linteau pour assurer la continuité des murs après la réalisation des baies de portes et de fenêtres [3].

Une utilisation très récente du Borassus aethiopum en tant que armatures pour des poteaux raidisseurs dans la construction est la construction d'une villa par le cabinet SECCART du Dr GBAGUIDI AISSE Gérard pour le compte de MÄNTELE ENWEANI B. une ressortissante allemande et Professeur de langue qui pour des raisons de santé ne peut vivre dans des bâtiments construits en béton armé d'acier. (Voir Annexes N°2)

1.1.2.2. CARACTERISTIQUES DU Borassus aethiopum

Bien que l'utilisation du rônier dans la construction remonte à la nuit des temps, le choix des sections est demeuré jusque là empirique. C'est pour combler ce vide que l'Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi a lancé plusieurs thèmes de recherches pour une meilleure caractérisation de Borassus aethiopum. Ainsi,

→ AHONOU et al (2004), KANTCHEDE et al (2005), **[6]** dans leurs travaux de recherches sous la direction de GBAGUIDI A. G. sur le matériau bois en particulier le bois de Borassus , se sont intéressés à la détermination du point de saturation des fibres moyennes, du module d'élasticité longitudinal moyen, de la contrainte de rupture moyenne en flexion statique, de la contrainte de rupture moyenne en compression parallèle, de la densité moyenne, du retrait volumique total moyen. Les résultats présentés par AHONOU et al, (2004) ne sont pas contradictoires à ceux de KANTCHEDE et al, (2005) à un taux d'humidité de 20% du matériau. BARMINAS et al, (2006) sont allés plus loin en s'intéressant à la composition chimique du Borassus aethiopum. Ainsi, de leurs études, il ressort que le Borassus aethiopum contient 0,08% de cendres, 0,18% de protéines brutes, 0,26% la fibre brute, 0,09% du total des lipides, et 26,18% amylose.

→ Abdel BOUSSARI (2008), **[7]** a déterminé quelques caractéristiques mécaniques du borassus à un taux d'humidité d'environ 12% présentés comme suit :

- Module de YOUNG $E_L^{12} = 14689{,}91\text{MPa}$ à 12% d'humidité, la cote de raideur $C_r = 46{,}50$ à 12 % et la contrainte de rupture $\sigma_{rupt} = 112{,}15\text{MPa}$ à 12% d'humidité en flexion 3 points.
- Module de YOUNG E_L^{12} =17796,85 MPa à 12% d'humidité et la contrainte de rupture $\sigma_{rupt} = 89{,}85$ MPa à 12 % d'humidité en flexion 4 points.
- Module de YOUNG $E_{CL}^{12} = 16739{,}08$ MPa à 12% d'humidité, la contrainte de rupture en compression longitudinale $\sigma_{ruptL} = 62{,}40$ MPa à 12 % d'humidité et la contrainte de rupture en compression transversale $\sigma_{ruptT} = 22{,}56$ MPa à 12 % d'humidité.
- Le coefficient de poisson dans la direction LT (Longitudinale Transversale) $\nu = 0{,}32$.

La cote de cisaillement transversale $C_{csTRANS} = 151{,}47$ N et la cote de cisaillement longitudinale $C_{csLONG} = 9{,}72$ N

Tableau 2:Caractéristiques physiques du Borassus aethiopium

Infradensité* (norme NFB51-005)		0,69 g/cm3
Coefficient de gonflement par rapport à l'état de récupération	dans la direction longitudinale	0%
	Dans direction tangentielle	2,37%
	dans la direction radiale	2,45%
	pour le taux d'absorption de l'eau	31,49%
coefficients de retrait par rapport à l'état anhydre	dans la direction longitudinale	0
	dans la direction radiale	6,16
	dans la direction tangentielle	5,16
	pour le taux d'humidité	48,97
	pour le taux de retrait de l'eau	109,78
	pour le volume	12,21

*la mesure des masses anhydres (qui ne contiennent pas d'eau) et des volumes à l'état de saturation des éprouvettes.

→ VODOUNSI B. N., **[8],** montre que

- Le négrolin séché est un imperméabilisant efficace sur le rônier en ce sens qu'il améliore l'adhérence car les poutres de rônier traité au négrolin ont une charge de fissuration et de rupture (45 KN et 49,5 KN) supérieure à celle non traitées (36,67 KN et 45 KN) soit des regains respectifs de 9,08% et 10% ;

- Aussi, les poutres de rônier traitées au négrolin ont une rigidité correspondant à la zone d'apparition des premières fissurations K_{1PARN} (33.67KN/mm) supérieur à celle des poutres de rônier sans traitement K_{1PAR} (31.58KN/mm) soit un regain de 6.62%. Par ailleurs la deuxième rigidité K_{2PARN} (22.64KN/mm) est trois fois supérieure à celle de poutre de rônier non traité K2PAR (8.95KN/mm). Cela révèle que l'imperméabilisation réussie à augmenté la capacité portante du bois (puisque c'est lui qui travaille en deuxième zone).
- Les courbes effort-flèche des poutres armées de rônier montrent non seulement qu'elles se superposent bien pour une même catégorie de poutres armées de rônier mais également que leur allure est la même d'une catégorie à une autre. De plus le modèle représentatif de ces courbes réalisées, a la même allure que celle des courbes effort-flèche des poutres armées d'acier. Ceci nous permet d'affirmer que les poutres armées de rônier ont le même comportement entre elles et que ce comportement est le même que celles des poutres armées d'acier.

→ AHOUSSINOU I.et OROUNLA M. (2010) **[9],**

- L'essai de traction directe qui a permis de déterminer pour un taux d'humidité du bois à 12%, des résultats tels que : résistance à la limite élastique $f_e^{12} = 224\text{MPa}$ avec un écart-type de 38MPa ; la résistance à la rupture $\sigma_r^{12} = 303\text{MPa}$ avec un écart-type 37MPa et un allongement limite $\epsilon_{bb}^{12} = 10‰$ avec $E_L^{12} = 17\,796{,}85\text{MPa}$ **.**
- Les charges de rupture expérimentales des poutres offrent des coefficients de sécurité allant jusqu'à 1,35.
- Aussi, les crénelures en rainures alternées offrent une meilleure adhérence béton-bois rônier. Mais aussi pour éviter le problème de retrait faut-il les enrober d'une couche de bitume.

Il importe de savoir que la résistance mécanique du bois dépend des paramètres suivants :

- L'essence ;
- La direction de sollicitation par rapport aux fibres (anisotropie) ;
- L'humidité (hygroscopie) ;
- Le mode de sollicitation (traction, compression,…….).

Le comportement du bois dans le sens des fibres peut être considéré comme élastique fragile en traction et élasto-plastique en compression

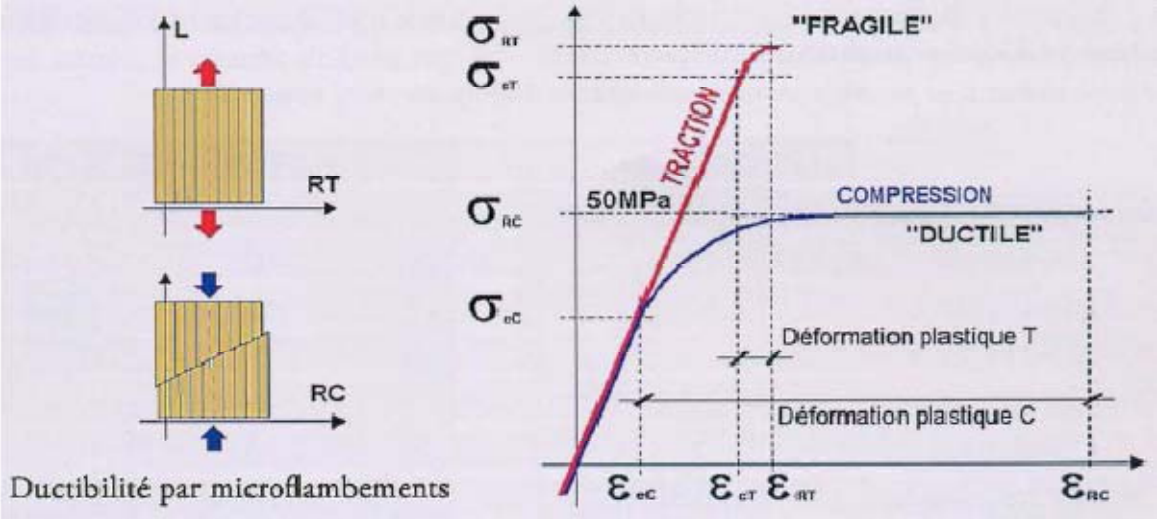
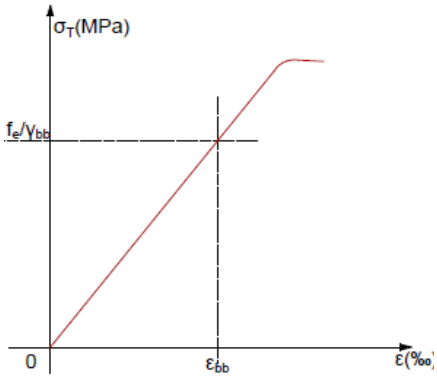


Figure 2 : ***Loi typique de comportement du bois***

Source : KULTIKOVA, E.V., 1999.



Les armatures bois de rônier ont atteint leur limite élastique de calcul $\frac{f_e}{2}$ et un certain allongement ϵ_{bb}. Le coefficient de sécurité γ_{bb} est pris égal à 2 compte tenu de la variation des propriétés mécaniques du bois suivant certains paramètres.

Figure 3 : ***Diagramme de contrainte-déformation de calcul à l'ELU du bois de Borassus aethiopium.***

1.2. LE BETON

Le béton est un mélange de sable, gravier, ciment, eau et peut-être adjuvants dans des proportions bien déterminées. Quelques caractéristiques sont à retenir pour un meilleur dimensionnement. Il s'agit :

1.2.1. Les résistances caractéristiques à la compression et à la traction

- La résistance caractéristique à la compression : Elle est définie comme la valeur de la résistance obtenue sur un échantillon avec 95% d'occurrence.

  Pour des résistances $f_{c_{28}} \leq 40$ MPa :

$$\begin{cases} f_{c_j} = \frac{j}{4{,}76+0{,}83j} f_{c_{28}} & \text{si } j < 60 \text{ jours} \\ f_{c_j} = 1{,}1 f_{c_{28}} & \text{si } j > 60 \text{ jours} \end{cases}$$

Pour des résistances $f_{c_{28}} > 40$ MPa :

$$\begin{cases} f_{c_j} = \frac{j}{1{,}40+0{,}95j} f_{c_{28}} & \text{si } j < 28 \text{ jours} \\ f_{c_j} = f_{c_{28}} & \text{si } j > 28 \text{ jours} \end{cases}$$

- La résistance caractéristique à la traction du béton à j jours, notée f_{tj} est définie conventionnellement par la relation :

$$\begin{cases} f_{t_j} = 0{,}6 + 0{,}06 f_{c_j} & \text{si } f_{c_{28}} \leq 60 \text{ MPa} \\ f_{t_j} = 0{,}275 f_{c_j}^{2/3} & \text{si } f_{c_{28}} > 60MPa \end{cases}$$

1.2.2. Les modules de déformation longitudinale instantanée et différée

Les modules de Young instantané E_{ij} et différé E_{vj} sont utilisées respectivement pour les cas de chargement de durée inférieure à 24 heures et supérieure à 24 heures.

- Le module de Young différé du béton dépend de la résistance caractéristique à la compression du béton :

$$\begin{cases} E_{vj} = 3700 f_{c_j}^{1/3} & \text{si } f_{c_{28}} \leq 60\text{MPa} \\ E_{vj} = 4400 f_{c_j}^{1/3} & \text{si } f_{c_{28}} > 60\text{MPa, sans fumée de silice} \\ E_{vj} = 6100 f_{c_j} & \text{si } f_{c_{28}} > 60\text{MPa, avec fumée de silice} \end{cases}$$

- $E_{ij} = 3E_{vj}$
  On prend généralement le module de Young du béton égale $E_b \approx 13\,000$MPa soit le 1/15 de celui l'acier et 17796/13000 pour le Borassus.

1.2.3. Le diagramme contrainte-déformation

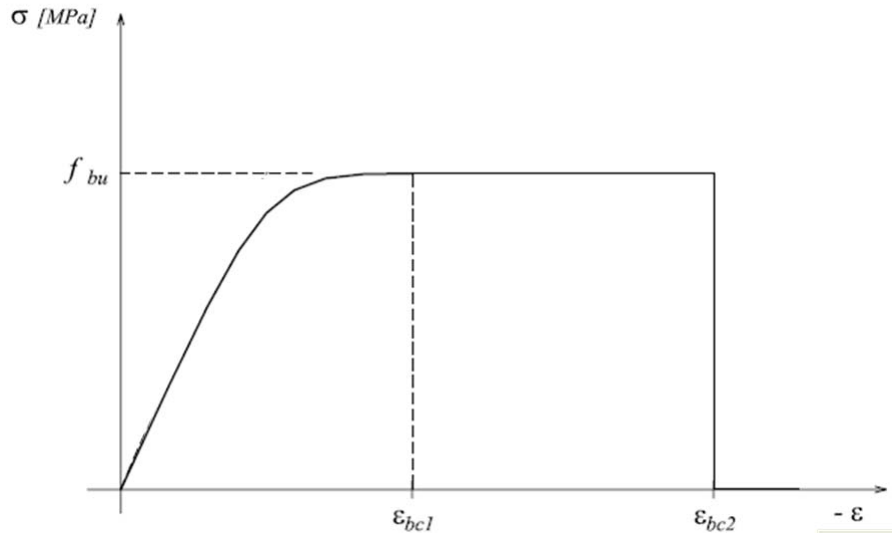


Figure 4: ***Courbe contrainte-déformation de calcul à l'ELU du béton***

- $\epsilon_{bc1} = 2$ ‰
- $\epsilon_{bc1} = \begin{cases} 3{,}5 \text{ ‰} & \text{si } f_{c_j} \leq 40 \text{ MPa} \\ (4{,}5 - 0{,}025 f_{c_j}) \text{ ‰} & \text{si } f_{c_j} > 40 \text{ MPa} \end{cases}$

La valeur de calcul de la résistance en compression du béton f_{bu} est donnée par :

$$f_{bu} = \frac{0{,}85 f_{c_j}}{\theta . \gamma_b}$$

Où

Le coefficient de sécurité partiel γ_b vaut 1,5 pour les combinaisons fondamentales et 1,15 pour les combinaisons accidentelles,

- θ est un coefficient qui tient compte de la durée d'application des charges :

$\theta = 1$ si la durée est supérieure à 24h, $\theta = 0{,}9$ si la durée est comprise entre 1h et 24h et $\theta = 0{,}85$ si non.

1.2.4. Déformation due au retrait et dilatation thermique

- La déformation due au retrait

Après coulage, une pièce de béton conservée à l'air tend à se raccourcir. Ceci est dû à l'évaporation de l'eau non liée avec le ciment et peut entraîner des déformations de l'ordre de 1.5 10-4 à 5 10-4selon l'humidité de l'environnement.

- La dilatation thermique

Le coefficient de dilatation du béton vaut de 9 à 12.10-6 $°C^{-1}$, et on adoptera une valeur forfaitaire de 10-5 $°C^{-1}$ pour le béton armé.On notera que la valeur du coefficient de dilatation

du bois en général, est en moyenne de (5.10-6 $℃^{-1}$) dans la direction axiale, ce qui est inférieure à celle du béton.

