

**Faculté d'architecture, d'ingénierie  
architecturale, d'urbanisme**

# **Recherche d'assemblages colonne- colonne-poutres pour bâtiments multi-étagés en bois rond**

Auteur : Hugo De Coster  
Promoteur : Pierre Latteur  
Assesseure : Serena Van Nimwegen  
Lecteur : Justin Goosse  
Année académique 2022-2023  
Master : ingénieur civil et architecte à finalité spécialisée





## Remerciements

Je remercie Mr Latteur pour l'enthousiasme sincère qu'il manifeste pour ce sujet ainsi que son franc parlé.

Je remercie également Serena Van Nimwegen qui m'a apporté spontanément son soutien et de la documentation abondante.

Je remercie ma famille et ma compagne qui ont été le contrepoids indispensable pour mon épanouissement aux études.

<u>1</u>	<u>INTRODUCTION.....</u>	<u>4</u>
<u>2</u>	<u>ETAT DE L'ART.....</u>	<u>7</u>
2.1	Constructions multi-étages en bois massif : système à colombage.....	7
2.2	Constructions multi-étages en bois massif : système ossature bois.....	7
2.3	Mise en œuvre du bois rond : usage de bras robotisé.....	8
2.4	Mise en œuvre du bois rond : taille manuelle.....	8
2.5	Innovation et commercialisation des assemblages : solution bois-bois.....	9
2.6	Innovation et commercialisation des assemblages : solution métal.....	9
<u>3</u>	<u>LA FORÊT : QUANTITÉ, QUALITÉ ET DIAMÈTRE DES TRONCS. ....</u>	<u>11</u>
3.1	Répondre à un besoin de quantité.....	11
3.1.1	Ambition du système constructif.....	11
3.1.2	Exemple de besoin en termes de quantité.....	12
3.2	Analyse critique des normes d'itinéraire sylvicole pour connaître le diamètre et la qualité des troncs disponibles.....	12
3.3	Choix de bornes pour la qualité des troncs.....	16
3.4	Choix de bornes pour le diamètre des troncs.....	16
3.4.1	Problématiques liées à un diamètre excessif.....	17
3.4.2	Problématique liée à un diamètre trop petit.....	17
3.4.3	Volonté de diminuer le diamètre à l'intérieur de la plage de valeurs retenues.....	18
3.5	Conclusion de chapitre.....	18
<u>4</u>	<u>HYPOTHÈSES ARCHITECTURALES ET CAS DE CHARGES.....</u>	<u>20</u>
4.1	Hypothèses architecturales.....	20
4.2	Descente de charges :.....	20
4.3	Combinaisons de charges.....	21
4.4	Charges de poids propres.....	21
4.5	Charges d'exploitations.....	22
4.6	Surface de plancher.....	22
4.7	Hauteur d'étages.....	23
4.8	Coefficients sur les matériaux.....	23
4.9	Synthèse des valeurs retenues.....	23
4.10	Conclusion de chapitre.....	24
<u>5</u>	<u>TIPOLOGIES D'ASSEMBLAGES ET ANALYSES.....</u>	<u>26</u>
5.1	Assemblage type bois-bois.....	27
5.2	Assemblage type console.....	27

5.3	Assemblage type composite.....	27
5.4	Description graphique et légende .....	28
5.5	Code couleurs et type de lignes .....	28
5.6	Tableau de valeurs pour accompagner la lecture des graphiques .....	29
5.7	Assemblages type bois-bois : rupture par compression .....	30
5.8	Assemblages type consoles : rupture par flambement.....	31
5.9	Assemblages type composites : rupture par flexion composée.....	32
5.10	Comparaison des assemblages pour une situation défavorable .....	33
5.11	Comparaison des assemblages pour une situation intermédiaire.....	34
5.12	Comparaison des assemblages pour une situation favorable.....	35
5.13	Conclusion de chapitre .....	36
<b>6</b>	<b><u>EFFETS DU FEU .....</u></b>	<b>38</b>
6.1	Effet du feu sur un mode de rupture par flambement.....	38
6.2	Effet du feu sur les assemblages type bois-bois.....	41
6.3	Graphiques pour assemblages bois-bois résistant au feu.....	43
6.4	Conclusion de chapitre .....	44
<b>7</b>	<b><u>CONCEPTION PARAMÉTRIQUE DES ASSEMBLAGES .....</u></b>	<b>46</b>
<b>8</b>	<b><u>CAS CONCRET ET SOLUTIONS D'ASSEMBLAGES .....</u></b>	<b>48</b>
8.1	BLC vs Bois rond : Ce qui va pour un ne va pas pour l'autre. Contre-exemple d'assemblage avec ferrure en âme.....	49
8.2	Assemblage type bois-bois : problématique pour les bâtiments R+1 .....	53
8.3	Assemblage entre type bois-bois et type console.....	54
8.4	Assemblage en console, pièces rapportées en bois.....	55
8.5	Assemblage en console, pièce rapportée en béton.....	56
8.6	Assemblage type composite, IPE béton (R+9).....	58
8.7	Synthèse des propositions d'assemblages.....	59
<b>9</b>	<b><u>EXPLORATIONS FUTURES ET RÉFLEXIONS SUR LA MISE EN ŒUVRE .....</u></b>	<b>61</b>
<b>10</b>	<b><u>CONCLUSION .....</u></b>	<b>65</b>
<b>11</b>	<b><u>BIBLIOGRAPHIE .....</u></b>	<b>67</b>
<b>12</b>	<b><u>ANNEXES .....</u></b>	<b>69</b>
12.1	Développements des formules mathématiques utilisées pour les graphiques .....	69
12.2	Python : graphique adimensionnel + exigence diamètre pour tenue au feu.....	72
12.3	Python : graphique tenue au feu des assemblages bois-bois .....	75

# Introduction

# 1 Introduction

Ce TFE s'intéresse à l'étude des assemblages poutre-colonnes-colonne dans la construction en bois rond multi-étages. Une étude de leur comportement y est présentée et débouche sur quelques propositions d'assemblages estimés pertinentes.

La raison de cette recherche est le souhait de valoriser l'emploi de grumes comme matériau de construction. En effet, ce matériau attire notre attention par son faible coût qui se justifie par une transformation minimale des troncs.

Cependant, si nous souhaitons utiliser ce matériau dans un système constructif type poteau poutre, le diamètre limité des grumes contraint le bâtiment à rester sous certaines dimensions. Dans ce contexte, la colonne est sollicitée par la taille des planchers et le nombre d'étages, mais aussi par le type d'assemblage que nous choisirons. L'étude des assemblages permet donc d'élargir le potentiel (taille des planchers et nombre d'étages) de la construction en bois rond. Si les capacités de ce matériau sont mal exploitées, ce type de constructions restera à la marge, alors que si nous les valorisons, nous bénéficierons d'un nouveau matériau soutenable sur le marché de la construction.

Dans ce TFE, trois modes de rupture sont identifiés pour dimensionner la colonne, correspondant à des typologies d'assemblage caractérisées par leur principale faiblesse dimensionnante : les assemblages bois-bois (rupture locale par compression), les assemblages en consoles (rupture globale par flexion composée) et les assemblages composite acier bois ou bois béton (rupture globale par flambement).

Nous analyserons chacun de ces modes de ruptures avec des valeurs adimensionnelles qui nous permettront d'identifier en toute généralité quel est le potentiel de chaque typologie d'assemblage pour le système constructif poteaux poutres. Nous prendrons le soin de borner les plages de valeurs possibles pour chaque variable que nous utiliserons de sorte à représenter le potentiel de chaque typologie dans les pires et les meilleures situations. Nous ajouterons à cela une étude de l'effet du feu sur ces différents modes de ruptures et la présentation d'un programme de conceptions paramétriques des assemblages. Ce travail se terminera sur quelques propositions qui tiennent compte des analyses précédemment effectuées.

Pour bien identifier le déroulement des étapes de ce travail nous vous invitons à prendre connaissance de l'organigramme présenté à la page suivante.

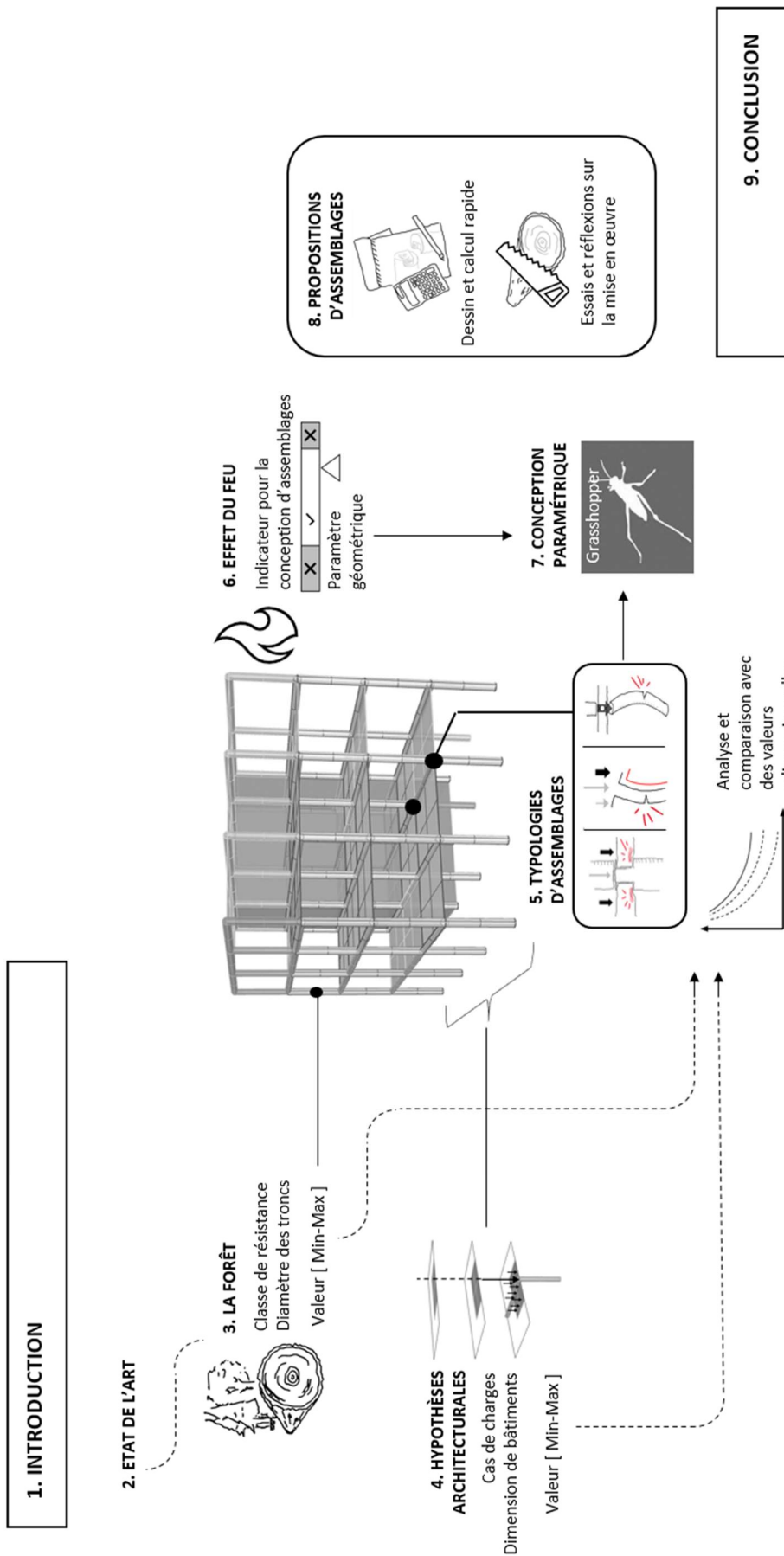


Figure 1-1 Etapes clés

# Etat de l'art

## 2 Etat de l'art

Les assemblages pour la construction multi-étages en bois rond se trouve à la croisée d'un grand nombre de disciplines. De manière non exhaustive, nous présentons ici quelques sujets d'intérêt pour mieux situer la place de notre travail dans le paysage de la recherche.

### 2.1 Constructions multi-étages en bois massif : système à colombage

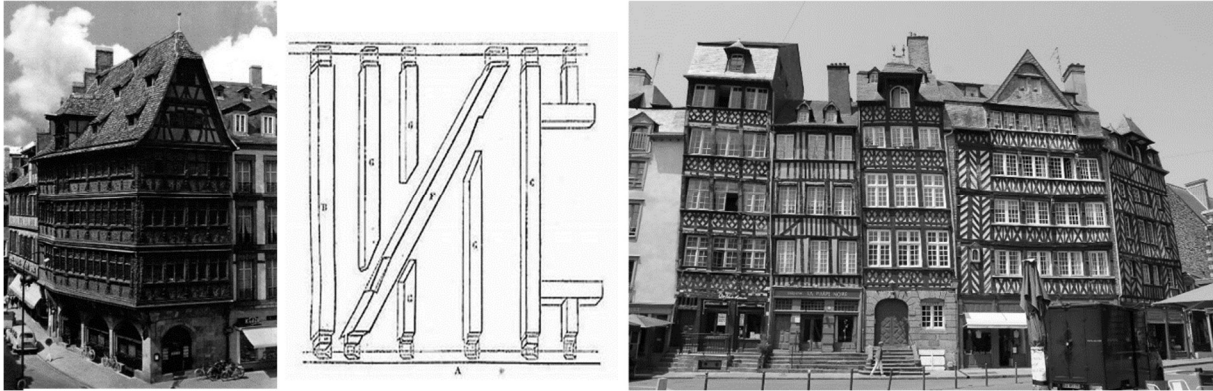


Figure 2-1 La Maison Kammerzell, Starsbourg. XVI ème siècle et Place du Champ Jacquet, Rennes.

Nous pouvons voir à travers ces deux exemples que l'usage de bois massifs avec un système à colombages permet déjà des réalisations multi-étages qui ont su traverser les âges. Ce simple constat ne suffit cependant pas à énoncer l'aptitude du bois massif à couvrir des besoins architecturaux au 21<sup>e</sup> siècle. Actuellement, certaines programmations demandent plus d'espaces et imposent des chargements plus importants que ceux qui sont attribués à ces exemples. En outre, nous ne savons pas où se situent ces bâtiments vis-à-vis des normes de calcul actuel.

### 2.2 Constructions multi-étages en bois massif : système ossature bois

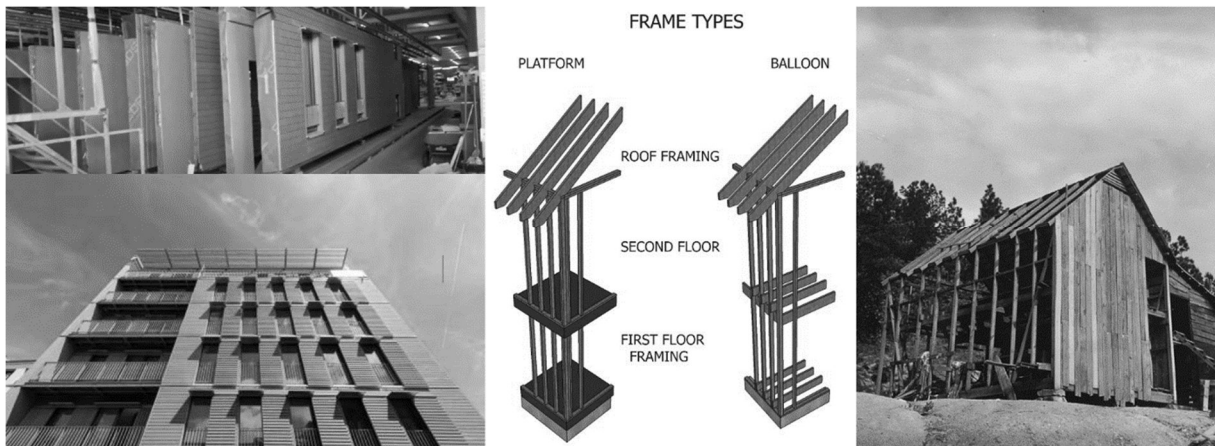


Figure 2-2 Immeuble "Bois de bout" à Montreuil. Technique Plateforme R+5. A003 Architectes et Coosa Valley, Alabama.

Toujours en bois massif mais avec un autre système constructif nous voyons sur l'illustration de gauche l'immeuble « Bois de bout » à Montreuil qui est un bâtiment précurseur pour du multi-étages en ossature bois. A droite un bâtiment ancien avant la commercialisation des panneaux. Ce système constructif pour des bâtiments multi-étages a pris du temps à s'instaurer non pas pour des raisons techniques mais pour faute d'un cadre juridique clair en la matière notamment concernant les aspects liés au feu. Aujourd'hui, le domaine architectural accessible et la rentabilité économique de ce système sont tout à fait satisfaisants. Bien que le poteau poutre soit un peu différent, les performances structurelles et économiques peuvent nous enthousiasmer et être source d'inspiration.

### 2.3 Mise en œuvre du bois rond : usage de bras robotisé



Figure 2-3 Photos grumes usinées, <https://mobicsa.be>

L'entreprise « Mobic » fait partie des entreprises pionnières pour l'usage de bras robotisé dans la construction bois. Il est difficile de connaître la rentabilité d'un tel système de production, toutefois nous voyons que les possibilités sont variées et que les résultats suscitent l'intérêt du consommateur tantôt à travers le rappel des chalets rustiques de montagne tantôt à travers un vocabulaire architectural plus contemporain. Force est de constater que ce type de réalisation reste encore à la marge et n'a pas conquis les bâtiments multiétages.

### 2.4 Mise en œuvre du bois rond : taille manuelle



Figure 2-4 photos hangar auto-construit en grumes, <https://www.latelierpaysan.org/>

La coopérative d'auto-construction « L'atelier paysan » en France propose des formations pour la réalisation en auto-construction avec une tronçonneuse. Selon eux un bâtiment agricole en kit coûte environ 130€ du m<sup>2</sup> (sans le montage de la structure) alors qu'un bâtiment réalisé en bois ronds revient à 80€ du m<sup>2</sup>. Il faudrait quatre ou cinq personnes pour monter 200 à 300 m<sup>2</sup> de hangar en une dizaine de jours. Dans ce que nous présentons ici nous sentons le contrepoint de l'usage du robot qui ne semble pas être une condition indispensable pour atteindre une rentabilité économique. Il y a une certaine facilité et une accessibilité à la réalisation qui semble prometteuses pour l'émancipation de l'usage de bois ronds en construction. Une part intéressante de leur approche est qu'ils considèrent l'importance de l'emploi de bois local et proposent des formations d'abattage et de débardage à cette fin. Ceci nous permet d'insister sur l'importance du lien étroit qu'il y a entre ce système constructif et la forêt.