1.3. L'ACIER

1.3.1. Module d'élasticité longitudinale E_s= 200000MPa

1.3.2. Diagramme déformation-contrainte

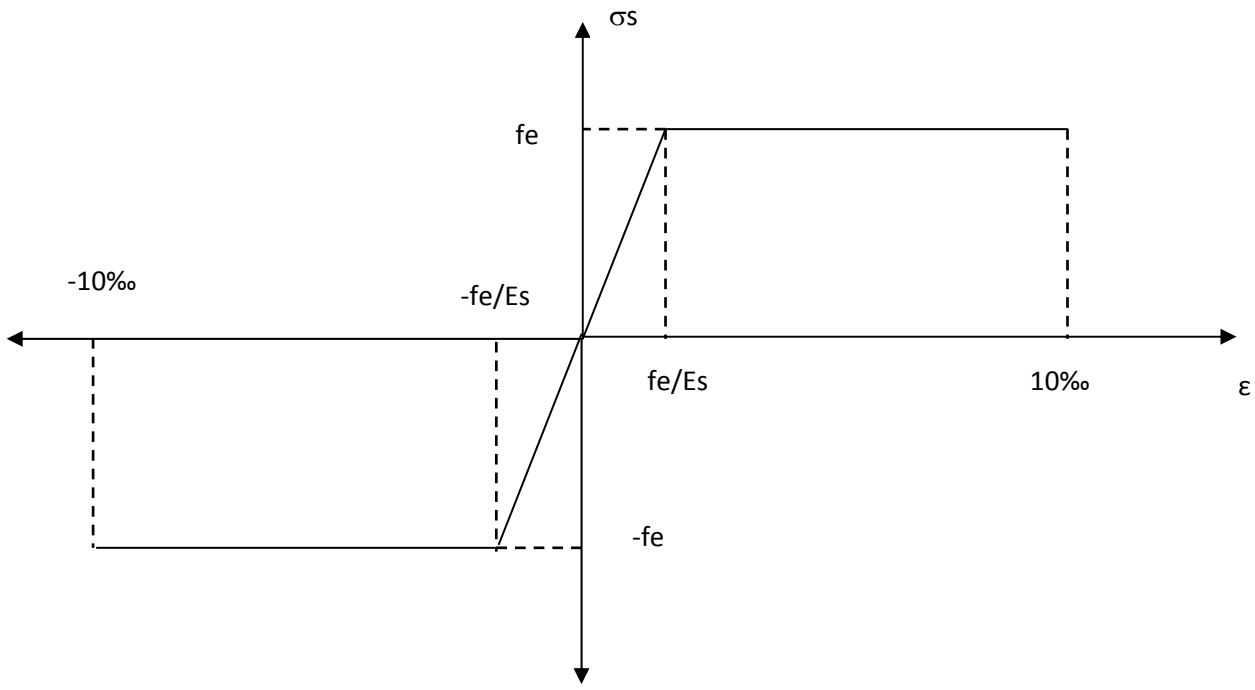


Figure 5 : ***Diagramme contrainte-déformation de calcul à l'ELU de l'acier***

Partie II:

PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT DES ARMATURES LONGITUDINALES DES POUTRES EN BETON ARME DE BOIS DE BORASSUS ET EN BETON ARME D'ACIER.

2. PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT DES ARMATURES LONGITUDINALES DES POUTRES EN BETON ARME DE BOIS DE BORASSUS ET EN BETON ARME D'ACIER.

2.1. DEFINITION DE LA FLEXION SIMPLE

L'objectif fixé dans cette section est de faire ressortir le principe de calcul d'une poutre soumise à la flexion simple. Ainsi, il importe de :

- ✓ définir ce qu'est la flexion simple,
- ✓ de faire ressortir les principes généraux qui sous-tendent ce calcul
- ✓ et enfin de faire une application.

Une poutre est dite soumise à la flexion plane simple lorsqu'elle est soumise à l'action de forces contenues dans des plans normaux à la ligne moyenne et disposées symétriquement par rapport au plan moyen ou à l'action de couples d'axe perpendiculaire à ce plan ;

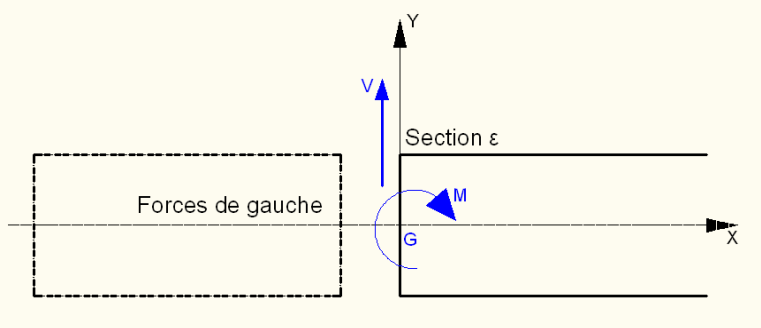


Figure 6 : ***Pièce soumise à la flexion simple***

Intéressons- nous aux hypothèses qui gouvernent le calcul.

2.2. HYPOTHESES DE CALCUL

2.2.1. HYPOTHESES GENERALES DE CALCUL

Trois hypothèses générales sont à distinguer pour tous les états limites. Rappelons qu'un état limite est un état particulier dans lequel une condition requise pour une construction est strictement satisfaite et cesserait de l'être en cas de modifications défavorables de l'une des charges ou actions appliquées sur la construction. C'est donc dire qu'au-delà de cet état limite, la structure cesse de remplir les fonctions pour les lesquelles elle a été dimensionnée. On distingue :

- Les états limites ultimes qui correspondent à la valeur maximale de la capacité portante :

- Equilibre statique,
- Résistance de la structure ou de l'un de ses éléments,
- Stabilité de forme….

- Les états limites de service qui constituent les frontières au-delà desquelles les conditions normales d'exploitation et de durabilité de la construction ou de l'un de ses éléments ne sont plus satisfaites :
  - Ouverture excessive des fissures,
  - Déformation excessive des éléments porteurs,
  - Vibration inconfortable pour les usagers, etc.….

Ainsi quelque soit l'état limite dans lequel on se retrouve, la structure doit satisfaire à ce qui suit :

- ✓ Principe de Navier-Bernoulli qui stipule qu'au cours de la déformation d'une pièce, ses sections droites restent planes et conservent leurs dimensions.
- ✓ La résistance du béton en traction est supposée nulle lors des calculs de résistance
- ✓ Et enfin, par adhérence, les déformations relatives subies par l'acier ou le Borassus dans le béton sont les mêmes que celles du béton.

Dans la présente étude, rappelons que le bois de borassus utilisé dans le calcul suivant est à un taux d'humidité de 12%. Ceci nous amène à considérer alors la règle des trois pivots qui stipule que :

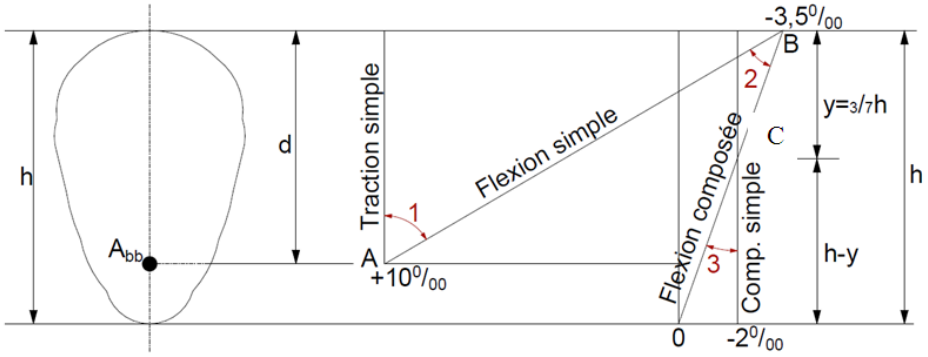


Figure 7: ***Diagramme des déformations limites : Pivots A, B et C***

✓ Dans le domaine 1 le diagramme passe par le pivot A qui correspond à un allongement de 10‰ de l'armature la plus tendue supposée concentrée en son centre de gravité. Soit un allongement ultime des armatures bois rônier limité à $\varepsilon_{bbu} = 10\ ‰$ (Pivot A) ou un allongement ultime de l'acier est limité à $\varepsilon_{su} = 10\ ‰$ dans le cas du béton armé.

- ✓ Dans le domaine 2 le diagramme passe par le point B qui correspond à un raccourcissement de 3,5‰ de la fibre la plus comprimée. Le raccourcissement relatif du béton en compression par flexion est fixé à $\varepsilon_{bcu} = 3.5$ ‰ (Pivot B)
- ✓ Dans le domaine 3 le diagramme passe par le point C qui correspond à un raccourcissement de 2‰ du béton à une distance de la fibre la plus comprimée égale à 3/7 de la hauteur totale h de la section (Rapport de similitude des triangles). Le raccourcissement relatif du béton en compression centrée est $\varepsilon_{bcu} = 2$ ‰ (Pivot C)

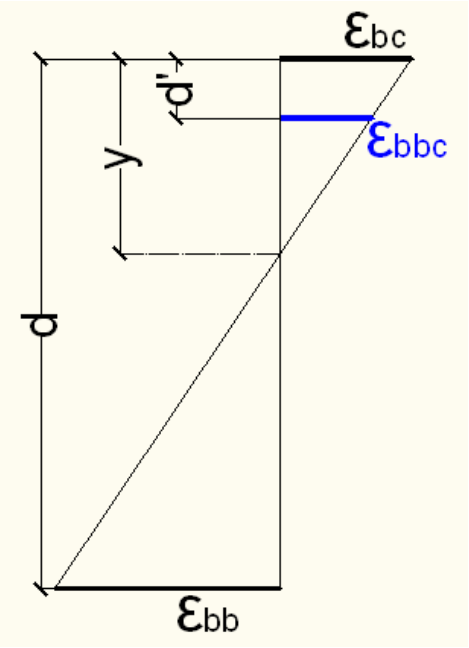
Notons que dans le cas d'une flexion simple le diagramme des déformations passe soit par le pivot A, soit par le pivot B à l'exclusion du pivot C.

2.2.2. LES EQUATIONS D'EQUILIBRE DE LA STATIQUE ET L'EQUATION DE COMPATIBILITE DES DEFORMATIONS

Faire ressortir le principe de dimensionnement des poutres en béton armées de Borassus revient à déterminer :

- la distance de l'axe neutre aux fibres les plus comprimées : y
- la contrainte dans les matériaux sollicités
- et les sections d'armatures.

Soit au moins trois (03) inconnues. C'est donc dire qu'il nous faut un système d'au moins trois équations que sont :



- ✓ L'équation de la statique d'équilibre des forces qui stipule que la résultante des efforts internes (La Force F_b développée par la section de béton comprimée et la force F_{bb} développée par les armatures de bois) doit être nulle car flexion simple :

$$F_b + F_{bb} = 0$$

- ✓ L'équation de la statique d'équilibre des moments : les forces internes (Fb et Fbb) doivent constituer un couple équilibrant le moment agissant Mu

$$\mathbf{M_u = F_b \times Z = F_{bb} \times Z}$$

Figure 8 : ***schéma illustrant les équations de compatibilité***

✓ Et les équations de compatibilités :

Posons $y = \propto d$ et $\delta' = \frac{d'}{d}$ dans tous les cas

On a $\frac{\varepsilon_{bc}}{y} = \frac{\varepsilon_{bbc}}{y-d'} = \frac{\varepsilon_{bb}}{d-y}$

A l'ELU, au pivot A $(\varepsilon_{bbu} = 10\ ‰)$

$\varepsilon_{bcu} = 10\ ‰ \frac{\alpha}{1-\alpha}$ et $\in_{bbcu} = 10\ ‰ \frac{\alpha-\delta\prime}{1-\alpha}$

Au pivot B $(\varepsilon_{bcu} = 3{,}5\ ‰)$;

$\in_{bbu} = 3{,}5\ ‰ \frac{1-\alpha}{1-\alpha}$ $\in_{bbcu} = 3{,}5\ ‰ \frac{\alpha-\delta\prime}{1-\alpha}$

2.2.3. SIMPLIFICATION DU DIAGRAMME DES CONTRAINTES DEFORMATION DU BETON

Bien que le diagramme des contraintes dans le béton soit de type parabole-rectangle ; il sera simplifié et ramené à un diagramme rectangulaire de même surface et de même centre de gravité comme le montre la figure suivante :

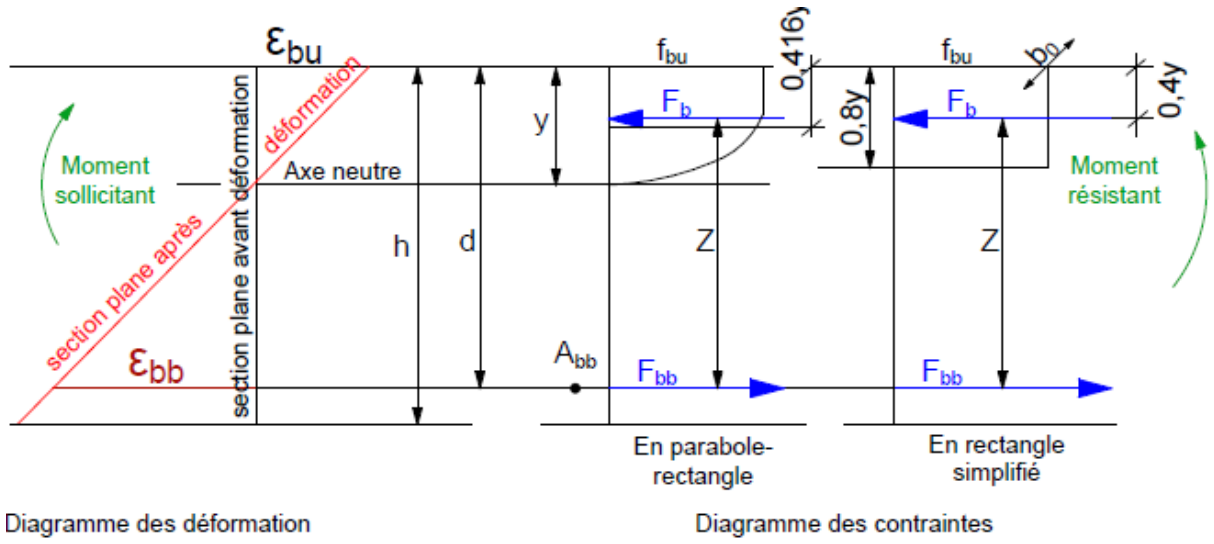
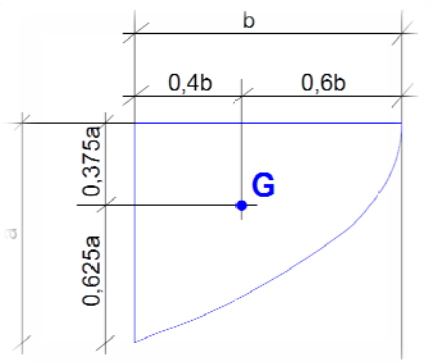


Figure 9: ***Diagrammes contraintes-déformations***

✓ Dans le cas du diagramme en parabole-rectangle, le coefficient de remplissage est le rapport entre l'aire de la parabole-rectangle et celle du rectangle circonscrit. On a ψ=0,81.

✓ On a indiqué sur le croquis ci-dessous les coordonnées du centre de gravité d'un ½ secteur parabolique dont l'aire est égale à – .



Une fois les différentes hypothèses posées, nous nous intéressons au principe de dimensionnement proprement dit.

Figure 10 : ***Centre de gravité d'un demi-secteur parabolique***

2.3. PRINCIPE DE CALCUL DES ARMATURES LONGITUDINALES DES POUTRES EN BETON ARME DE BOIS DE BORASSUS

2.3.1. CAS D'UNE SECTION RECTANGULAIRE b x h

Supposons une section rectangulaire de largeur b ; la résultante des forces internes de béton comprimé : et elle est appliquée à la distance de la fibre supérieure ; d'où ; Zétant le bras de levier du couple des forces internes.

Dans le cas du diagramme-rectangulaire simplifié,

.

Soit la force développée par le bois tendu avec la section d'armatures de bois Borassus tendue et .la contrainte limite d'élasticité de calcul

.

; pour l'équilibre des forces internes

Soit Mu le moment sollicitant

———

Posons ——— ; (1)

Après résolution de (1) ; on a : ——— avec

Pour

Soit $\mathbf{M_R}$ le moment de référence qui permet de savoir si on est au pivot A ou B

$M_R = 0{,}186\, b \times \mathrm{d}^2 \times \mathrm{f_{bu}}$

2.3.1.1. **1er cas : $M_U \leq M_R$** Pivot A ; pas d'armatures comprimées

La section des armatures tendues est $\mathrm{A_b} = \frac{\mathrm{M_U}\ \gamma_{bb}}{\mathrm{Z} \times \mathrm{f_{ed}}}$ avec $\begin{cases} z = d\ (1 - 0{,}4 \propto). \\ \propto = 1{,}25\ (1 - \sqrt{1 - 2\mu_{bu}}) \\ \mu_{bu} = \frac{M_U}{b \times \mathrm{d}^2 \times \mathrm{f_{bu}}} \end{cases}$

2.3.1.2. **2eme cas : $M_U > M_R$** Pivot B ; Utilisation maximale du béton. Dans ce cas nous avons intérêt à maintenir le taux de travail du bois le plus élevé possible ne nécessitant pas d'armatures comprimées.

Détermination de $\mathbf{M_L}$; le moment limite ultime au-delà duquel, il faut placer des armatures comprimées de bois

$\mathrm{Mu} = \mathrm{A_b} \times \frac{\mathrm{f_e}}{\gamma_{bb}} \times \mathrm{d}\ (1 - 0{,}4\alpha\ )$; et $\mu_{bu} = \frac{M_U}{b \times \mathrm{d}^2 \times \mathrm{f_{bu}}}$ et $\mathrm{f_{bu}} = 0{,}85 \frac{\mathrm{f_{c28}}}{\theta \gamma_b}$

$$\mu_{bu} = \frac{\mathrm{A_b} \times \mathrm{f_e} \times \mathrm{d}\ (1 - 0{,}4\alpha\ )}{\gamma_{bb}} \times \frac{\theta \times \gamma_b}{0{,}85 \times b \times \mathrm{d}^2 \times \mathrm{f_{c28}}}$$

$$\mu_{bu} = \frac{\mathrm{A_b}}{b \times \mathrm{d}} \times \frac{\mathrm{f_e} \times (1 - 0{,}4\alpha\ )\theta \times \gamma_b}{0{,}85 \times \gamma_{bb} \times \mathrm{f_{c28}}};\ \frac{\mathrm{A_b}}{b \times \mathrm{d}} = \mu_{bu} \times \frac{0{,}85 \times \gamma_{bb} \times \mathrm{f_{c28}}}{\mathrm{f_e} \times (1 - 0{,}4\alpha\ )\theta \times \gamma_b}$$

Or $\propto = 1{,}25\ (1 - \sqrt{1 - 2\mu_{bu}})$; $1 - 0{,}4 \propto = 0{,}5\ (1 - \sqrt{1 - 2\mu_{bu}})$

D'où $\frac{\mathrm{A_b}}{b \times \mathrm{d}} = \frac{0{,}85 \times \gamma_{bb}}{0{,}5 \gamma_b} \times \frac{\mathrm{f_{c28}}}{\theta \mathrm{f_e}} \times \frac{\mu_{bu}}{(1 - \sqrt{1 - 2\mu_{bu}})}$

$$\rho_0 = n \frac{\mathrm{A_b}}{b \times \mathrm{d}}\ ;\ \mathrm{n} = \frac{E_{bb}}{E_b};\ E_{bb} = 17796\ MPa;\ E_b = 13000 MPa$$

Une fois les différents paramètres connues, nous procédons à des itérations jusqu'à trouver la valeur de μ_{lu} (Voir Annexes N°3) le montre le diagramme de calcul suivant.

DIAGRAMME DE CALCUL DE μ_{lu}

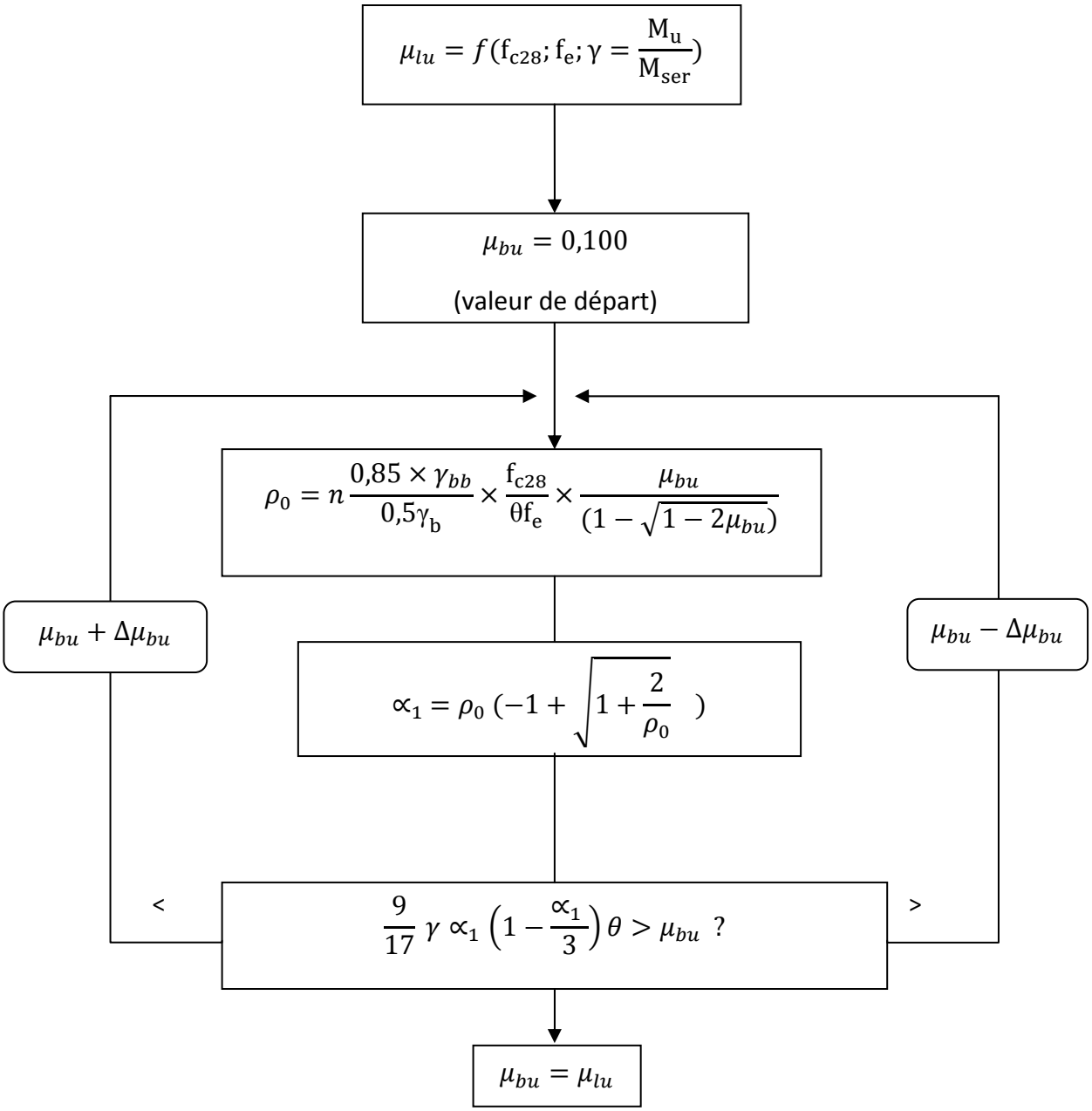


Figure 11*: Diagramme de calcul de* μ_{lu}

$$M_L = \mu lu\ b \times d^2\ \times f_{bu}$$

DETERMINATION DE L'EXPRESSION DE μ_{lu}

Posons $\mu_{lu} = A\ (\theta\gamma) + B\ \frac{fc28}{\theta} + Cfe$

Avec les valeurs obtenues par itérations formons un système de trois (03) pour déduire les valeurs de A, B et C.

Tableau 3 : Variation de u_{lu} en fonction de fc28, θ, γ

fc28 (MPa)	θ	γ	μlu
30	1	1,5	0,1371
30	1	1,45	0,1288
35	1	1,5	0,1541

Et nous obtenons le système d'équation $\begin{cases} 1{,}5A + 30B + 224C = 0{,}1371 \\ 1{,}45A + 30B + 224C = 0{,}1288 \\ 1{,}5A + 35B + 224C = 0{,}1541 \end{cases}$

Après résolution, nous obtenons : $\begin{cases} A = 0{,}1660 \\ B = 0{,}003408 \\ C = -0{,}000879 \end{cases}$

D'où l'expression générale : $10^4 \mu_{lu} = 1660\,(\theta\gamma) + 34{,}08\,\frac{fc28}{\theta} - 1969$

a) $M_U \leq M_L$ Pas d'armatures de bois comprimées : $A_{bt} = \frac{M_U\ \gamma_{bb}}{z \times f_e}$ avec

$$\begin{cases} z = d\,(1 - 0{,}4 \propto). \\ \propto = 1{,}25\,(1 - \sqrt{1 - 2\mu_{bu}}) \\ \mu_{bu} = \frac{M_U}{b \times d^2 \times f_{bu}} \end{cases}$$

b) $M_U > M_L$ Armatures de bois comprimées.

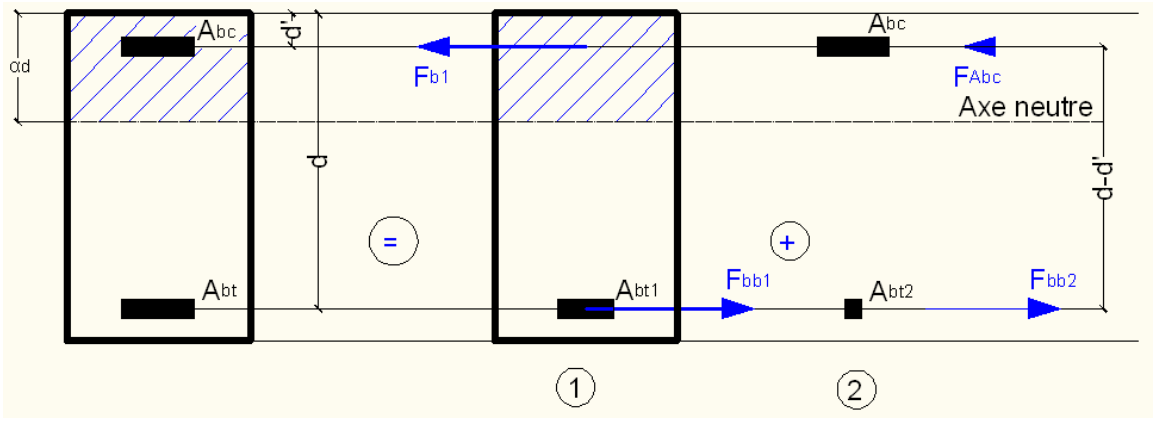


Figure 12: ***Equilibre des forces et moments dans le cas où $M_U > M_L$ pour une poutre à section rectangulaire***

En faisant usage du principe de superposition décrite sur la figure 12, on dimensionne dans un premier temps une section sans armatures comprimées en considérant comme moment agissant le moment limite ultime M_L,

La section des armatures comprimées sont : $A_{bc} = \frac{M_U - M_L}{(d - d')\sigma_{sce}}$

Avec σ_{sce} la contrainte équivalente dans les armatures comprimées

DETERMINATION DE σ_{sce}

Soit σ_{bbc} la contrainte de rupture du bois en compression parallèle aux fibres à un taux d'humidité de 12% : $\sigma_{bbc} = 82{,}17 \text{ MPa} \pm 27{,}29$

f_{ebb} la contrainte limite élastique du bois et f_{ed} lq résistance caractéristique élastique

On a : $f_{ed} = \frac{224}{1.35} = 166 \text{ MPa}$

Approchons le coefficient de sécurité c à appliquer à σ_{bbc} par $c = \frac{f_{ed}}{\sigma_{bbc}}$; c=2,02 prenons c=2

Ainsi $\sigma_{sce} = \frac{\sigma_{bbc}}{c}$ soit $\sigma_{sce} = 41{,}35 \text{ MPa}$

La section des armatures tendues sont : $A_{bt} = \frac{M_L}{Z f_{ed}} + \frac{M_U - M_L}{(d-d')f_{ed}}$

Avec $z = d\,(1 - 0{,}4 \propto_{lim})$.

CONDITION DE NON-FRAGILITE

$$\frac{A}{bd} \geq 0{,}23\frac{f_{tj}}{f_e}$$

2.3.2. CAS D'UNE SECTION EN « T » DE DIMENSIONS b ; b_0, h ; h0

Considérons une section en « T » sollicitée par un moment Mu tel que $0{,}8\,y = h_0$

Y étant la position de l'axe neutre (AN) dans la table par rapport à la fibre la plus comprimée de la table,

Soit M_R le moment de référence c'est-à-dire le moment équilibré par la table seule, uniformément comprimée sur toute sa hauteur h_0 et sous la contrainte f_{bu} .On a :

$$F_{bc} = 0{,}8 f_{bu} \times b \times y \;\; ; et\; z = d - 0{,}4y\; avec\; 0{,}8y = h_0 \text{ on a:}$$

$$F_{bc} = f_{bu} \times b \times h_0\; et \;\; z = d - \frac{h_0}{2}$$

$M_R = F_{bc} \times z$ Soit $M_R = b \times h_0 \times (d - \frac{h_0}{2}) \times f_{bu}$

2.3.2.1. **1er cas : $M_U \leq M_R$** : L'axe neutre se trouve dans la table ; la table seule est surabondante pour équilibrer le moment agissant. Les études se feront en section rectangulaire « b*d »

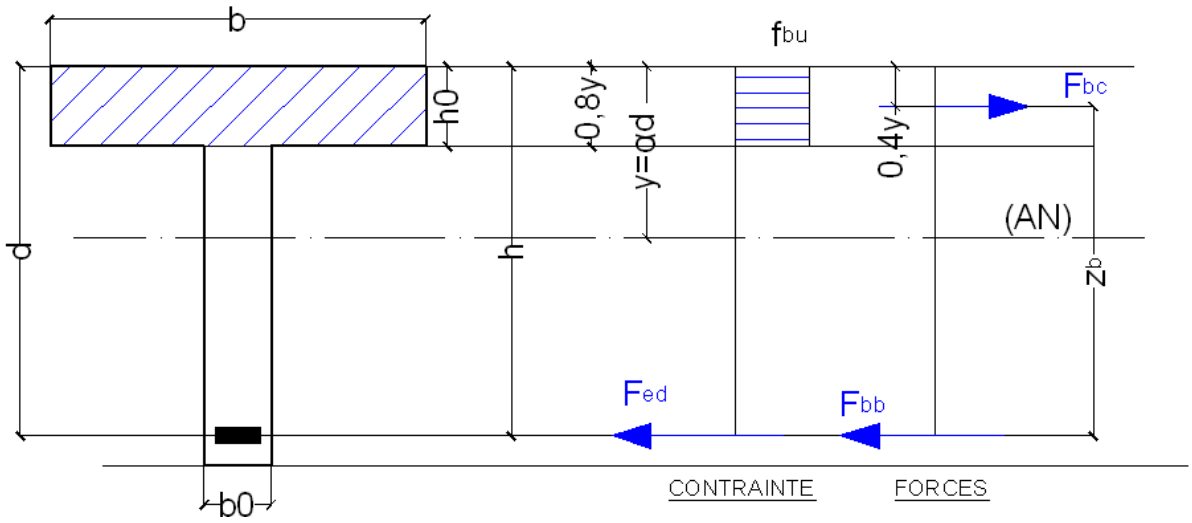


Figure 13 : ***Equilibre des forces et moments dans le cas où $M_U \leq M_R$ pour une poutre à section en « T »***

- $M_U \leq M_L$ Pas d'armatures de bois comprimées : $A_b = \frac{M_U \gamma_{bb}}{Z \times f_e}$ avec

$$\begin{cases} z = d\,(1 - 0{,}4 \propto)\,.. \\ \propto = 1{,}25\,(1 - \sqrt{1 - 2\mu_{bu}}) \\ \mu_{bu} = \frac{M_U}{b \times d^2 \times f_{bu}} \end{cases}$$

- $M_U > M_L$ Armatures de bois comprimées.

En faisant usage du principe de superposition décrite sur la figure 13, on dimensionne dans un premier temps une section sans armatures comprimées en considérant comme moment agissant le moment limite ultime M_L,

La section des armatures comprimées sont : $A_{bc} = \frac{M_U - M_L}{(d-d')\sigma_{sce}}$

La section des armatures tendues sont : $A_{bt} = \frac{M_L}{Z\, f_{ed}} + \frac{M_U - M_L}{(d-d')f_{ed}}$

Avec$z = d\,(1 - 0{,}4 \propto_{lim})$.