## 2.5 Innovation et commercialisation des assemblages : solution bois-bois

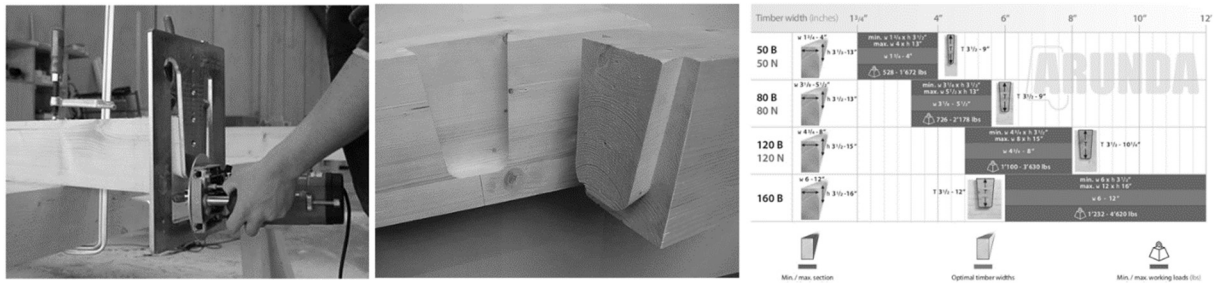


Figure 2-5 Assemblage en queue d'aronde avec gabarit

Dans le domaine privé, certaines entreprises font de la recherche et des essais en laboratoire. Nous voyons ici une proposition d'assemblage bois-bois réalisable avec un gabarit. La géométrie complexe rend le calcul difficile ce qui justifie les essais en laboratoire et les tables de dimensionnement fournies par les revendeurs du gabarit.

## 2.6 Innovation et commercialisation des assemblages : solution métal

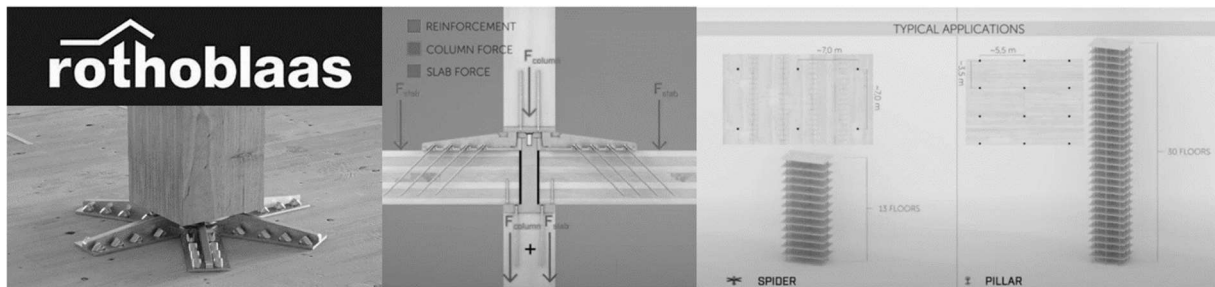


Figure 2-6 Connecteur colonne-plancher-colonne pour bâtiment en CLT. Rothoblaas

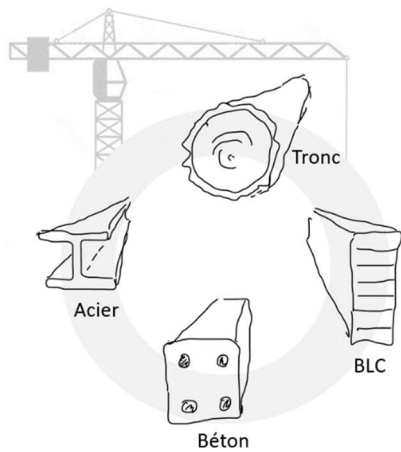
Toujours dans le domaine privé, l'entreprise Rothoblaas bien établie dans le secteur de la construction bois au niveau européen dispose d'un laboratoire de recherches très actif. Ici nous voyons un connecteur poutre plancher hautement élaboré pour la construction multi-étages en CLT. Il ne semble cependant pas y avoir de solution ou de publication concernant la construction en bois rond venant de leur part ou d'autres entreprises similaires.

# La forêt : quantité, qualité, et diamètre des troncs

### 3 La forêt : quantité, qualité et diamètre des troncs.

#### 3.1 Répondre à un besoin de quantité

##### 3.1.1 Ambition du système constructif

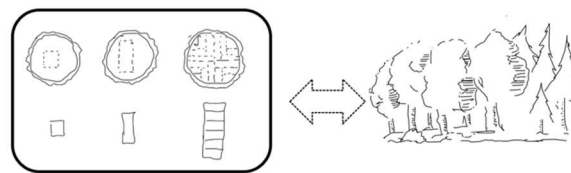


Le système constructif doit être concurrentiel et doit être capable de répondre à une forte demande. Il y a donc lieu de s'intéresser en conséquence aux ressources disponibles et nécessaires. Une « bonne » compréhension de ce qu'est la forêt et de ce que nous pouvons en tirer est primordiale pour commencer notre étude structurelle en introduisant dans nos équations des valeurs cohérentes.

Figure 3-1 Ambition du système constructif

Les bois équarris peuvent théoriquement se trouver en toutes dimensions et toutes qualités notamment par le biais du bois lamellé collé qui recolle plusieurs parties d'arbre de bonne qualité pour en faire des poutres de grande dimension. Lorsque nous construisons en bois rond, les questions relatives à la quantité, la qualité et aux diamètres des troncs disponibles sont des questions qui ne peuvent être traitées indépendamment.

Poutres équarries et bois d'ingénierie : Peu d'exigences vis-à-vis de la forêt



Usages de grumes sans transformations : Implique une relation étroite avec la forêt.

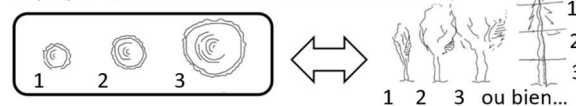


Figure 3-2 Relation bois de constructions- forêt

### 3.1.2 Exemple de besoin en termes de quantité

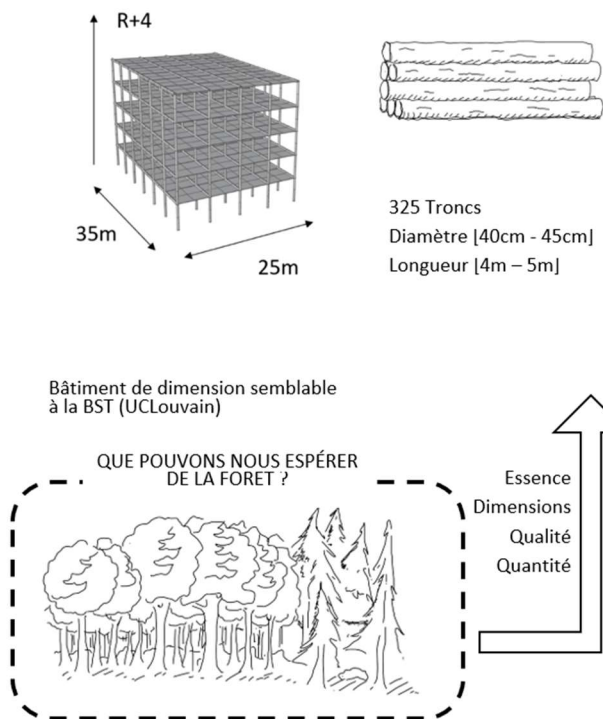


Figure 3-4 Exemple de besoin quantitatif

Dans l'hypothèse architecturale d'un bâtiment poteaux poutres, nous pouvons toucher un ordre de grandeur à travers l'exemple illustré ci-contre. Il est raisonnable de penser que, si de tels bâtiments peuvent voir le jour le système constructif aura atteint ses objectifs. Cet exemple indique que nous serions donc en mesure d'espérer pouvoir acheter sans trop de difficultés 325 grumes de 5m avoisinant les 450mm de diamètre.

Dans ce lot une certaine rectitude est attendue pour les poutres, car elles sont le support des solives du plancher. En revanche, nous pourrions être moins exigeants à ce niveau pour les colonnes.

### 3.2 Analyse critique des normes d'itinéraire sylvicole pour connaître le diamètre et la qualité des troncs disponibles.



Figure 3-5 Intérêt pour la futaie régulière

Pour étudier l'aptitude de la forêt à répondre à une telle demande, nous proposons de baser la suite de nos raisonnements sur une sylviculture en futaie régulière. Ce type d'exploitations est encore fort répandu et permet une production de bois prévisible.

L'itinéraire sylvicole est le document qui reprends sous forme de tableau les interventions successives qui seront faites et qui planifie le diamètre et la quantité des troncs qui seront produit durant toute la vie du peuplement. Il existe des normes d'itinéraires sylvicole basé sur des cas types, mais chaque situation appellera une certaine adaptation qui aura de l'influence sur le diamètre et la qualité des troncs produit. Pour apprécier la valeur que nous pouvons donner à ces normes et comprendre

l'implication d'un éventuel écart aux valeurs que nous retiendrons pour cette étude, il nous semble pertinent d'expliquer certains fondements de la sylviculture en futaie régulière.