2.3.2.2. **2eme cas : $M_U > M_R$** : L'axe neutre se trouve dans l'âme de la section en « T ».En plus de la table qui est totalement comprimée une partie de la nervure l'est aussi. Pour les études, on utilisera le principe de superposition qui nous nous permet de décomposer la section en deux sections rectangulaires « b0 * h » et « h0 (b-bo) ».

$$F_{bc2} = (b - b_0) \times h_0 \times f_{bu} et \;\; z_2 = d - \frac{h_0}{2}$$

Soit Mu_2, le moment correspondant :$M_{u2} = F_{bc2} \times z_2$

$M_{u2} = (\mathrm{b} - \mathrm{b}_0) \times h_0 \times (d - \frac{h_0}{2}) \times f_{bu}$ or $M_R = b \times h_0 \times (d - \frac{h_0}{2}) \times f_{bu}$ ceci implique :$\frac{M_R}{b} = h_0 \times (d - \frac{h_0}{2}) \times f_{bu}$ d'où : $M_{u2} = \frac{(\mathrm{b}-\mathrm{b}_0)}{\mathrm{b}} \times M_R$

Soit A_{b2} ; la section d'armatures tendues équilibrant la section de béton comprimée 2 ;

on a :$F_{bb2} = F_{bc2}$ pour l'équilibre des forces créant le couple de moment M_{u2} de bras de levier z_2 : $A_{b2} \times \sigma_b = \frac{M_{u2}}{z_2}$; $A_{b2} = \frac{M_{u2}}{\sigma_b \times z_2}$ or $M_{u2} = \frac{(\mathrm{b}-\mathrm{b}_0)}{\mathrm{b}} \times M_R$et $M_R = b \times h_0 \times (d - \frac{h_0}{2}) \times f_{bu}$ d'où $A_{b2} = \frac{(\mathrm{b}-\mathrm{b}_0) \times h_0 \times f_{bu}}{\sigma_b}$

Soit M_{u2}le moment d'équilibre de la section 1 (b0 * h) ; $M_u = M_{u1} + M_{u2}$; $M_{u1} = M_u - M_{u2}$; $M_{u1} = M_u - \frac{(\mathrm{b}-\mathrm{b}_0)}{\mathrm{b}} \times M_R$

- $M_{U1} \leq M_L$ Pas d'armatures de bois comprimées : $A_b = A_{b1} + A_{b2}$ avec

$$A_{b1} = \frac{M_{U1}\,\gamma_{bb}}{Z \times f_e} \text{ Où } \begin{cases} z = d\,(1 - 0{,}4 \propto)\,. \\ \propto = 1{,}25\,(1 - \sqrt{1 - 2\mu_{bu1}}) \\ \mu_{bu1} = \frac{M_{U1}}{b \times d^2 \times f_{bu}} \end{cases} ; A_{b2} = \frac{(\mathrm{b}-\mathrm{b}_0) \times h_0 \times f_{bu}}{\sigma_b}$$

$$A_b = \frac{M_{U1}\,\gamma_{bb}}{Z \times f_e} + \frac{(\mathrm{b} - \mathrm{b}_0) \times h_0 \times f_{bu}}{\sigma_b}$$

- $M_{U1} > M_L$ Armatures de bois comprimées.

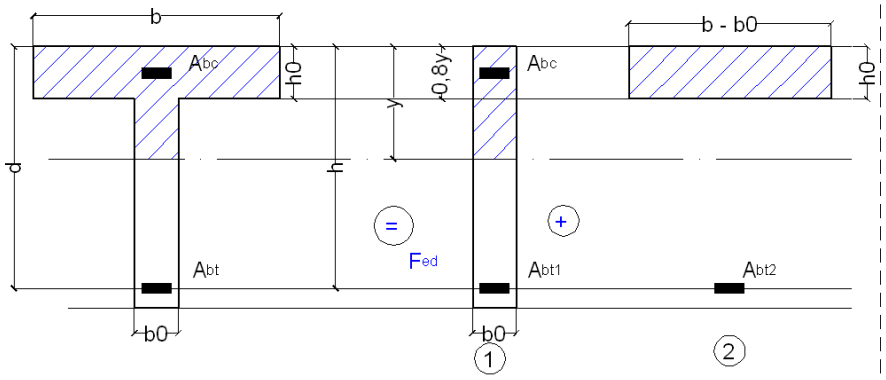


Figure 14 : ***Equilibre des forces et moments dans le cas où $M_{U1} > M_L$ pour une poutre à section en « T »***

En faisant usage du principe de superposition décrite sur la figure 14, on dimensionne dans un premier temps une section sans armatures comprimées en considérant comme moment agissant le moment limite ultime M_L,

La section des armatures comprimées sont : $A_{bc} = \frac{M_{U1} - M_L}{(d-d')\sigma_{sce}}$ avec

$M_{u1} = M_u - \frac{(b-b_0)}{b} \times M_R$

La section des armatures tendues sont : $A_{bt} = \frac{M_L}{Z f_{ed}} + \frac{M_{U1} - M_L}{(d-d')f_{ed}} + \frac{(b-b_0)\times h_0 \times f_{bu}}{\sigma_b}$

avec $z = d\ (1 - 0{,}4 \propto_{lim})$.

2.4. PRINCIPE DE CALCUL DES POUTRES EN BETON ARME D'ACIER : cas des sections rectangulaire et en « T »

Le principe de dimensionnement des poutres en béton armé a été tiré du livre de béton armé : *Pratique du BAEL Cours avec exercices corrigés*, J. PERCHAT et se présente sous forme de diagramme où : A est la section d'aciers tendus ; A' la section d'aciers comprimés (Voir Annexes N°4).

CONDITION DE NON-FRAGILITE

Amin= I*Ft28/(0,81*V'*h*fe) avec I=b0*((h^3)/3)+(b-b0)*((h0^3)/3)-(v^2)*(b0*h+h0*(b-b0)) et v'=h-v

Cette condition est, en général, satisfaite d'après les calculs aux états limites en flexion (environ 0,3%).

Une fois le principe de dimensionnement connu, nous passons à l'application.

Partie III:

APPLICATION A UN BATIMENT DE TYPE F4

3. APPLICATION

3.1. PRESENTATION DE L'OBJET D'APPLICATION DE L'ETUDE : Bâtiment de type F4

Pour avoir des cas de chargements réels sur nos éléments, nous avons pris une villa de type F4. Cette villa à usage de maison d'habitation (voir annexe n° 5 à 9) sera construite dans la zone de Calavi sur un terrain de 16,5 x 12,5 m² et comprendra en fin des travaux :

Tableau 4 : Surface des pièces dans le bâtiment de type F4

	Pièces	Surface (m²)
RDC	Terrasse	6,38
	Séjour	33,34
	Salle à manger	16,00
	cuisine	6,88
	Chambre	17,92
	Salle de bain	4,50
	Garage	20,00

	Pièces	Surface (m²)
R+1	Terrasse	19,68
	Séjour	26,64
	Oratoire	9,46
	Chambre 1	17,87
	Chambre 2	20,78
	Chambre 3	13,77

3.2. PREDIMENSIONNEMENT DES PLANCHERS ET DETERMINATION DES CHARGES PERMANANTES ET D'EXPLOITATION

La localisation du site de construction étant dans une zone non agressive, les hypothèses de descentes des charges suivantes sont retenues :

Tableau 5: Hypothèses de descente des charges

HYPOTHESES DES DESCENTES DE CHARGES	
Type de fissuration	Fissuration Peu Préjudiciable pour les éléments porteurs de la superstructure
Etat limite de calcul	Etat Limite Ultime
Enrobage	3cm
Dosage du béton	400 kg/m^3
Poids volumique du béton armé	25 KN/m²
Poids volumique du béton armé de bois de Borassus	23 KN/m²

CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX			
NOM	FORMULE	RESULTATS	UNITES (SI)
BETON : FC28=35MPa ;θ=1; γb=1,5			
Fbu	0,85*FC28/(θγb)	19,93	MPa
ft28	0,6+0,06*FC28	2,70	MPa
Σb	0,6*fc28	13,20	MPa
ACIER : Fe 400 MPa; θ=1; γs =1,5			
Fed	Fe/γs	347,83	MPa
Borassus : Fe 224 MPa; θ=1; γbb=1,35			
Fed	Fe/γbb	165,92	MPa

3.2.1. PREDIMENSIONNEMENT DU PLANCHER A CORPS CREUX

La descente des charges sur bâtiment est précédé par le positionnement et l'orientation des nervures, des poutres et des poteaux. Ainsi les plans de poutraison sont obtenus (Voir Annexe n°10 ; 11).

Hypothèse : L la portée de la plus grande poutrelle, h l'épaisseur totale du plancher,

h_0 l'épaisseur de la dalle de compression et Le la longueur de l'entrevous

Géométrie du plancher	
Béton armé	
h	L/25≤ h≤ L/20
L_e	h_0≥Le/25

Tableau 6: Détermination des sections géométriques du plancher

Ainsi nous avons répertorié les différentes nervures du plancher haut RDC de la partie centrale dans le tableau suivant :

Tableau 7: Résultats de la détermination de la géométrie du plancher

Epaisseur totale du plancher (m)	Plancher haut RDC				Plancher haut R+1			
	N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
Longueur de la plus grande poutrelle:L	2,00	2,55	3,50	4,2	1,90	2,40	4,00	4,20
L/25	0,08	0,10	0,14	0,17	0,08	0,10	0,16	0,17
L/20	0,10	0,13	0,18	0,21	0,10	0,12	0,20	0,21
Epaisseur de la dalle retenue(m)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Retenons un plancher d'épaisseur totale 20cm								
Disposant d'entrevous de 50cm de longueur ;h0≥40/25 ;Prenons h0=5cm								
Conclusion retenons un plancher à corps creux 15+5								

Nous pouvons entamer ensuite la descente des charges sur les planchers courant et inaccessible.

3.2.2. Charges permanentes (NF P 06-004)

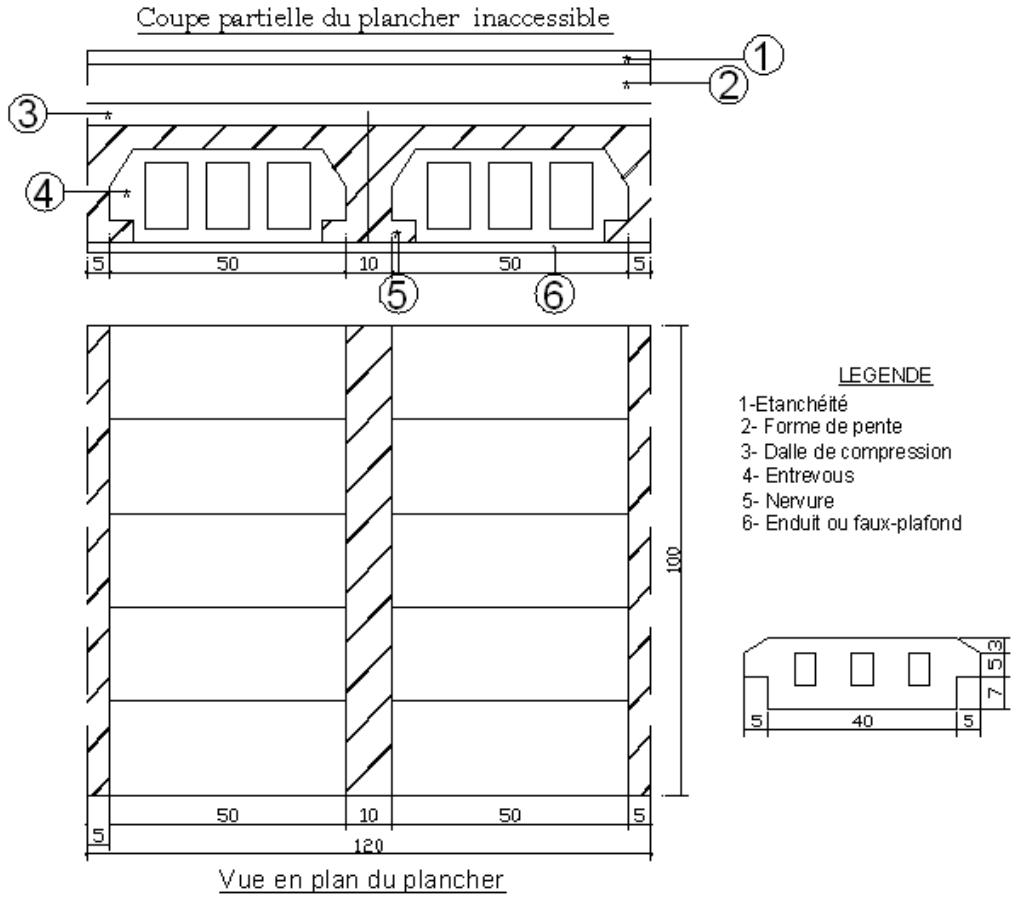


Figure 15 : Vue en plan d'un panneau de dalle représentatif pour la descente des charges.

Tableau 8: Charges surfaciques des planchers courant et inaccessible en béton armé de bois de Borassus et béton armé d'acier

PLANCHER COURANT	BA	Béton Borassus
Plancher 15+5	2,85	2,70
Cloisons légères	1,45	1,45
mortier de pose	0,20	0,20
revêtement	0,20	0,20
Enduit ou faux plafond	0,30	0,30
g(KN/m²)	***5,00***	***4,85***

PLANCHER INACCESSIBLE	BA	Béton Borassus
Plancher 15+5	2,85	2,70
Etanchéité	0,30	0,30
Forme de pente	2,20	2,20
Enduit ou faux plafond	0,30	0,30
g(KN/m²)	***5,65***	***5,50***

3.2.3. Charges d'exploitation (NF P 06-001)

Tableau 9: Charges d'exploitation surfaciques

CHARGES D'EXPLOITATION	*q*	*KN/m²*
Habitation	1,5	KN/m²
Escalier et circulation	2,5	KN/m²
Plancher terrasse inaccessible	1	KN/m²

3.3. DIMENSIONNEMENT DES POUTRELLES

Vu l'épaisseur de la table de compression et en tenant compte de la section d'armatures comprimées, il nous faut arriver à loger nos armatures comprimées dans la table de compression. Au regard de la formule conditionnant les armatures comprimées :

μbu=Mu/(bd²fbu)< μlu ; il nous fallait réduire les armatures comprimées soit :

- diminuer Mu en optant pour des poutrelles de petite longueur donc revoir toute la poutraison. Ainsi avec fc28 = 20 MPa, on a $L > 2{,}50m$ pour éviter les armatures comprimées.
- augmenter la section de béton : b et d ce qui avait pour inconvénient d'alourdir la structure,
- augmenter fbu autrement dit fc28.
  Nous avons opté pour augmenter fbu en se basant sur l'analyse suivante.

Nous obtenons une diminution importante de sections d'armatures comprimées suivantes :

Pour Mu=11,81 KNm et Mser=8,60KNm

Tableau 10: Variation de la section d'armatures comprimées en fonction de fc28

fc28 (MPa)	20	25	30	35
Abc (cm²)	13,04	10,7	8,03	5,02
Ecart Abc (%)	0,00	21,64	62,39	159,76

Lorsque la résistance caractéristique du béton à la compression à 28jours augmente, nous observons une diminution de la section d'armatures comprimées de Borassus. C'est dire que l'augmentation de la résistance caractéristique du béton à la compression entraîne une diminution des armatures comprimées de bois. D'où notre choix s'est porté sur fc28=35 MPa.

3.3.1. Descente des charges

Tableau 11: Descente des charges sur poutrelles

BA			Béton Borassus	
PLANCHER COURANT 15+5				
g (KN/m)	q (KN/m)		g (KN/m)	q (KN/m)
CALCUL	CALCUL		CALCUL	CALCUL
5,00*0,60	1,5*0,60	Plancher	4,85*0,60	1,5*0,60
3,00	***0,90***	***Total***	***2,91***	***0,90***
PLANCHER INACCESSIBLE 15+5				
5,65*0,60	1,0*0,60	Plancher	5,50*0,60	1,0*0,60
3,39	***0,6***	***Total***	***3,30***	***0,6***

3.3.2. Dimensionnement des poutrelles

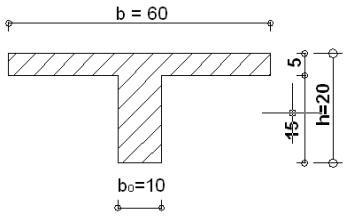


Figure 16 : ***section type d'une poutrelle***

Tableau 12: **Tableau récapitulatif du dimensionnement de poutrelles**

	Plancher haut RDC							
	BETON ARME D'ACIER				BETON ARME DE BORASSUS			
	N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
L	2,00	2,55	3,50	4,20	2,00	2,55	3,50	4,20
Mu=(pu)l²/8 (KNml)	2,70	4,39	8,27	11,91	2,64	4,29	8,08	11,64
Mser=(pser)l²/8 (KNml)	1,95	3,17	5,97	8,60	1,91	3,10	5,83	8,40
A (cm²)	0,44	0,73	1,42	2,12	0,89	1,44	2,73	4,25
A'(cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,56
Amin (cm²)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,71	0,71	0,71	0,71
	Plancher haut R+1							
	BETON ARME D'ACIER				BETON ARME DE BORASSUS			
	N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
L	2,00	2,55	3,50	4,20	1,90	2,40	4,00	4,20
Mu=(pu)l²/8 (KNml)	2,74	4,45	8,39	12,08	2,42	3,86	10,71	11,81
Mser=(pser)l²/8(KNml)	2,00	3,24	6,11	8,80	1,76	2,81	7,80	8,60
A (cm²)	0,45	0,74	1,44	2,16	0,81	1,30	3,91	4,32
A'(cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,38	5,02
Amin (cm²)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,71	0,71	0,71	0,71

	Plancher haut RDC				Plancher haut R+1			
A(Béton Borassus)	0,89	1,44	2,73	4,25	0,81	1,30	3,91	4,32
A(Béton armé)	0,44	0,73	1,42	2,12	0,45	0,74	1,44	2,16
A(Béton Borassus)/A(Béton armé)	2,02	1,98	1,92	2,00	1,80	1,76	2,72	2,00

3.4. DIMENSIONNEMENT DE POUTRES

Une poutre reprend son poids propre, la surface de plancher qu'elle supporte ainsi les cloisons qui s'y trouvent.

Après le prédimensionnement et la descente des charges sur toutes les poutres du plancher haut RDC sont de dimensions 0,15 x 0,40 et conduisent aux sections d'armatures suivantes :

Tableau 13: **Tableau récapitulatif du dimensionnement de poutres**

	Plancher haut RDC					
	BETON ARME D'ACIER			BETON ARME DE BORASSUS		
	PP1	PP2	PP3	PP1	PP2	PP3
Mu(KNml)	93,21	32,57	15,34	90,79	31,73	14,90
Mser (KNml)	67,49	23,74	11,11	56,00	22,90	10,78
A (cm²)	8,66	2,72	1,25	17,60	5,55	2,54
A'(cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amin (cm²)	0,84	0,84	0,84	1,50	1,50	1,50

Après le prédimensionnement toutes les poutres du plancher haut R+1 sont de dimension 0,15 x 0,30 et conduisent aux sections d'armatures suivantes :

	Plancher haut R+1					
	BETON ARME D'ACIER			BETON ARME DE BORASSUS		
	PP1	PP2	PP3	PP1	PP2	PP3
Mu(KNml)	53,13	21,33	8,90	51,71	20,80	8,70
Mser (KNml)	38,78	15,53	6,52	37,77	15,14	6,30
A (cm²)	6,60	2,40	0,97	12,65	4,89	1,98
A'(cm²)	0,00	0,00	0,00	23,25	0,00	0,00
Amin (cm²)	0,63	0,63	0,63	1,12	1,12	1,12

	Plancher haut RDC			Plancher haut R+1		
A(Béton Borassus)	17,60	5,55	2,54	12,65	4,89	1,98
A(Béton armé)	8,66	2,72	1,25	4,58	1,75	0,84
A(Béton Borassus)/A(Béton armé)	2,03	2,04	2,03	2,76	2,79	2,36

3.5. COUT ESTIMATIF DES ARMATURES LONGITUDINALES

	BORASSUS	ACIER
Volume des armatures longitudinales de poutres (m3)	0,264	0,077
Volume des armatures longitudinales de poutrelles (m3)	0,2095	0,0573
Total des volumes (m3)	0,474	0,134
Total poids (m3)	3,270	1,051
Prix de la tonne	25000	550000
Prix total	98100	693473
Prix total acier/Prix total borassus	7,1	

3.6. ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS

- ANALYSE

On constate que quelle que soit la portée de poutrelles, il n'existe pas d'armatures comprimées pour les poutrelles en béton armé d'acier mais en revanche, à partir d'une certaine portée des poutrelles en béton armé de bois de borassus, il devient nécessaire de prévoir des armatures comprimées.

De plus, les sections d'armatures comprimées dans les nervures armées de bois de borassus augmentent avec la longueur des nervures et sont supérieures aux sections d'armatures tendues correspondantes.

Pour le même élément donné travaillant en flexion simple, les sections des armatures tendues à prévoir dans le cas du béton armé de bois de Borassus font environ le double de celles nécessaires pour un béton armé d'acier.

Le volume des armatures de borassus sont trois (03) fois supérieures à celui des aciers tandis que leur coût revienne sept(07) fois moins cher.

- INTERPRETATION

Nous nous sommes posés la question de savoir au-delà de quelle portée de poutrelles a-t-on besoin d'armatures comprimées de bois de Borassus ($M_u - \mathrm{M_L} > 0$). En effet nous avons observé pour fc28= 35 MPaet θ =1, que γ était constant ($\gamma = \frac{\mathrm{Mu}}{\mathrm{Mser}} = \frac{\mathrm{pu}}{\mathrm{pser}}$) quelle que soit la portée de la poutrelle et γ = 1,3733 ; μlu étant fonction de fc28 , θ et γ est alors constant μlu = 0,1314.

Puisque $M_u = \frac{\mathrm{Pul}^2}{8}$ et $\mathrm{M_L} = 0{,}1314\ \mathrm{b0\ d^2\ fbu}$, alors $(M_u - \mathrm{M_L} > 0)$ => $> 3{,}55m$. Cependant en tenant compte des recommandations du BAEL 91 modifié 99 pour une utilisation plus efficiente des matériaux ($M_u - \mathrm{M_L} > 0{,}4\ M_u$), on obtient $L > 4{,}62m$.

La raison qui explique le fait que les armatures tendues soient inférieures à celles comprimées se trouve dans le fait que la résistance caractéristique à la compression dans le cas du Borassus est nettement inférieure à celle à la traction (environ le cinquième de la résistance caractéristique à la traction), contrairement à l'acier qui présente un diagramme de déformation traction compression pratiquement symétrique.

Pour une utilisation performante du béton armé de bois de Borassus, il nous faut :

- limiter la portée de nervures pour réduire la section d'armatures comprimées. Par exemple à 2,5m dans le cas des planchers à corps creux moyennement chargés à usage d'habitation de 15+5 avec fc28 = 20 MPa ;
- pour des portées de nervures importantes, augmenter la résistance caractéristique du béton à la compression pour une optimisation des sections de bétons comprimées ;
- Réduire la section des armatures comprimées revient à diminuer la différence $(M_u - \mathrm{M_L})$ autrement dit à augmenter $\mathrm{M_L} = 0{,}1314\ \mathrm{b0\ d^2\ fbu}$ .Ainsi pour augmenter$\mathrm{M_L}$, il suffit d'augmenter b0 en utilisant des entrevous ayant la partie de pose des poutrelles plus longue.

Cette étude s'étant seulement penchée sur le dimensionnement des armatures longitudinales, il importe que :

- la possibilité d'utilisation du bois de borassus dans les zones de recouvrement, en armatures transversales et que des essais de convenance soient réalisés pour une étude plus complète,
- la conception de corps creux de plancher moins lourds et permettant d'utiliser des poutrelles de largeur b0 plus grande, soit aussi développée.

- QUELQUES CONTRIBUTIONS DU MATERIAU BETON ARME DE BOIS BORASSUS

Il importe de préciser que le bois borassus est l'une des alternatives pour lutter contre la corrosion de l'acier. En effet dans les milieux à fort embrun marin où la structure de l'acier est fortement menacée, notre bois Borassus résiste très fortement.

De plus face aux ondes électromagnétiques émis par l'acier et représentant un risque sanitaire pour certaines personnes, le Borassus pourra contribuer facilement à ériger des habitats source de bien-être.

CONCLUSION

Tout au long de ce mémoire, nous avons développé une méthode de dimensionnement des armatures longitudinales pour les structures soumises à la flexion simple en béton armé de Borassus à l'état limite ultime. En partant d'un dimensionnement parallèle à celui des éléments en béton armé soumis à la flexion simple, nous avons tour à tour obtenu :

- Une formule approchant le moment limite ultime pour fc28 ≤35 MPa :

$$10^4 \mu_{lu} = 1660\ (\theta\gamma) + 34{,}08\ \frac{fc28}{\theta} - 1969$$

- La contrainte dans les armatures comprimées

$$\sigma_{sce} = 41{,}35\ \text{MPa}$$

- un programme de calcul des sections d'armatures comprimées et tendues dans les pièces en béton armé de Borassus.
- Les armatures longitudinales de borassus sont sept (07) fois moins chères que l'acier.

Il nous a permis de constater que la section d'armatures comprimées lorsqu'il y en avait était supérieure à la section d'armatures tendues. En effet ceci s'explique par le fait que la résistance du Borassus à la traction (165,92 MPa) est quatre fois supérieure à celle à la compression (41,35MPa).

Cette étude bien que n'ayant pas abordée le dimensionnement des armatures de scellement en zone de recouvrement et les armatures transversales vient de nous confirmer une fois de plus la possibilité de l'utilisation du béton armé de Borassus dans la construction notamment les pièces soumises à la flexion simple.

BIBLIOGRAPHIE

[1] BLACKBURN D. 2004, *Le développement d'un système constructif de plancher pour l'habitat urbain de Hanoi : la dalle en béton léger, Thèse de Maitrise en science de l'architecture-Projet Vietnam, Université LAVAL, Canada.*

[2] CABANNES Y., CHANTRY G. 1987, *Le rônier et le palmier à sucre : Production et mise en œuvre dans l'habitat.* Edition GREF, France, P90

[3] AGOSSOU D. 2008, *Typologie des sous populations de l'espèce végétale borassus et état des connaissances sur son utilisation endogène comme bois d'œuvre. Mémoire d'ingénieur de conception, EPAC/UAC (Bénin), P54*

[**4] DIALLO A. K., DIOP I. & SOW M.B., 1998**. *Problématique de la gestion durable du rônier dans la sous-région ouest-africaine, Atelier technique sur le rônier en Rép. de Guinée Conakry*

[5] FAO, 1991. *Les plantes à vocation de bois d'œuvre en Afrique intertropicale humide. Etude FAO Forêt 98, 225p.*

[6] AHONOU N., HOUINSOU S. W., GBAGUIDI A. G., ZOHOUN S. 2004, *Détermination de quelques caractéristiques physiques et mécaniques du Borassus Aethiopum. Mémoire de DIT, EPAC/UAC (Bénin), 103p.*

[7] BOUSSARI A., 2008, *Caractérisation physique et mécanique du bois de borassus aethiopum., Mémoire d'Ingénieur de conception, EPAC/UAC (Bénin), 203p*

[8] VODOUNSI B. N., 2009, *Etude du comportement du bois de Borassus dans le béton par rapport à la variation de son d'humidité. Mémoire d'ingénieur de conception, EPAC/UAC (Bénin) ,132p*

[9] AHOUSSINOU I.et OROUNLA M., 2010 *Détermination théorique des sections de bois borassus dans des poutres simplement fléchies et faiblement chargées. Mémoire d'Ingénieur de conception, EPAC/UAC (Bénin), 203p*

[10] GBAGUIDI S. V., *Cours de Béton armé, Licence professionnelle,*

[11] PERCHAT J., 1992, *Pratique du BAEL Cours avec exercices corrigés***,**

[12] BAYTON R. P., OUEDRAOGO A. et GUINKO S., 2006, *the genius borassus*

(Arecaceae) in West Africa , with a description of a new species from Burkina Faso , Botanical journal of the linnean society, 150(4) :419-427,

[13] M.GIBIGAYE, G.L. GBAGUIDI AISSE, V.S. GBAGUIDI, T.A. AMADJI, Y.D. AGOSSOU, P. SOCLO et B.A. SINSIN, *Etude ethnobotanique et usages mécaniques du rônier (Borassus Aethiopum Mart.) au BENIN, Annales des sciences agronomiques 13(2) 69-86,2010 ISSN 1659-5009*,

[14] G.L. GBAGUIDI AISSE , V.S. GBAGUIDI , M.GIBIGAYE , T.A. AMADJI , Y. D. AGOSSOU , P. SOCLO et B.A. SINSIN, *Etude de la possibilité d'utilisation du rônier comme armature végétale dans les éléments en béton : cas des poutres*,

[15] V.S. GBAGUIDI, G.L. GBAGUIDI AISSE, M.GIBIGAYE, E. ADJOVI , B.A. SINSIN, T.A. AMADJI, *Détermination expérimentale des principales caractéristiques physiques et mécaniques du bois du rônier (Borassus Aethiopum Mart.)d'origine béninoise,Journal des recherches scientifiques Universités de Lomé (TOGO),2010,série E, 12(2) :1-9*

ANNEXES

ANNEXE N° 1: UTILISATION GENERALE DU RONIER ..... A

ANNEXE N° 2: UTILISATION DU RONIER COMME ARMATURE DANS LES POTEAUX RAIDISSEURS, VILLA MÄNTELE ENWEANI B FIJROSSE COTONOU, BENIN .....B

ANNEXE N° 3: QUELQUES VALEURS **μlu** ET **αlu** DE OBTENUES PAR ITERATIONS C

ANNEXE N° 4:DIAGRAMME DE CALCUL DES POUTRE DE BETON ARME D'ACIER..... D

ANNEXE N° 5: PERSPECTIVES DE LA VILLA DE TYPE F4..... F

ANNEXE N° 6: PLAN COTE RDC ..... G

ANNEXE N° 7: PLAN COTE R+1 ..... H

ANNEXE N° 8: PLAN AMENAGE RDC.....I

ANNEXE N° 9: PLAN AMENAGE R+1 .....J

ANNEXE N° 10: PLAN DE POUTRAISON DU PLANCHER HAUT RDC ..... K

ANNEXE N° 11: PLAN DE POUTRAISON DU PLANCHER HAUT R+1 L

ANNEXE N° 12: EXEMPLE DE CALCUL DE LA NERVURE N4 DU PLANCHER HAUT R+1 . N

ANNEXE N° 13: EXEMPLE DE CALCUL DE LA POUTRE PP1 DU PLANCHER HAUT RDC .. P

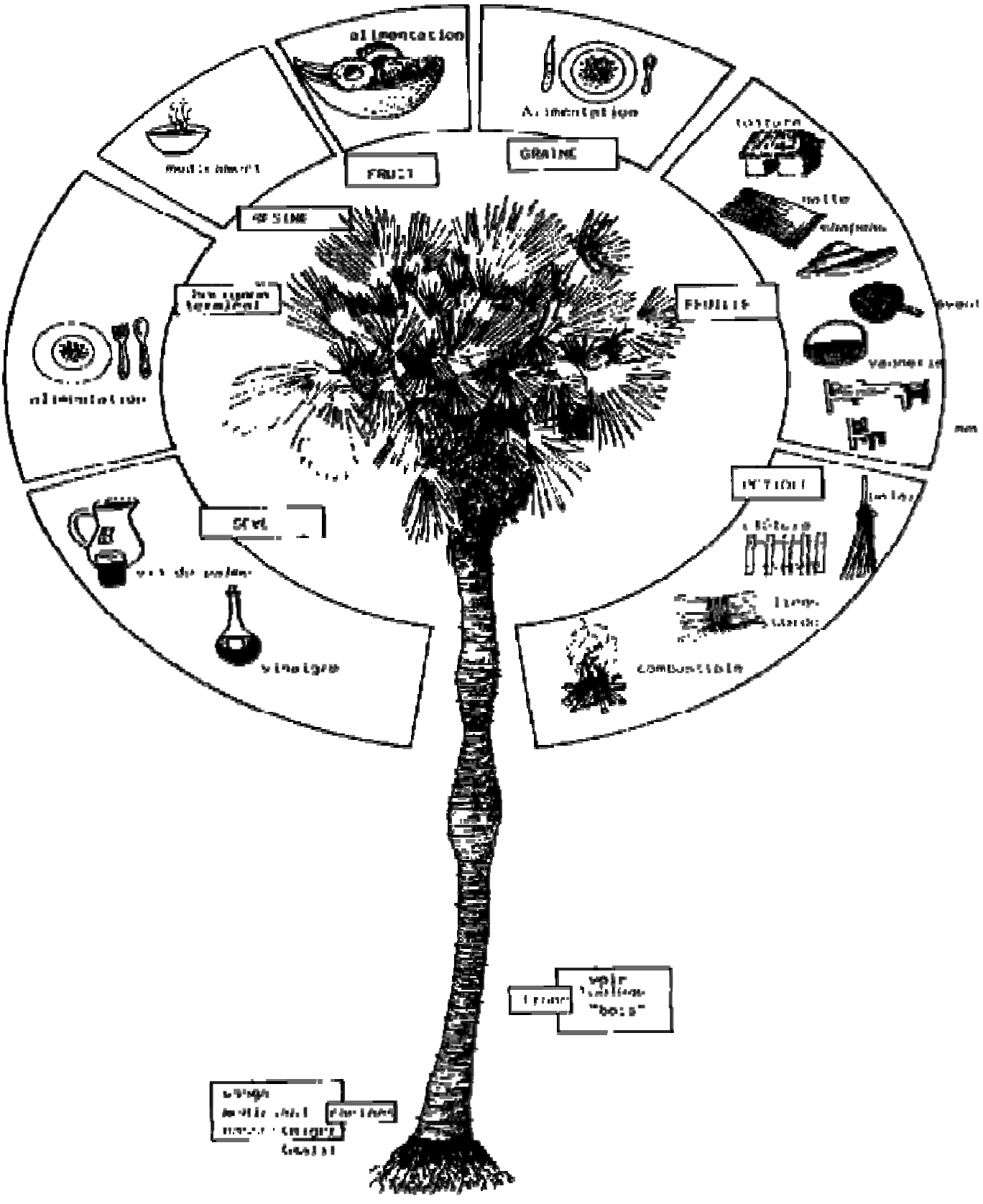
ANNEXE N° 14: ESTIMATION DES SECTIONS D'ARMATURES DE POUTRELLES ..... Q

ANNEXE N° 15: ESTIMATION DES SECTIONS D'ARMATURES DE POUTRES.....R

ANNEXE N° 16: ARMATURES DE BORASSUS .....T

ANNEXE N°17:CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES DU BOIS DE RONIER……U