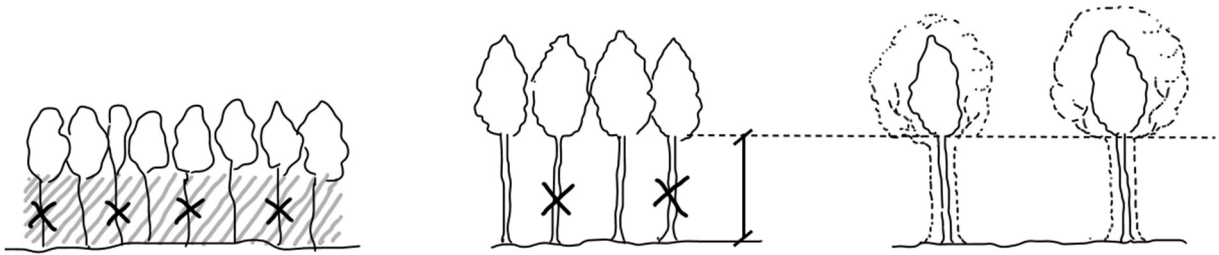


Figure 3-6 Principe général de la sylviculture en futaie régulière

En futaie régulière, les arbres sont plantés très serrés. La compétition pour la lumière stimule la croissance en hauteur. Les branches maintenues dans l'ombre sous le couvert forestier meurent et s'élaguent naturellement de sorte à obtenir un tronc offrant un bois de qualité, sans nœuds. On appelle ceci la phase de compression.

Des coupes d'éclaircie sont faites tous les x temps avec une intensité plus ou moins forte pour laisser la place aux plus beaux spécimens. La phase de compression continue jusqu'à ce que la hauteur de fût élaguée souhaités soit atteinte. Généralement 5 à 7m pour les feuillus.

La phase de compression s'arrête lorsque les houppiers sont généreusement dégagés et mis en lumière. L'arbre consacra alors son énergie à développer son houppier et à grossir son tronc sans lui donner davantage de hauteur et ceci jusqu' à ce qu'il rentre dans une phase de sénescence.

Toute en tenant compte du principe précédemment énoncé, chaque parcelle donnera des troncs différents selon que la sylviculture soit davantage conservatrice ou dynamique.

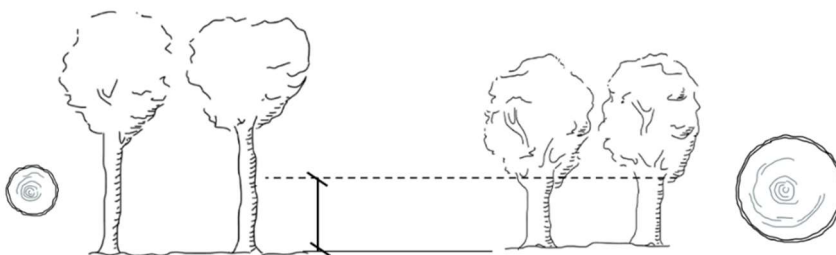


Figure 3-7 Influence du mode de sylviculture sur le diamètre des troncs

Sylviculture conservatrice.

Décompression tardive : la longueur du fût est privilégiée sur le diamètre. Le temps ne fera pas grossir le tronc indéfiniment et l'arbre finira par atteindre un état de sénescence et puis mourir.

Sylviculture dynamique.

Décompression précoce : Le diamètre du tronc a été privilégié sur la hauteur. Les premières grosses branches dites « charpentières » ne peuvent pas être élaguées sous risque de tuer l'arbre. La hauteur du fût élagué est donc fixée au moment de la décompression.

Ceci nous amène à dire qu'il est très difficile de dire si les normes d'itinéraires représentent une réalité de terrain. Nous pouvons prendre, en toute conscience, les valeurs données par des normes d'itinéraire sylvicole et, avec les connaissances abordées, nous pouvons spéculer raisonnablement sur la qualité des troncs dans les grandes tendances. Le schéma suivant reprend des valeurs de normes Hollandaise et synthétise le raisonnement que nous venons de dresser. Nous avons ajouté des indications de rendement (nombre d'arbre par hectare à l'âge mature) et de prix des bois sur pied car cela nous semble être des informations intéressantes pour cette étude.

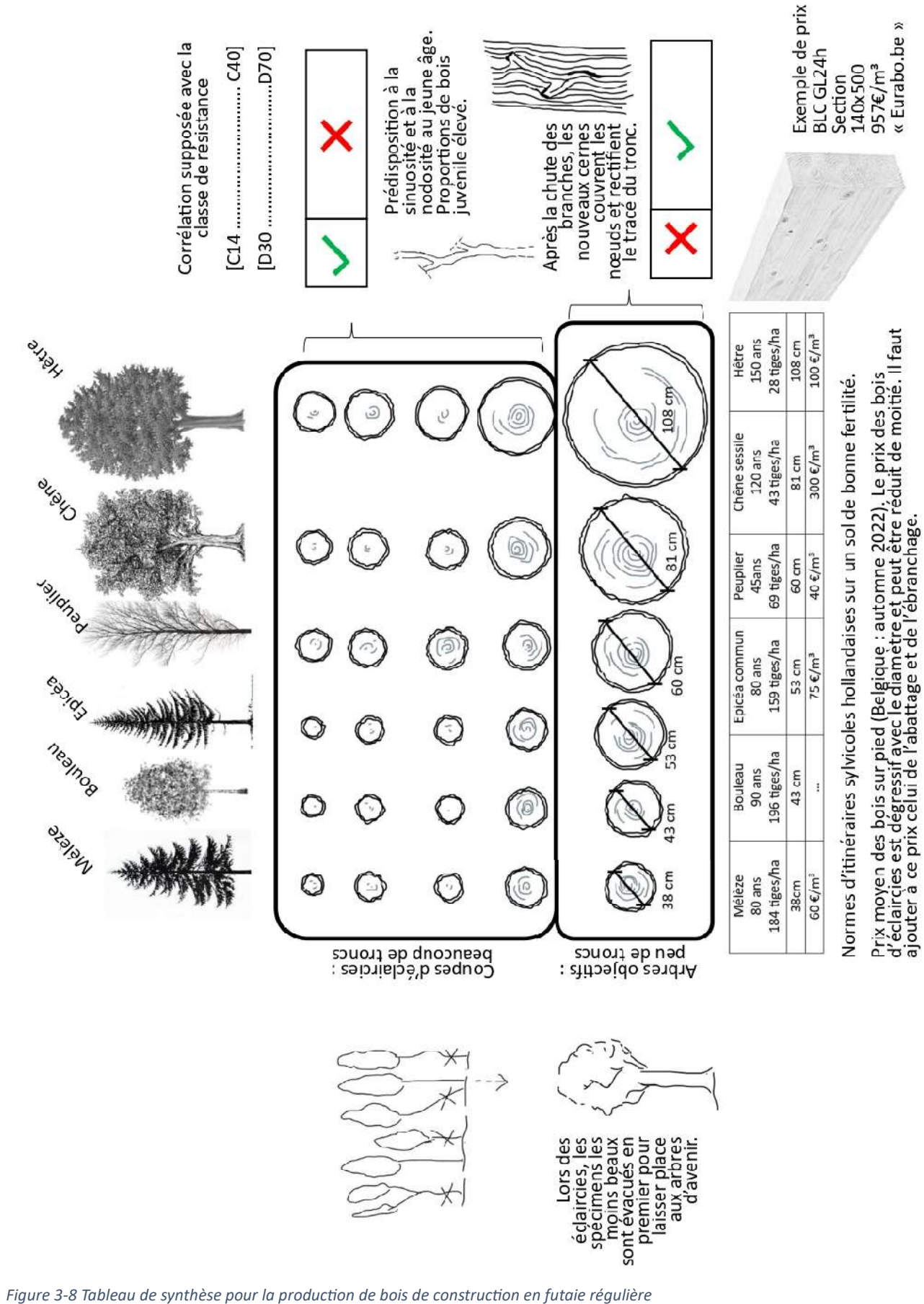


Figure 3-8 Tableau de synthèse pour la production de bois de construction en futaie régulière

### 3.3 Choix de bornes pour la qualité des troncs

A ce jour il n'existe pas de norme pour l'attribution d'une classe de résistance pour les bois ronds. La corrélation que nous faisons entre les bois d'éclaircies et leur qualité n'est pas rigoureuse et ne pourra sans doute jamais l'être, mais le point d'attention soulevé est qu'il semblerait que nous ne pouvons pas diminuer le diamètre et augmenter la qualité du bois en même temps. Les deux curseurs, qualité et diamètre, semblent aller de pair. Pour la suite de cette étude nous proposons de retenir une qualité C24 pour les résineux et D30 pour les feuillus. Notons qu'il s'agit des classes que nous trouvons le plus couramment dans le commerce pour les bois équarris. Ce choix permet de travailler en toute généralité quelle que soit le diamètre et cela en étant du côté de la sécurité. Ces valeurs pourront être adaptées en notre faveur si un système de classifications vient à se mettre en place ou si des tests sur chaque grume utilisée sont réalisés.