ANNEXE N° 1: UTILISATION GENERALE DU RONIER

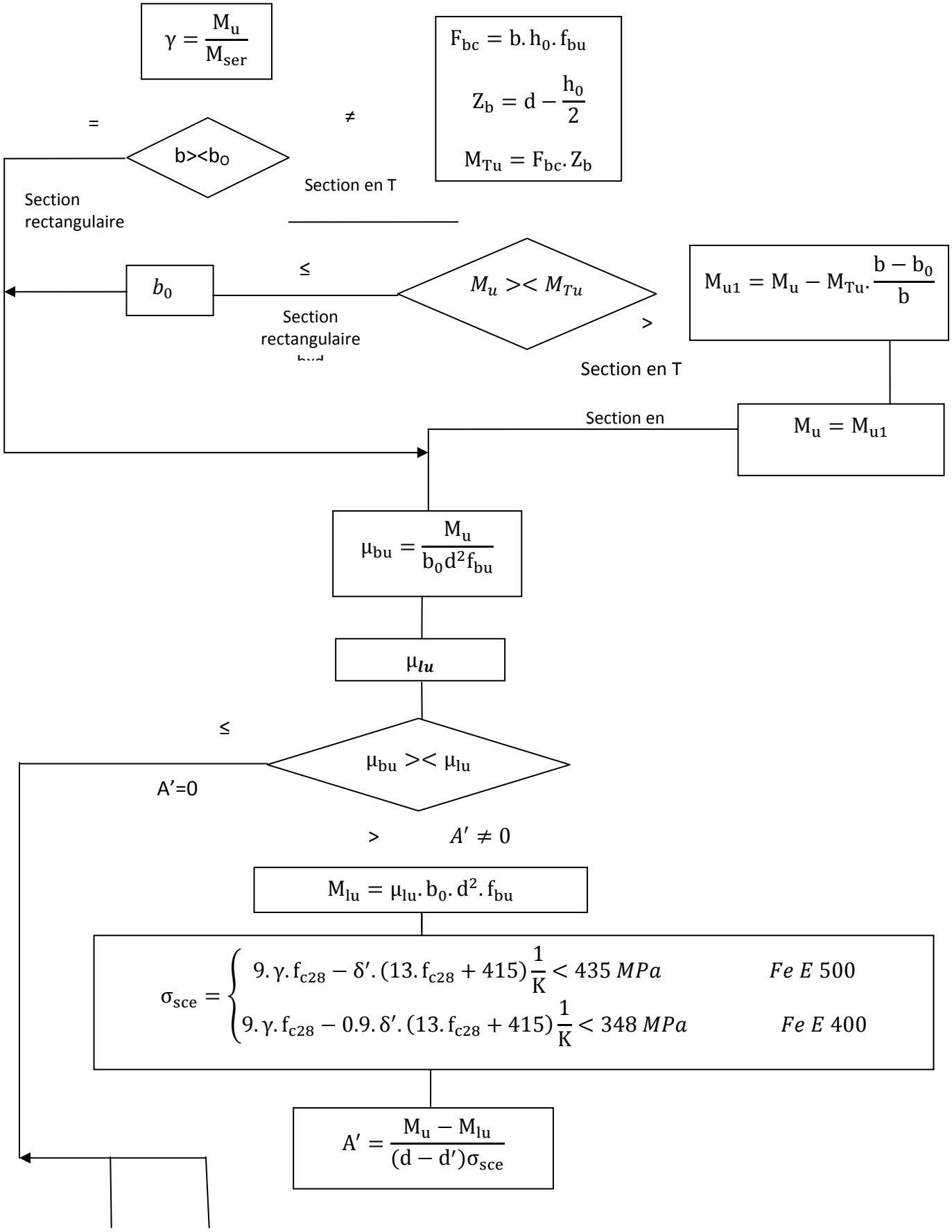


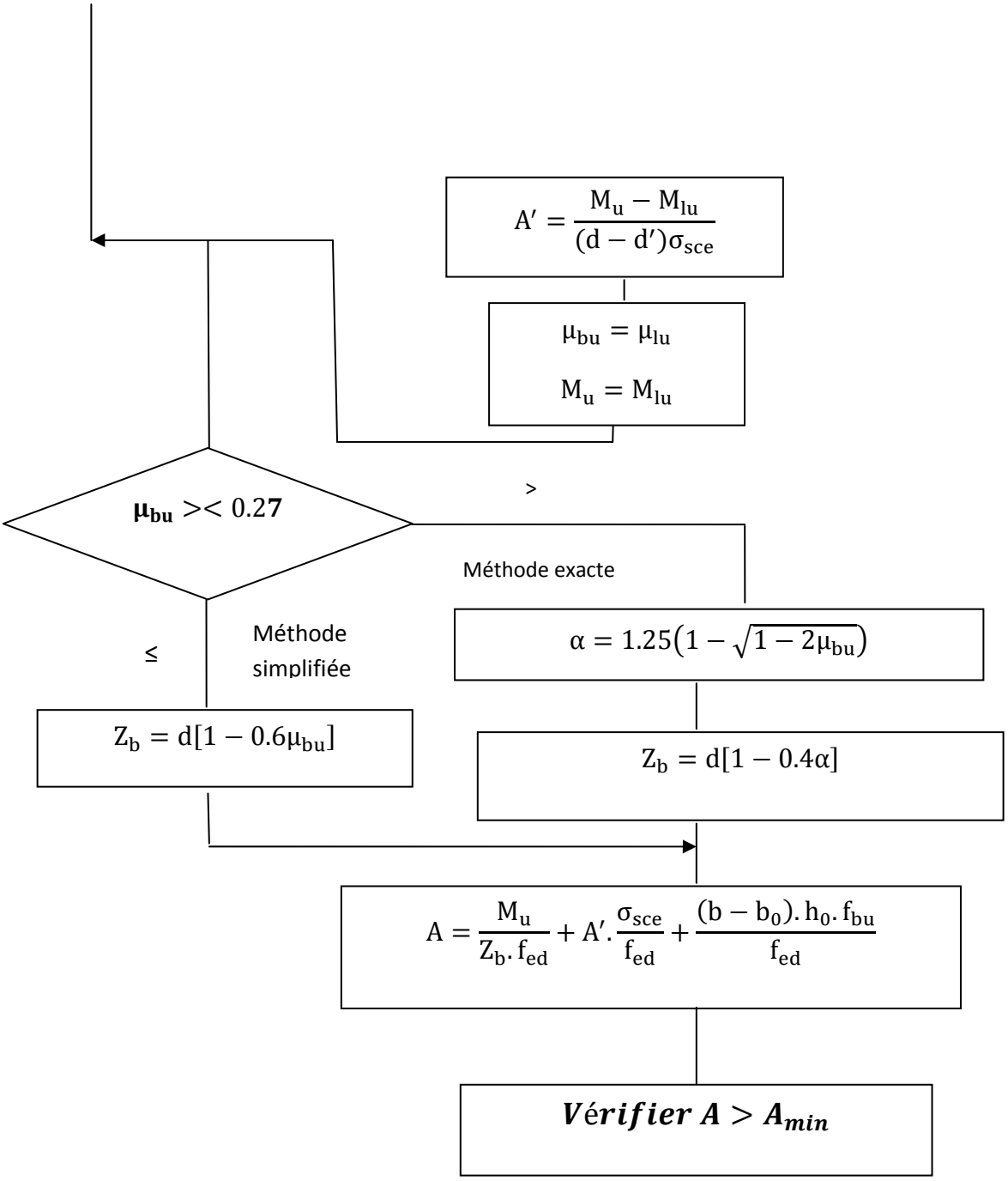
ANNEXE N° 2: UTILISATION DU RONIER COMME ARMATURE DANS LES POTEAUX RAIDISSEURS, VILLA MÄNTELE ENWEANI B Fijrossè Cotonou, BENIN

ANNEXE N° 3: QUELQUES VALEURS μ_{lu} ET α_{lu} DE OBTENUES PAR ITERATIONS

fc28 (MPa)	θ		γ=Mu/Mser			
			1,35	1,4	1,45	1,5
20	1	μlu	0,0810	0,0868	0,0927	0,0988
		αlu	0,1180	0,1220	0,1261	0,1301
	0,9	μlu	0,0726	0,0778	0,0831	0,0885
		αlu	0,1175	0,1215	0,1255	0,1294
	0,85	μlu	0,0685	0,0733	0,0783	0,0834
		αlu	0,1173	0,1212	0,1252	0,1291
25	1	μlu	0,0976	0,1044	0,1115	0,1187
		αlu	0,1434	0,1482	0,1530	0,1578
	0,9	μlu	0,0874	0,0935	0,0998	0,1062
		αlu	0,1427	0,1474	0,1521	0,1568
	0,85	μlu	0,0824	0,0881	0,0940	0,1001
		αlu	0,1423	0,1470	0,1517	0,1564
30	1	μlu	0,1129	0,1207	0,1288	0,1371
		αlu	0,1673	0,1729	0,1784	0,1839
	0,9	μlu	0,1011	0,1081	0,1152	0,1226
		αlu	0,1664	0,1718	0,1772	0,1826
	0,85	μlu	0,0952	0,1018	0,1085	0,1154
		αlu	0,1659	0,1713	0,1767	0,1820
35	1	μlu	0,1272	0,1359	0,1449	0,1541
		αlu	0,1900	0,1962	0,2024	0,2085
	0,9	μlu	0,1138	0,1216	0,1295	0,1377
		αlu	0,1888	0,1949	0,2009	0,2069
	0,85	μlu	0,1072	0,1144	0,1219	0,1296
		αlu	0,1883	0,1942	0,2002	0,2061

ANNEXE N° 4: DIAGRAMME DE CALCUL DES POUTRE DE BETON ARME D'ACIER



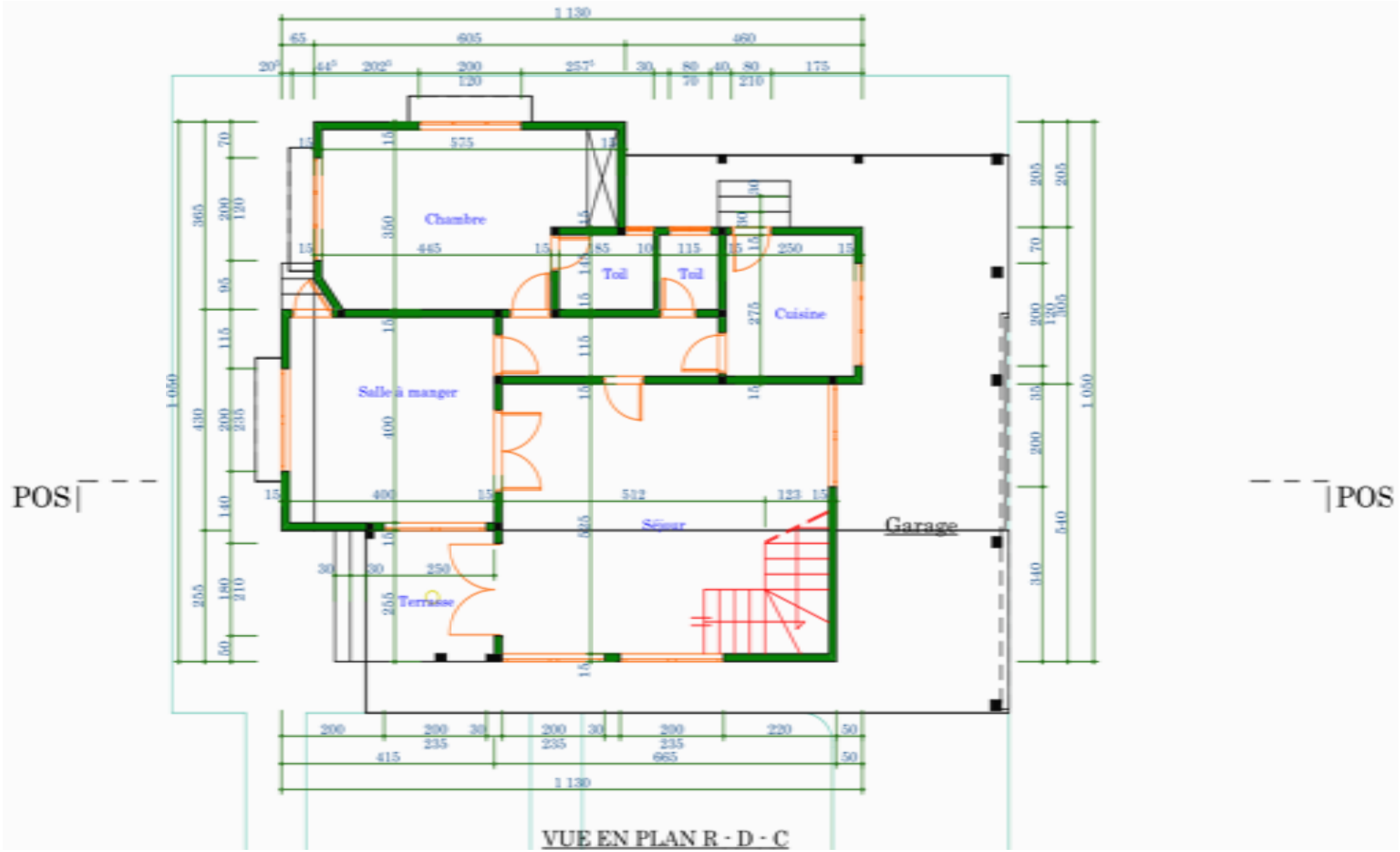

$A' = \frac{M_u - M_{lu}}{(d - d')\sigma_{sce}}$
$\mu_{bu} = \mu_{lu}$
$M_u = M_{lu}$
$\mu_{bu} >< 0.27$
>
Méthode exacte
$\alpha = 1.25\left(1 - \sqrt{1 - 2\mu_{bu}}\right)$
≤
Méthode simplifiée
$Z_b = d[1 - 0.6\mu_{bu}]$
$Z_b = d[1 - 0.4\alpha]$
$A = \frac{M_u}{Z_b . f_{ed}} + A' . \frac{\sigma_{sce}}{f_{ed}} + \frac{(b - b_0) . h_0 . f_{bu}}{f_{ed}}$
$\boldsymbol{Vérifier\ A > A_{min}}$

ANNEXE N° 5: PERSPECTIVES DE LA VILLA DE TYPE F4

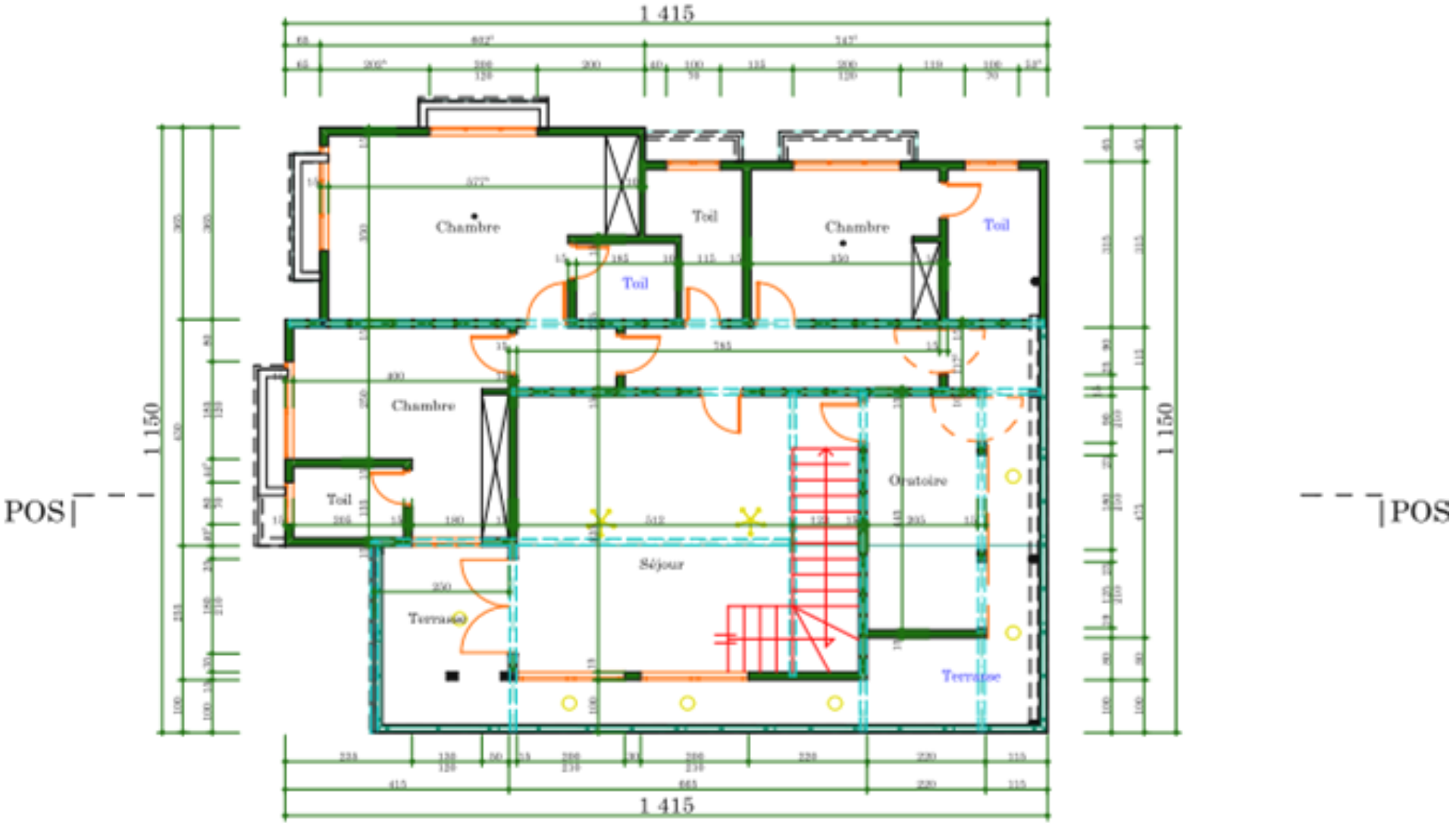
FACADE PRINCIPALE

FACADE LATERALE GAUCHE

ANNEXE N° 6: PLAN COTE RDC

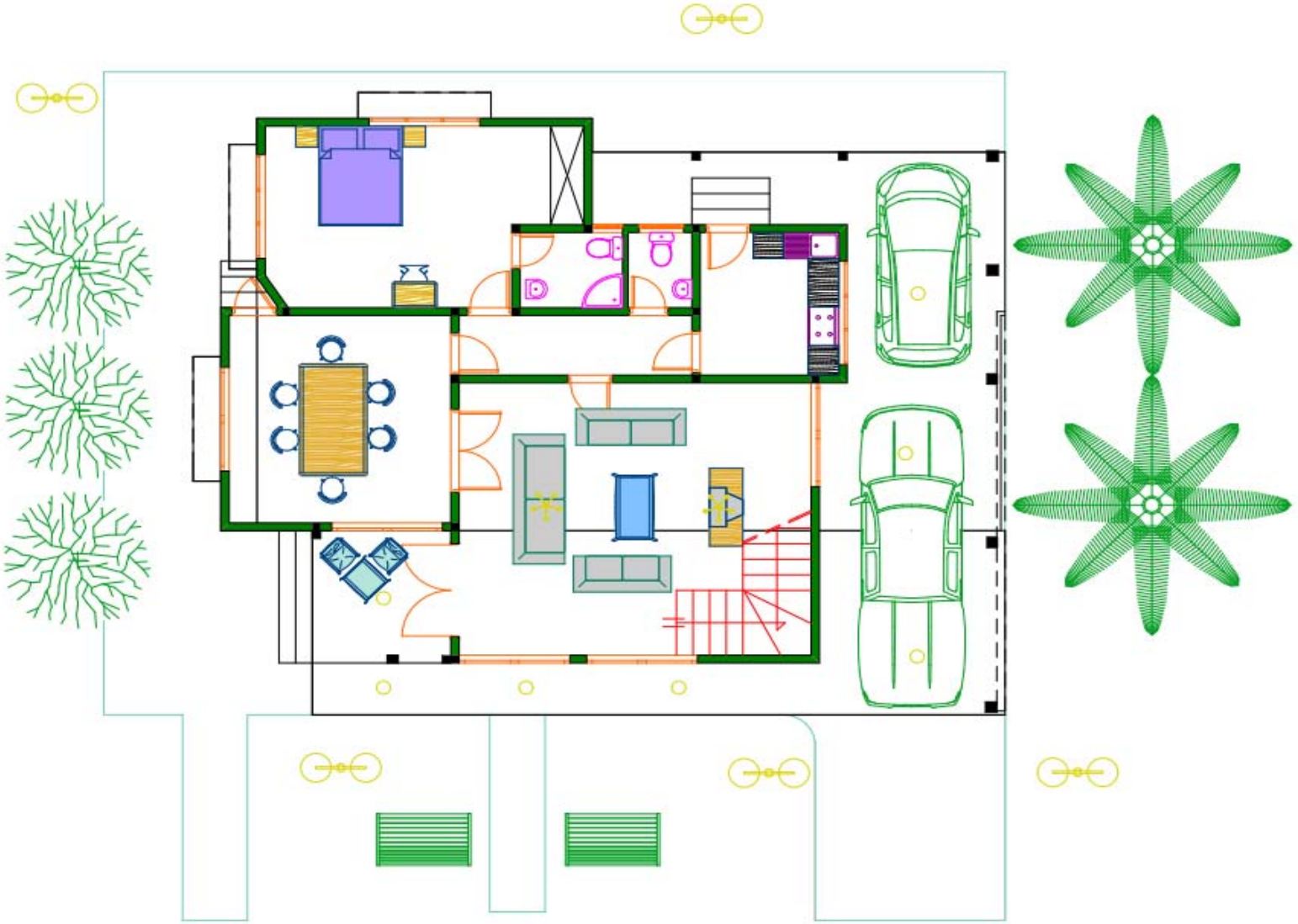


ANNEXE N° 7: PLAN COTE R+1



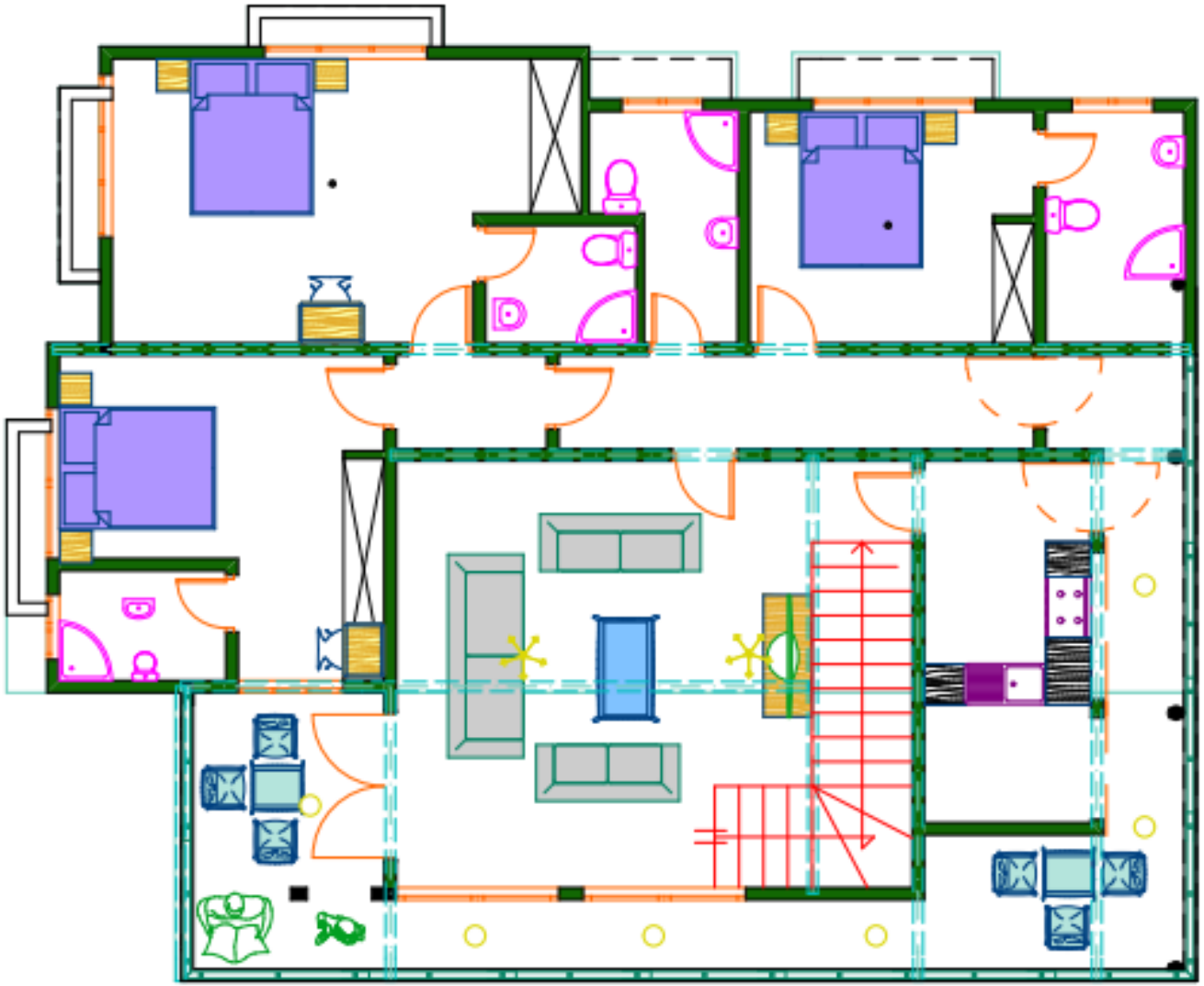
VUE EN PLAN R + 1

ANNEXE N° 8: PLAN AMENAGE RDC



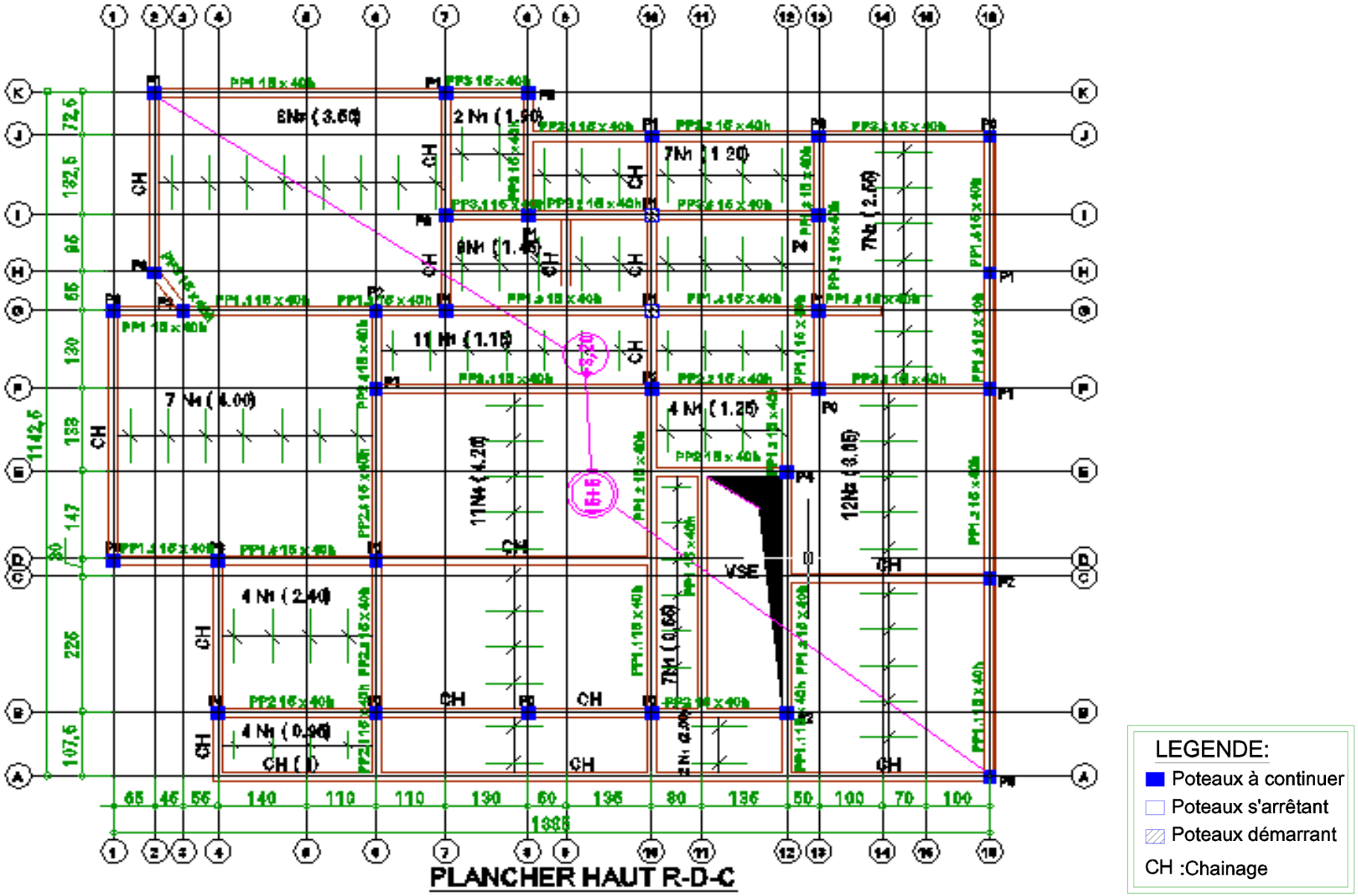
PLAN AMENAGE R - D - C

ANNEXE N° 9: PLAN AMENAGE R+1

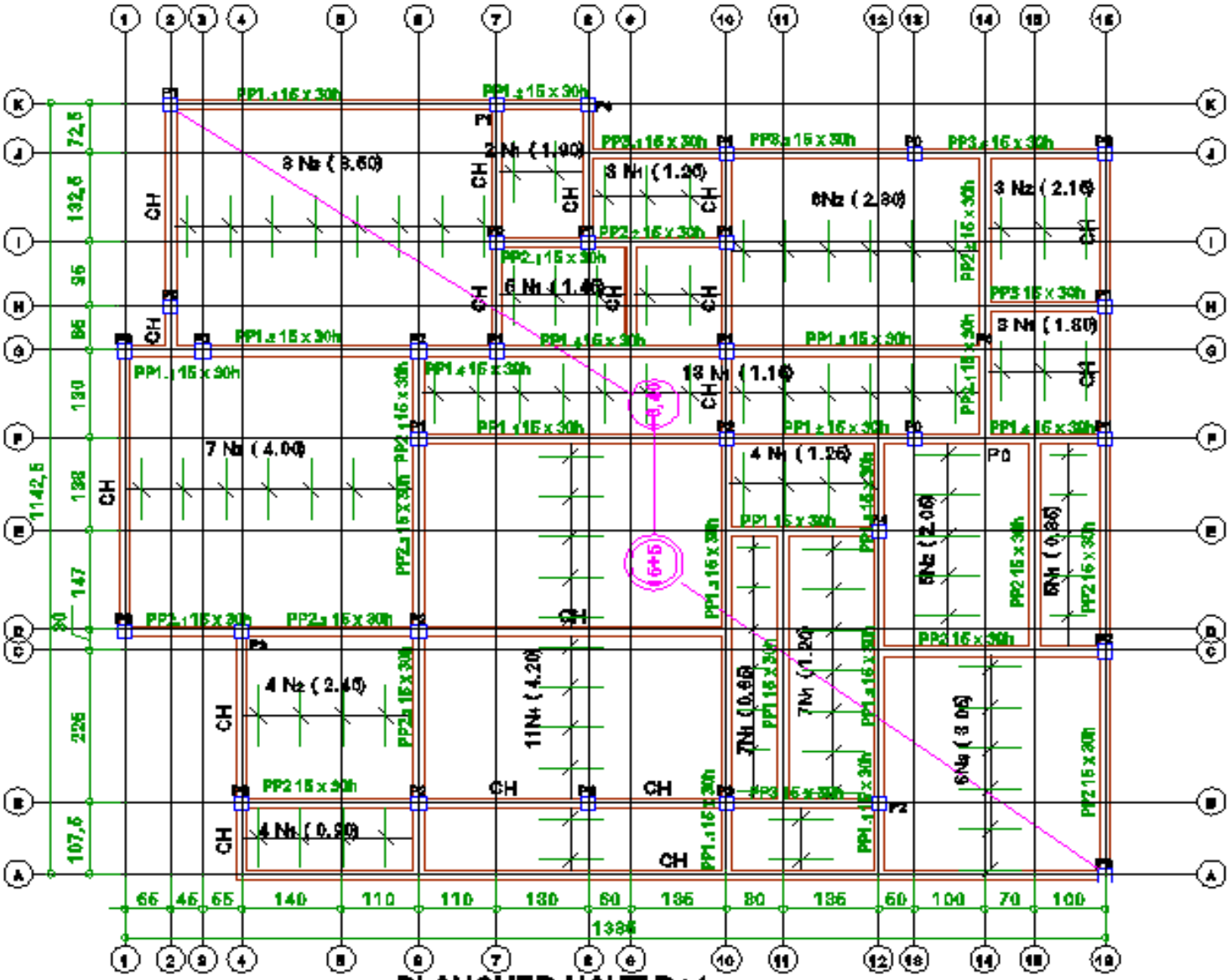


PLAN AMENAGE R + 1

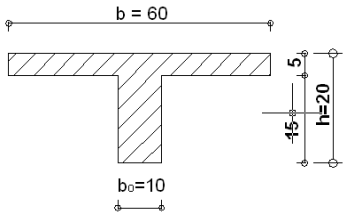
ANNEXE N° 10: PLAN DE POUTRAISON DU PLANCHER HAUT RDC



ANNEXE N° 11: PLAN DE POUTRAISON DU PLANCHER HAUT R+1



ANNEXE N° 12: EXEMPLE DE CALCUL DE LA NERVURE N4 DU PLANCHER HAUT R+1



Coupe transversale de la nervure N4

	Béton Armé	Béton Borassus
g (KN/ml)	3,39	3,30
q (KN/ml)	0,6	0,6

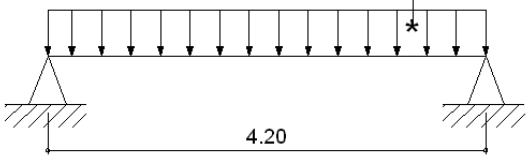


Schéma statique de la nervure N4

- ***Avec le béton armé d'acier***

bo	0,100	m
b	0,600	m
h0	0,050	m
h	0,200	m
fc28	35,00	MPa
fe	400,000	MPa
Mu	12,080	KNm
Mser	8,800	KNm
θ	1,000	
γb	1,500	
γs	1,150	

FPP	ELU	
RESULTATS		
d=0,9h	**0,180**	m
fbu	**19,833**	MPa
ft28	**2,700**	MPa
fed	**347,826**	MPa
σs (FP)	240	MPa

	unités	RESULTAT	
Mtu=bh0(d-(h0/2))fbu	KNm	92,23	KNm
COMPARAISON MU et Mtu	Mu≤Mtu		-
µbu=Mu/(bd²fbu)	-	0,19	-
γ=Mu/Mser	-	1,37	-
µlu=(1/10^4)(3620*γ+38,8fc28-2977)	-	0,34	-
Comparaison µbu et µlu	A'=0		-
α=1,25(1-(1-2*µbu)^0,5)	-	0,26	-
z=d(1-,4*α)	m	0,16	m
As= Mu/(Z*fed)	cm²	2,16	cm²

- ***Avec le béton armé de bois de Borassus***

E	17796,00	MPa
b0	0,10	m
b	0,60	m
h	0,20	m
h0	0,05	m
i,d=ih	0,90	
fc28	35,00	MPa
θ	1,00	
γb	1,50	
fe	224,00	MPa
γbb	1,35	
Mu	11,81	KNm
Mser	8,60	KNm
Ebéton	13000	MPa

Ebois/Ebéton	1,3689	
γ=Mu/Mser	1,3733	
d	0,18	m
ft28	2,70	MPa
fbu	19,83	MPa
fed	165,93	MPa
Détermination de MR		
MR	92,225	KNm

αlim	0,1932	
µlu	0,1314	
Mlu	8,45	KNm

	unités	RESULTAT	
Mtu=bh0(d-(h0/2))fbu	KNm	92,225	KNm
COMPARAISON MU et Mtu	Mu≤Mtu		-
Comparaison µbu et µlu	A' ≠ 0		-
z=d(1-,4*α)	m	0,14	m
σsce=9γfc28-0,9δ'(13fc28+415)		41,35	MPa
A'=(Mu-Mlu)/((d-d')*σsce)		5,02	cm²
A=(Mlu/(Z *fed))+(A'*σsce/fed)		4,32	cm²
V=(((b0*(h^2))+(b-b0)*(h0^2))/(2*(b0*h+(b-b0)*h0))		0,06	m
I=b0*((h^3)/3)+(b-b0)*((h0^3)/3)-(v^2)*(b0*h+h0*(b-b0))		0,0001	m^4
v'=h-v		0,1417	m
Amin= I*Ft28/(0,81*V'*h*fe)		0,71	cm²

ANNEXE N° 13: EXEMPLE DE CALCUL DE LA POUTRE PP1 DU PLANCHER HAUT RDC

- ***Avec le béton armé d'acier***

b	0,15	m
h	0,40	m
fc28	35,00	MPa
fe	400,00	MPa
Mu	93,21	KNm
Mser	67,49	KNm
θ	1,00	
γb	1,50	
γs	1,15	

FPP	ELU	
RESULTATS		
d=0,9h	**0,36**	m
fbu	**19,83**	MPa
ft28	**2,70**	MPa
fed	**347,83**	MPa
Comparaison μbu et μlu	A'=0	
A	8,66	cm²
A'	0,00	cm²
Amin	0,84	cm²

μbu=Mu/(bd²fbu)	0,24	-
γ=Mu/Mser	1,38	-
μlu=(1/10^4)(3620*γ+38,8 fc28-2977)	0,34	-
Comparaison μbu et μlu	μbu ≤ μlu	
α=1,25(1-(1-2*μbu)^0,5)	0,35	-
z=d(1-,4*α)	0,31	m
As= Mu/(Z*fed)	8,66	cm²
Amin	0,84	cm²

- ***Avec le béton armé de bois de Borassus***

E	17796,00	MPa
b	0,15	m
h	0,40	m
i,d=ih	0,90	m
fc28	35,00	MPa
θ	1,00	
γb	1,50	
fe	224,00	MPa
γbb	1,35	
Mu	90,79	KNm
Mser	56,00	KNm
$E_{béton}$	13000,00	MPa

$E_{bois}/E_{béton}$	1,3689	
γ=Mu/Mser	1,62	
d	0,36	m
ft28	2,70	MPa
fbu	19,83	MPa
fed	165,93	MPa
Détermination de MR		
MR	71,61	KNm

αlim	0,22	
μbulim	0,1778	
ML	68,54	KNm
z=d(1-,4*αlim)	0,33	m

μbu=Mu/(bd²fbu)	0,24	
α=1,25(1-(1-2*μbu)^0,5)	0,34	
z=d(1-,4*α)	0,31	m
Abt= Mu/(Z*fed)	17,60	cm²

ANNEXE N° 14: ESTIMATION DES SECTIONS D'ARMATURES DE POUTRELLES

	BETON ARME D'ACIER							
	Plancher haut RDC				**Plancher haut R+1**			
	N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
	50	7	15	18	46	18	21	11
L	2,00	2,55	3,50	4,20	2,00	2,55	3,50	4,20
Mu=(pu)l²/8 (KNml)	2,70	4,39	8,27	11,91	2,74	4,45	8,39	12,08
Mser=(pser)l²/8 (KNml)	1,95	3,17	5,97	8,60	2,00	3,24	6,11	8,80
A (cm²)	0,44	0,73	1,42	2,12	0,45	0,74	1,44	2,16
A'(cm²)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Amin (cm²)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
VOLUME A	0,0044	0,0013	0,0075	0,0160	0,0041	0,0034	0,0106	0,0100
VOLUME A'	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
TOTAL	0,057							

	BETON ARME DE BORASSUS							
	Plancher haut RDC				**Plancher haut R+1**			
	N1	N2	N3	N4	N1	N2	N3	N4
	50	7	15	18	46	18	21	11
L	2,00	2,55	3,50	4,20	1,90	2,40	4,00	4,20
Mu=(pu)l²/8 (KNml)	2,64	4,29	8,08	11,64	2,42	3,86	10,71	11,81
Mser=(pser)l²/8 (KNml)	1,91	3,10	5,83	8,40	1,76	2,81	7,80	8,60
A (cm²)	0,89	1,44	2,73	4,25	0,81	1,30	3,91	4,32