Désignation	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C30	C35	C40	C45	C50
Contrainte de flexion : $f_{m,k}$ (MPa)	14	16	18	20	22	24	30	35	40	45	50
Contrainte de traction axiale : $f_{t,0,k}$ (MPa)	8	10	11	12	13	14	18	21	24	27	30
Contrainte de traction transversale : $f_{t,90,k}$ (MPa)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Contrainte de compression axiale : $f_{c,0,k}$ (MPa)	16	17	18	19	20	21	23	25	26	27	29
Contrainte de compression transversale : $f_{c,90,k}$ (MPa)	2.0	2.2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.7	2.8	2.9	3.1	3.2
Contrainte de cisaillement : $f_{v,k}$ (MPa)	3.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
Module d'élasticité axiale : $E_{0,mean}$ (GPa)	7	8	9	9.5	10	11	12	13	14	15	16
Module d'élasticité caractéristique : $E_{0,05}$ (GPa)	4.7	5.4	6.0	6.4	6.7	7.4	8.0	8.7	9.4	10.0	10.7
Module d'élasticité transversale : $E_{90,mean}$ (GPa)	0.23	0.27	0.30	0.32	0.33	0.37	0.40	0.43	0.47	0.50	0.53
Module moyen de cisaillement : $G_{mean}$ (GPa)	0.44	0.50	0.56	0.59	0.63	0.69	0.75	0.81	0.88	0.94	1.00
Masse volumique caractéristique : $\rho_k$ (kg/m <sup>3</sup> )	290	310	320	330	340	350	380	400	420	440	460
Masse volumique moyenne : $\rho_{mean}$ (kg/m <sup>3</sup> )	350	370	380	390	410	420	460	480	500	520	550

Désignation	D18	D24	D30	D35	D40	D50	D60	D70
Contrainte de flexion : $f_{m,k}$ (MPa)	18	24	30	35	40	50	60	70
Contrainte de traction axiale : $f_{t,0,k}$ (MPa)	11	14	18	21	24	30	36	42
Contrainte de traction transversale : $f_{t,90,k}$ (MPa)	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Contrainte de compression axiale : $f_{c,0,k}$ (MPa)	18	21	23	25	26	29	32	34
Contrainte de compression transversale : $f_{c,90,k}$ (MPa)	7.5	7.8	8.0	8.3	8.3	9.3	10.5	13.5
Contrainte de cisaillement : $f_{v,k}$ (MPa)	3.4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.5	5.0
Module d'élasticité axiale : $E_{0,mean}$ (GPa)	9.5	10	11	11	13	14	17	20
Module d'élasticité caractéristique : $E_{0,05}$ (GPa)	8	8.5	9.2	9.2	10.9	11.8	14.3	16.8
Module d'élasticité transversale : $E_{90,mean}$ (GPa)	0.63	0.67	0.73	0.73	0.86	0.93	1.13	1.33
Module moyen de cisaillement : $G_{mean}$ (GPa)	0.59	0.62	0.69	0.69	0.81	0.88	1.06	1.25
Masse volumique caractéristique : $\rho_k$ (kg/m <sup>3</sup> )	475	485	530	530	550	620	700	900
Masse volumique moyenne : $\rho_{mean}$ (kg/m <sup>3</sup> )	570	580	640	640	660	750	840	1080

Figure 3-9 Classe de résistance du bois massif résineux et feuillus

### 3.4 Choix de bornes pour le diamètre des troncs

Nous proposons de borner les diamètres entre 200mm et 600mm ce qui nous permet de continuer notre analyse en toute généralité car ce sont des diamètres que nous pouvons trouver en résineux ou en feuillus. Nous développons, ci-dessous, d'abord les raisons qui nous poussent à ne pas prendre un

diamètre excessif, puis à ne pas prendre un diamètre trop petit et finalement nous parlerons des raisons qui nous motiveraient à diminuer le diamètre à l'intérieur du domaine donné.

### 3.4.1 Problématiques liées à un diamètre excessif.

Difficulté liée au poids. Souhait d'éviter une colonne trop lourde (jusque deux tonnes) qui compliquerait le levage et apporterait beaucoup de poids propre sur la structure.

D'un point de vue de l'humidité, plus le tronc est gros, plus le retrait dû aux fluctuations d'humidité se fera sentir.

La taille d'une si grosse section surtout en bois dur est problématique. Ceci engendre une surchauffe des outils de coupe et perte de précision.

En terme architectural, sachant que la distance entre colonnes est limitée par la capacité des grumes en flexion (7m semble déjà beaucoup), il n'est sans doute pas souhaitable d'avoir des colonnes trop encombrantes.

Financièrement, plus le diamètre est petit, moins cela coûte. Les bois de très gros diamètre sont souvent des arbres de haute qualité.

Difficulté d'approvisionnement surtout pour les feuillus car ce sont des plantations moins densément peuplées avec des cycles sylvicoles plus longs.

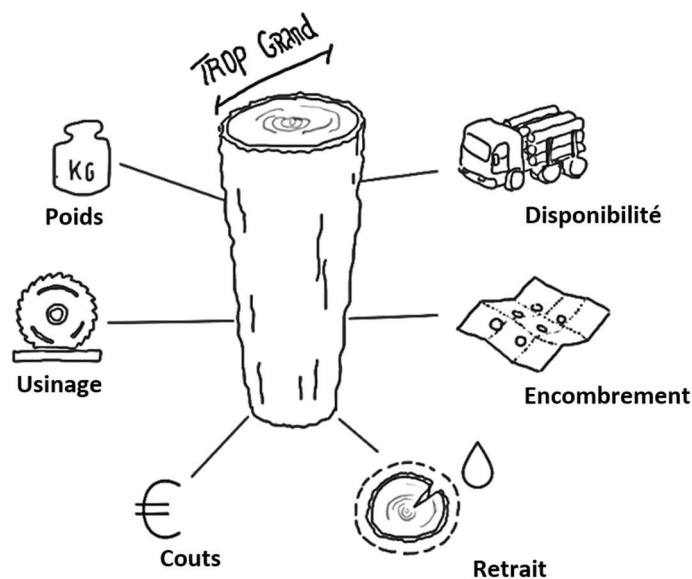


Figure 3-10 Problématique liées à un diamètre excessif

### 3.4.2 Problématique liée à un diamètre trop petit.

Il n'est pas insensé de borner la valeur inférieure du diamètre des troncs dans le cas où nous choisissons d'utiliser un grand nombre de colonnes de petits diamètres et de se rapprocher d'un système type ossature bois.

La validité des calculs de résistance au flambement, cessent d'être valide pour des colonnes trop élancées et de géométrie imparfaite.

Pour les bâtiments publics, une tenue au feu en situation accidentel doit pouvoir être garantie. Les conclusions de l'étude ici-bas, nous amènent à rejeter les troncs d'un diamètre inférieur à 180mm pour nos meilleurs cas d'études.

### 3.4.3 Volonté de diminuer le diamètre à l'intérieur de la plage de valeurs retenues.

Choisir un assemblage qui permet la réduction du diamètre des colonnes peut élargir la gamme des essences intéressantes ou permettre de s'adapter aux grumes disponibles d'une parcelle forestière à laquelle nous aurions accès.

Financière, si le choix d'un assemblage pertinent n'engage pas de surcoût, on peut bénéficier de l'économie faite en achetant des bois d'éclaircies vendus moins chers que les grumes provenant des arbres objectifs.

Réduire le diamètre des colonnes permet de repousser les limites du nombre d'étages réalisables en bois ronds.

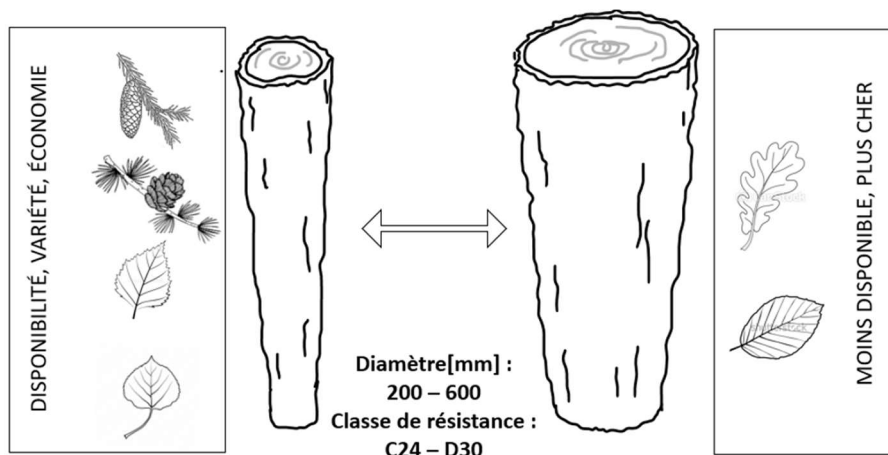


Figure 3-11 Incidence du choix de diamètre dans la plage de valeurs retenues

## 3.5 Conclusion de chapitre.

Nous retenons pour la suite de notre étude un diamètre de tronc allant de 200mm à 600mm avec une classe de qualité C18 pour les résineux et D30 pour les feuillus. Il est important de rappeler que les choix que nous avons fait tentent de représenter des situations qui pourront se généraliser massivement, mais ne font aucunement la règle. Tout écart à ces valeurs peut maintenant se faire en connaissance de cause.

# Hypothèses architecturales et cas de charges

## 4 Hypothèses architecturales et cas de charges

### 4.1 Hypothèses architecturales

La structure est de type poteaux-poutres et le contreventement est assuré par les planchers et le noyau central qui peut être en béton. La toiture reprend les mêmes charges qu'aux étages.

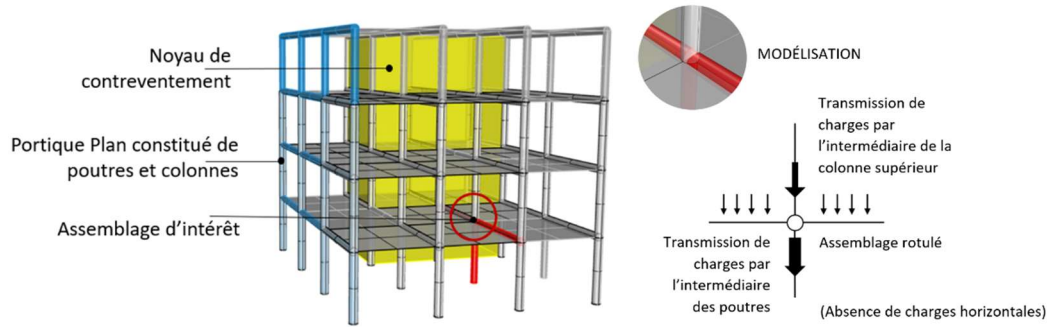


Figure 4-1 Hypothèse architecturales nœud colonnes-poutres-colonne

### 4.2 Descente de charges :

Nous considérons la transmission de charges par l'intermédiaire des poutres et de la colonne supérieure tel que sur le schéma suivant.