A'(cm²)	0,00	0,00	0,00	4,56	0,00	0,00	3,38	5,02
Amin (cm²)	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71	0,71
VOLUME A	0,009	0,003	0,014	0,032	0,007	0,006	0,033	0,020
VOLUME A'	0,000	0,000	0,000	0,034	0,000	0,000	0,028	0,023
TOTAL	0,209							

ANNEXE N° 15: ESTIMATION DES SECTIONS D'ARMATURES DE POUTRES

		BORASSUS		ACIER		volume de borassus		volume d'acier	
RDC	Longueur	A(cm²)	A'(cm²)	A(cm²)	A'(cm²)	m3	m3	m3	m3
PP1	2,15	5,55	0,00	2,72	0,00	0,001	0,000	0,001	0,000
PP2	2,50	5,55	0,00	2,72	0,00	0,001	0,000	0,001	0,000
PP3	0,79	2,54	0,00	1,25	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
PP4	4,02	17,60	0,00	8,66	0,00	0,007	0,000	0,003	0,000
PP5	2,15	5,55	0,00	2,72	0,00	0,001	0,000	0,001	0,000
PP6	4,60	17,60	0,00	8,66	0,00	0,008	0,000	0,004	0,000
PP7	1,30	2,54	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000
PP8	7,30	2,54	0,00	0,00	0,00	0,002	0,000	0,000	0,000
PP9	2,05	2,54	0,00	0,00	0,00	0,001	0,000	0,000	0,000
PP10	5,90	2,54	0,00	0,00	0,00	0,001	0,000	0,000	0,000
PP11	12,15	17,60	0,00	8,66	0,00	0,021	0,000	0,011	0,000
PP12	9,70	5,55	0,00	2,72	0,00	0,005	0,000	0,003	0,000
PP13	4,15	17,60	0,00	8,66	0,00	0,007	0,000	0,004	0,000
PP14	7,78	5,55	0,00	2,72	0,00	0,004	0,000	0,002	0,000
PP15	6,48	17,60	0,00	8,66	0,00	0,011	0,000	0,006	0,000
PP16	6,48	17,60	0,00	8,66	0,00	0,011	0,000	0,006	0,000
PP17	4,20	2,54	0,00	23,25	0,00	0,001	0,000	0,010	0,000
PP18	10,69	2,54	0,00	0,00	0,00	0,003	0,000	0,000	0,000
TOTAL	**94,39**	**151,13**	**0,00**	**90,06**	**0,00**	**0,088**	**0,000**	**0,049**	**0,000**

		BORASSUS		ACIER		volume de borassus		volume d'acier	
R+1	Longueur	A(cm²)	A'(cm²)	A(cm²)	A'(cm²)	m3	m3	m3	m3
PP1	7,3	1,98	0	0,84	0	0,001	0,000	0,001	0,000
PP2	3,25	1,98	0	0,84	0	0,001	0,000	0,000	0,000
PP3	1,7	1,98	0	0,84	0	0,000	0,000	0,000	0,000
PP4	8,5	12,65	23,25	4,58	0	0,011	0,020	0,004	0,000
PP5	3,65	12,65	23,25	4,58	0	0,005	0,008	0,002	0,000
PP6	9,7	12,65	23,25	4,58	0	0,012	0,023	0,004	0,000
PP7	2,15	4,89	0	1,75	0	0,001	0,000	0,000	0,000
PP8	4,15	4,89	0	1,75	0	0,002	0,000	0,001	0,000
PP9	7,78	4,89	0	1,75	0	0,004	0,000	0,001	0,000
PP10	2,5	4,89	0	1,75	0	0,001	0,000	0,000	0,000
PP11	6,48	12,65	23,25	4,58	0	0,008	0,015	0,003	0,000
PP12	6,48	12,65	23,25	4,58	0	0,008	0,015	0,003	0,000
PP13	4,02	12,65	23,25	4,58	0	0,005	0,009	0,002	0,000
PP14	4,22	4,89	0	1,75	0	0,002	0,000	0,001	0,000
PP15	6,48	4,89	0	1,75	0	0,003	0,000	0,001	0,000
PP16	3,2	4,89	0	1,75	0	0,002	0,000	0,001	0,000
PP17	3,15	4,89	0	1,75	0	0,002	0,000	0,001	0,000
PP18	4,6	12,65	23,25	4,58	0	0,006	0,011	0,002	0,000
PP19	1,3	1,98	0	0,84	0	0,000	0,000	0,000	0,000
PP20	2,15	4,89	0	1,75	0	0,001	0,000	0,000	0,000
TOTAL	**92,760**	**140,480**	**162 ,750**	**51,170**	**0,000**	**0,075**	**0,101**	**0,027**	**0,000**

	BORASSUS	ACIER
Volume des armatures longitudinales de poutres (m3)	0,264	0,077
Volume des armatures longitudinales de poutrelles (m3)	0,2095	0,0573
Total des volumes (m3)	0,474	0,134
Total poids (m3)	3,270	1,051
Masse volumique (T/m3)	6,900	7,850
Prix de la tonne	25000	550000
Prix total	98100	693473
Prix total acier/Prix total borassus	7,1	

ANNEXE N° 16: Armatures de Borassus

Montage d'armatures de Borassus pour coulage d'une poutre

.1 : éprouvette de borassus de section circulaire

.2 : éprouvette de borassus de section carrée

Créneaux de largeur 5cm

.3 : éprouvette de borassus de section circulaire crénelée

Utilisation d'armatures de Borassus pour chaînage

ANNEXE N° 17: Caractéristiques physiques et mécaniques du bois de rônier

Caractéristiques et mécaniques	Valeurs obtenues
Densité basale	0,69±0,07
Densité à 12% d'humidité	0,89±0,03
Taux de retrait longitudinal total (%)	nul
Taux de retrait tangentiel total (%)	5,92 ± 0,71
Taux de retrait radial total (%)	5,77 ± 0,93
Taux de retrait volumique total (%)	9,61 ± 2,57
Contrainte limite élastique en traction parallèle aux fibres à H=12% (MPa)	201,34±12,28
Contrainte de rupture en traction parallèle aux fibres à H=12% (MPa)	303,04±37,39
Contrainte de rupture en compression parallèle aux fibres à H=12% (MPa)	82,17 ± 27,29
Contrainte de rupture en compression perpendiculaire aux fibres à H=12% (MPa)	22,56 ± 2,10
Contrainte de rupture en flexion 4 points parallèles aux fibres à H=12% (MPa)	186,34 ± 19,85
Module d'Young en flexion 4 points parallèle aux fibres à H=12% (MPa)	17196,86 ± 1145,19
Contrainte de cisaillement perpendiculaire aux fibres (MPa)	13,59±1,02
Contrainte de cisaillement parallèle aux fibres	0,88±0,22