$N_b[-]$  : nombre d'étages

$S_{pl}$  [ $m^2$ ] : surface de chargement reprise par la colonne

$q$  [ $kN/m^2$ ] : cas de charges retenus ( $q_{ELU}$ ,  $q_{ELS}$  ou  $q_{ACC}$ )

$R_p$  [ $kN$ ] : réaction d'appuis d'une poutre

$N_{col,sup}$  [ $kN$ ] : Effort normal dans la colonne supérieure

$N_{col}$  [ $kN$ ] : Effort normal dans la colonne inférieure

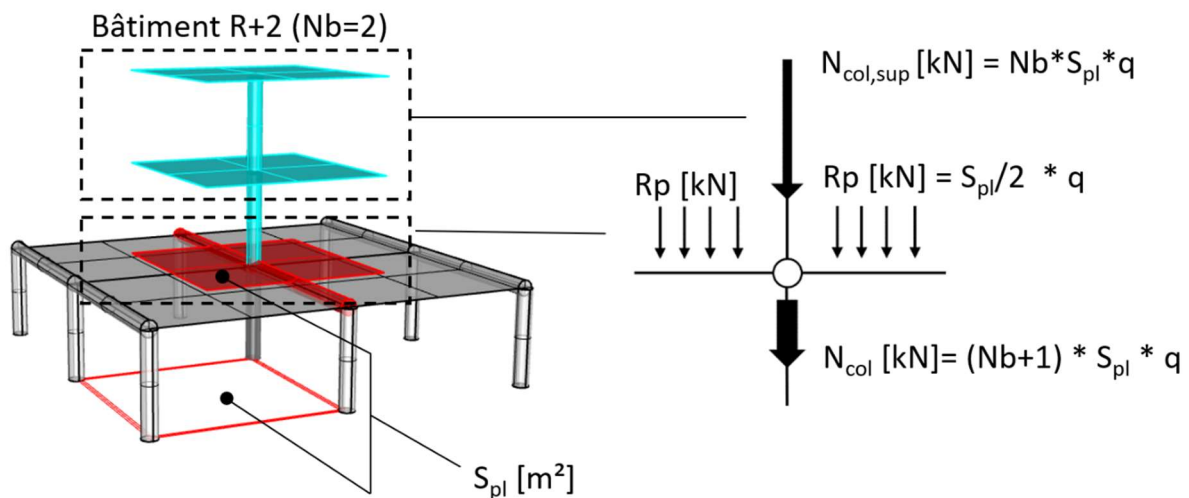


Figure 4-2 Descente de charges

### 4.3 Combinaisons de charges

Cas de charges pour vérifier la rupture (ELU)

$$q_{ELU} [kN/m^2] = 1.35G [kN/m^2] + 1.5q [kN/m^2]$$

### 4.4 Charges de poids propres

Les valeurs minimums et maximums pour G dépendant de la composition des planchers. Nous proposons de borner les valeurs sur base des exemples ci-contre.

$$G_{min} = 0.54 [kN/m^2]$$

$$G_{max} = 3 [kN/m^2]$$

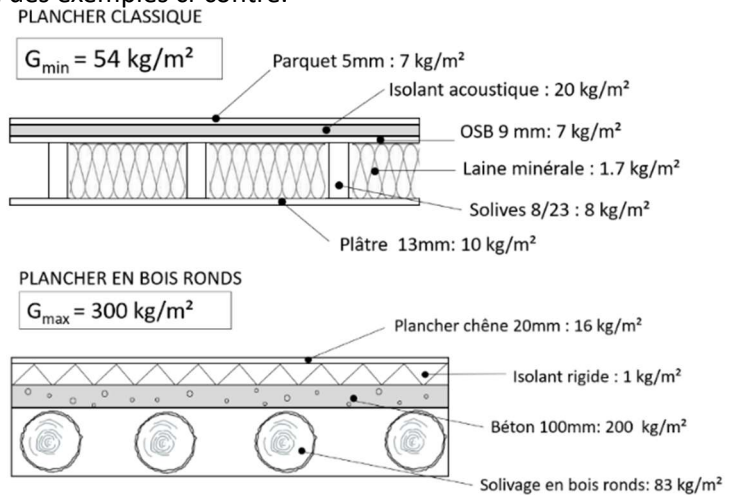


Figure 4-3 Poids propre des planchers

SOLUTION A EXPLORER...

Il existe d'autres solutions qui permettent de franchir de grandes portées telles que les planchers composite bois-béton en CLT ou encore des poutres en « I » en bois. Nous souhaitons relever l'existence de ce type de solution qui permettrait des espaces à vivre tout autres. Voici un exemple plausible qui considère un plancher capable de franchir 9,5m. La spatialité semble plus grande, les colonnes ne sont pas sollicitées d'avantage et le diamètre des poutre, dimensionné par la flèche, diminue fortement.

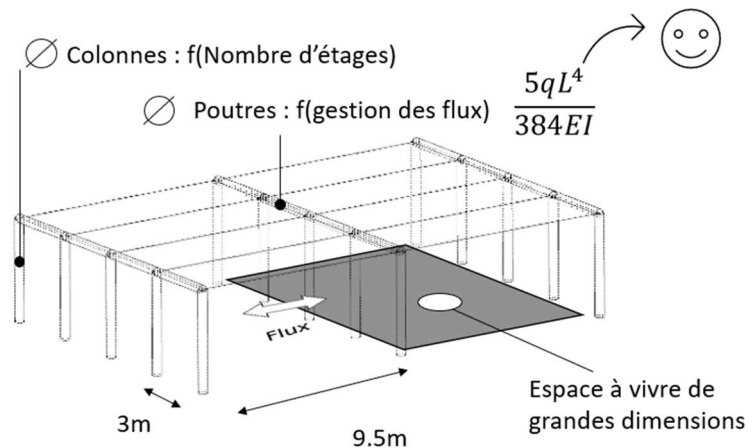


Figure 4-4 Exploration : planchers grandes portées

Peut-on encore dire que le système structural soit fait de grumes ?

Quel optimum visons-nous : écologie, économie, architecture, prouesse technique... ?

#### 4.5 Charges d'exploitations

Parmi la liste des charges d'exploitations qui peuvent être considérées, nous retenons une valeur minimum et maximum.

A : Logement	2 [kN/m <sup>2</sup> ]	}
B : Bureaux	3 [kN/m <sup>2</sup> ]	
C1 : Ecoles, café...	3 [kN/m <sup>2</sup> ]	
C2 : Salles de réunion	4 [kN/m <sup>2</sup> ]	}
C3 : Salles de concert	5 [kN/m <sup>2</sup> ]	
D : Commerces	5 [kN/m <sup>2</sup> ]	}


**q<sub>min</sub> (Logement) = 2[kN/m<sup>2</sup>]**

**q<sub>max</sub> (Bureaux) = 3[kN/m<sup>2</sup>]**

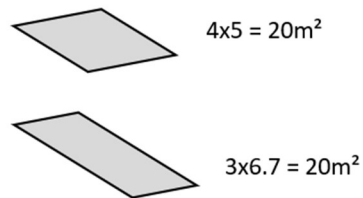
Nous supposons que la demande pour des bâtiments multi-étages accueillant ce type de fonctions reste marginale. Ces cas de charges ne retiendront donc pas notre attention pour cette étude.

#### 4.6 Surface de plancher


La valeur inférieure repose sur des considérations architecturales. Il nous semble que 20m<sup>2</sup> soit un minimum pour produire des espaces à vivre qualitatif.

**S<sub>pl,min</sub> = 20 [m<sup>2</sup>]**  
  
 Raisons architecturales

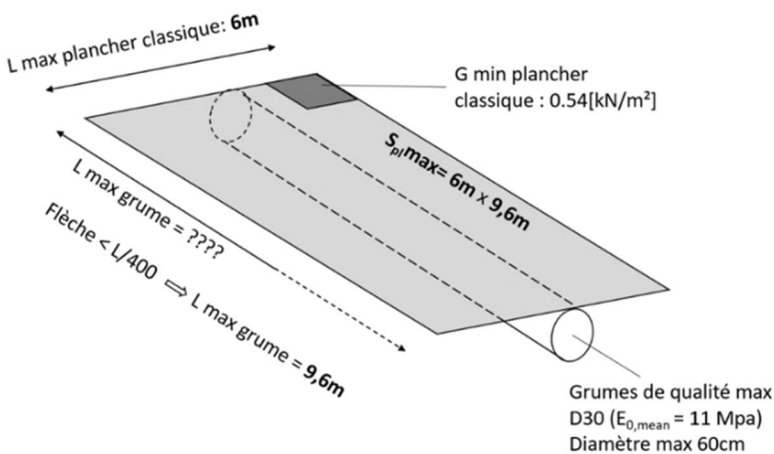
POUR LES ASSEMBLAGES ET LES COLONNES, LA FORME DU PLANCHER N'A PAS D'IMPORTANCE :



La surface maximum quant à elle, est contrainte par des questions structurelles. Nous bornons la surface de plancher maximum par un calcul de flèche aux ELS.

**S<sub>pl,max</sub> = 57 [m<sup>2</sup>]**  Raisons structurelles

LA SURFACE MAXIMUM DE PLANCHER QUI PEUT ÊTRE PRODUITE EST :



$$\frac{5qL^4}{384EI} = \frac{L}{400}$$



$$L = \left( \frac{384 EI}{400 \cdot 5 \cdot q} \right)^{1/3}$$

$$L = 9,6m$$

$$E = 11000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$D = 650 \text{ [mm]}$$

$$I = \pi D^4 / 64 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$q = 6[m] \cdot q_{ELS} \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$q_{ELS} = G_{min} + q_{min} = (0.54 + 2) \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Figure 4-5 Surface de plancher min-max

## 4.7 Hauteur d'étages

La hauteur d'étage est importante pour calculer le mode de rupture par flambement et flexion composée des colonnes. Nous proposons 3 ou 4 mètres. Nous précisons les raisons plus tard, mais ceci nous amène à retenir deux valeurs pour le coefficient  $k_c$  qui tient compte de l'élanement.

$$H = [3-4] \text{ m} \quad k_c = [1 - 0.84] [-]$$

## 4.8 Coefficients sur les matériaux

Pour le calcul du bois, l'Eurocode prévoit l'application de deux coefficients sur le matériau,  $K_{mod}$  et  $\gamma_M$ . Nous retiendrons  $K_{mod}=0.8$  qui est relatif aux charges d'exploitation des planchers en classe 1 (local chauffé) ou 2 (sous abris). et  $\gamma_M=1,3$  car il s'agit de bois massif.

$$\text{La résistance définie du bois vaut } f_d = f_k * (K_{mod} / \gamma_M)$$

Avec  $f_k$  les valeurs de résistance caractéristique retenue (soit celle d'un C24 soit celle d'un D30).

## 4.9 Synthèse des valeurs retenues

Propriété des grumes :

Diamètre mm [200 – 650]

Classe de qualité C24 ou D30

$$K_{mod} / \gamma_M = 0.8/1.3$$

Cas de charges retenus pour les assemblages et la colonne :

$$q_{ELU} = ( 1.35G + 1.5q ) \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$G [ 0.54 - 3 ] \quad [\text{kN/m}^2]$$

$$Q [ 2 - 3 ] \quad [\text{kN/m}^2]$$

Dimension du bâtiment

$N_b=0$  la colonne ne reçoit que deux poutres

$N_b= i$  le bâtiment est dit R+i, la colonne reçoit deux poutres plus la charge de « i » planchers de surface  $S_{pl}$ .

$$S_{pl} [ 20 - 57 ] \quad [\text{m}^2]$$

Maintenant que nous disposons de toutes nos variables pour l'étude de nos assemblages, nous proposons de les distinguer en deux comme indiqué sur le schéma. Ceci nous permettra de tracer des graphiques représentatifs du domaine architectural, représenté par  $N_b$  et  $S_{pl}$ , que le système constructif peut couvrir. Pour un type d'assemblage au choix et un cas d'étude au choix, nous pourrons voir en graphique quel est le domaine architectural accessible.

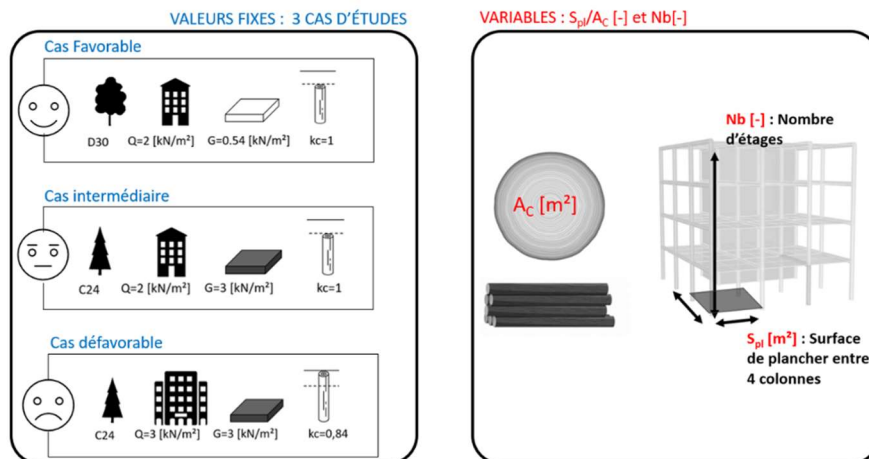


Figure 4-6 Tri des variables pour graphiques adimensionnels

#### 4.10 Conclusion de chapitre.

Bien qu'il n'aurait pas été difficile de fournir des valeurs proches de celles-ci de manière intuitive, le soin amené pour définir les bornes de l'étude nous garantit que chaque point des graphiques que nous produirons reflètera une situation qui soit architecturalement et structurellement plausible, mais aussi qui soit soutenable pour la forêt. Nous sommes certains de ne jamais faire allusion à une situation hautement improbable qui ne pourra jamais voir le jour où les colonnes seraient par exemple de diamètre 80 cm d'une classe de résistance C14 et disposées sur une trame 3x3m. Aussi, cette précision est appelée par la sensibilité des équations à certaines variables qui pourraient nous conduire sur des résultats trompeurs si nous nous écartons un tant soit peu des valeurs que nous estimons acceptable pour celles-ci.

Finalement, les détails apportés nous informent sur la réalité et les implications des valeurs que nous retenons pour nos équations. Les graphiques à venir montreront ce qui est possible dans les limites que nous nous sommes fixées, mais c'est à travers une lecture implicite que nous saurons quelles situations sont souhaitables pour le projet d'architecture et le contexte dans lequel il s'inscrit. Nous savons maintenant de quoi nous parlons lorsque nous invoquons les plages de valeurs que nous associons au diamètre des grumes, à la spatialité, à l'affectation ou à la nature des planchers.

# Typologies d'assemblages et analyses

## 5 Typologies d'assemblages et analyses

Nous considérons trois typologies d'assemblages qui représentent 3 modes de ruptures différents. Un assemblage peut être placé dans telle ou telle famille si nous pouvons garantir que la rupture se passera de telle ou telle manière. Nous avons les assemblages type « Bois-bois » les assemblages type « Console » et les assemblages type « Composite ». Dans le tableau suivant, nous montrons qu'il y a plusieurs types de rupture possible pour chaque assemblage, mais que, selon la conception, nous pouvons savoir quel est le mode de rupture le plus contraignant et qui aura pour effet de dimensionner la colonne.

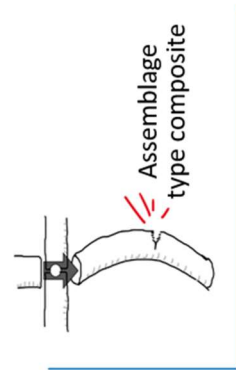
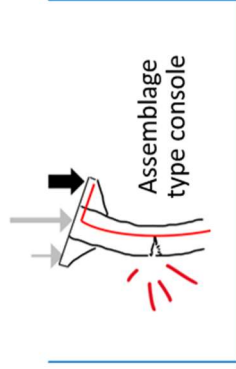
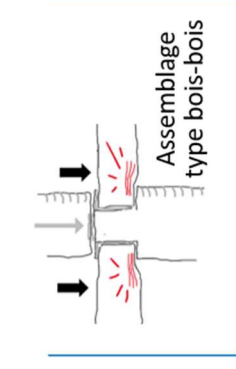
 <p>Assemblage type composite</p>	<p><b>NON</b></p> <p>Acier, boulons, béton.. dimensionnées pour éviter la rupture locale</p>	<p><b>NON</b></p> <p>Conception pour une transmission des charges centrées</p>	<p><b>OUI</b></p> $\frac{\sigma_c}{k_C * f_{c0d}} = 1$
 <p>Assemblage type console</p>	<p><b>NON</b></p> <p>Consoles dimensionnées pour éviter la rupture locale</p>	<p><b>OUI</b></p> $\frac{\sigma_m}{f_{md}} + \frac{\sigma_c}{k_C * f_{c0d}} = 1$	<p><b>—</b></p> <p>La flexion composée tient compte du flambement</p>
 <p>Assemblage type bois-bois</p>	<p><b>OUI</b></p> $\frac{R_p}{A_{repos} * f_{c90d}} = 1$ $\frac{N_{Col, sup}}{A_{col - cd} * f_{c0d}} = 1$	<p><b>NON</b></p> <p>Excentricité trop petite</p>	<p><b>NON</b></p> <p>La poutre s'écrase sur son appui avant que la colonne ne flambe</p>
<p>MODE DE RUPTURE LOCAL (dépassement des contraintes)</p>		<p>MODE DE RUPTURE GLOBAL (Flexion composée)</p>	<p>MODE DE RUPTURE GLOBAL (Flambement)</p>

Figure 5-1 Tableau qui associe une typologie d'assemblage à un mode de rupture

## 5.1 Assemblage type bois-bois

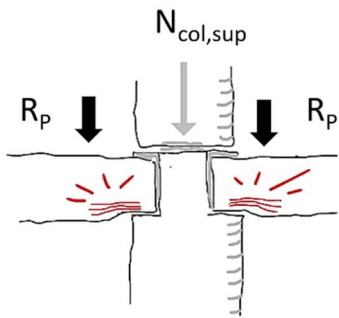


Figure 5-2 Pictogramme assemblage type bois-bois



Cette typologie concerne tous les assemblages à contact bois-bois sans pièces supplémentaires. C'est notamment le cas des assemblages traditionnels comme le tenon-mortaise ou la queue d'aronde. Le critère dimensionnant pour cette famille est la rupture par compression perpendiculaire aux fibres de la poutre. Indépendamment de la résistance de la colonne, il faudra que la section de la colonne offre une surface d'appuis suffisante pour que les fibres de la poutre ne s'écrasent ni ne se rompent sur son appui.

## 5.2 Assemblage type console

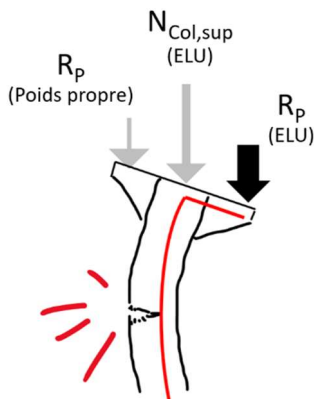
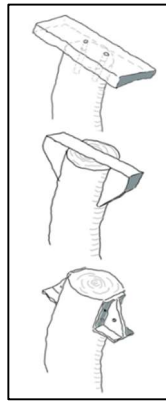


Figure 5-3 Pictogramme assemblage type console



Cette typologie concerne tous les assemblages qui utilisent une pièce supplémentaire (console) pour s'affranchir de l'encombrement de la poutre reposant sur la colonne. Nous considérons ici que la descente de charges des étages est centrée et que l'asymétrie des réactions d'appuis des poutres provoquent un moment fléchissant dans la colonne.

## 5.3 Assemblage type composite

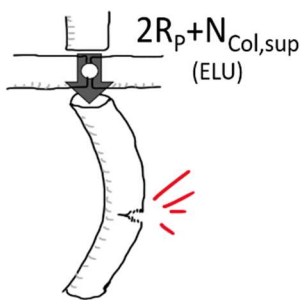
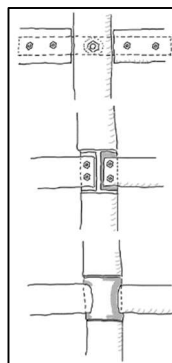


Figure 5-4 Pictogramme assemblage type composite



Cette typologie concerne tous les assemblages qui auront une capacité de reprise de charge locale beaucoup plus importante que celle de la colonne qui, elle, finira par se rompre par flambement. Cette famille d'assemblage considère qu'il n'y a pas d'excentricité dans la descente de charges des étages et du plancher. Nous pouvons nous approcher de ce cas avec l'usage de connecteur métallique ou béton. Ce mode de rupture nous indique aussi quelle est la performance maximum que nous pouvons atteindre, car même le plus solide des assemblages ne pourras pas éviter ce mode de rupture et la colonne devra être dimensionnée en conséquence.

## 5.4 Description graphique et légende

Pour chaque typologie d'assemblage étudié il est possible de présenter les équations sous forme adimensionnelle. Ceci permet d'apporter des informations en toute généralité. Toutes les courbes à venir auront le format suivant.

Exemple : Nous pouvons lire, ci-contre, que, si nous trouvons un assemblage d'une résistance suffisante pour amener la colonne à se rompre par flambement, dans un cas défavorable, il serait possible de construire 5 étages. Cela étant dit pour un rapport  $S_{pl}/A^c=200$  [-] dont un exemple parmi d'autre serait  $S_{pl}=25\text{m}^2$  avec une colonne de diamètre 400mm.

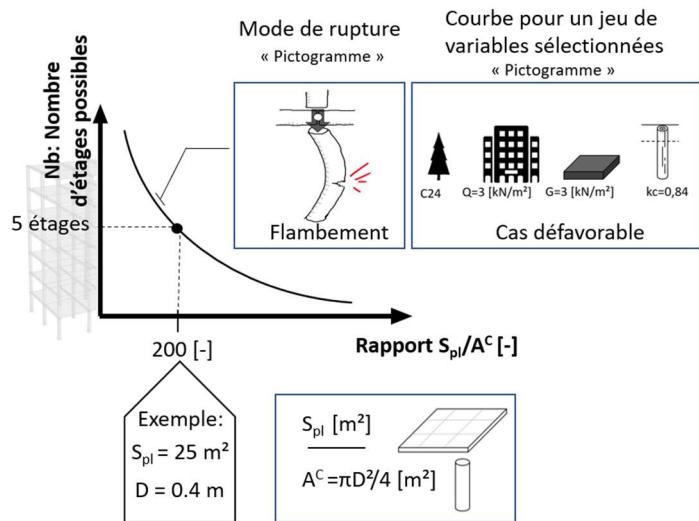


Figure 5-5 Description et utilisation des graphiques

## 5.5 Code couleurs et type de lignes

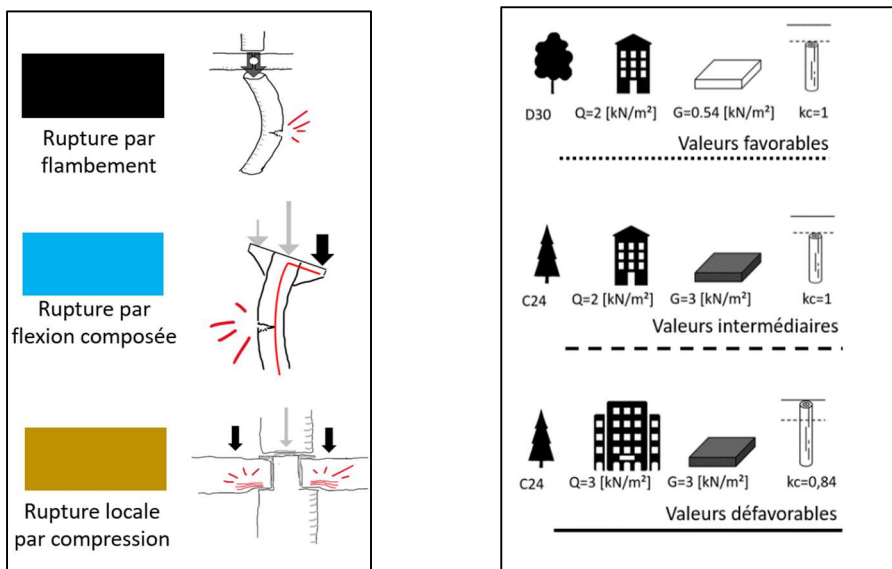
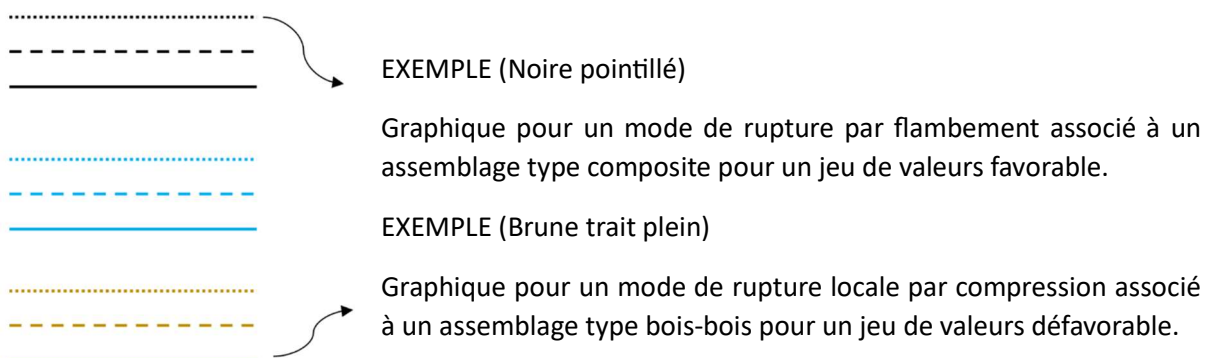


Figure 5-6 code couleurs et type de lignes



## 5.6 Tableau de valeurs pour accompagner la lecture des graphiques

Combinaisons de charges aux ELU

$$q_{ELU} \text{ (défavorable)} = 1.35 \cdot 3 + 1.5 \cdot 3 = 8.55 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$q_{ELU} \text{ (intermédiaire)} = 1.35 \cdot 3 + 1.5 \cdot 2 = 7.05 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

$$q_{ELU} \text{ (favorable)} = 1.35 \cdot 0.54 + 1.5 \cdot 2 = 3.7 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Exemple de de rapport adimensionnel  $Spl/A$  [-] soit  $Spl/(\pi D^2/4)$ .

S/A [-]	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
Spl [m <sup>2</sup> ]	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
D [cm]	71	58	50	45	41	38	36	34	32	30	29	28	27

S/A [-]	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
Spl [m <sup>2</sup> ]	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
D [cm]	96	78	68	60	55	51	48	45	43	41	39	37	36

S/A [-]	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
Spl [m <sup>2</sup> ]	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49	49
D [cm]	112	91	79	71	64	60	56	53	50	48	46	44	42

S/A [-]	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350
Spl [m <sup>2</sup> ]	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60	60
D [cm]	124	100	87	78	71	66	62	58	55	53	50	48	47

Figure 5-7 Tableau de valeurs pour quelques rapports  $Spl/AC$

Diamètre de troncs en dehors du « domaine sylvicole » retenu.

Pour rappel, la forme des planchers n'a pas d'importance.

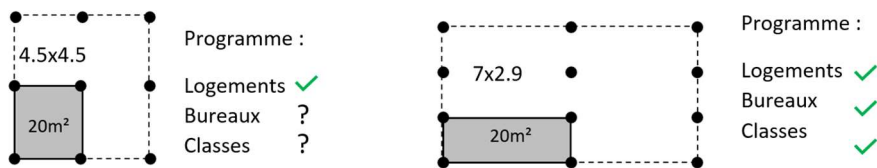
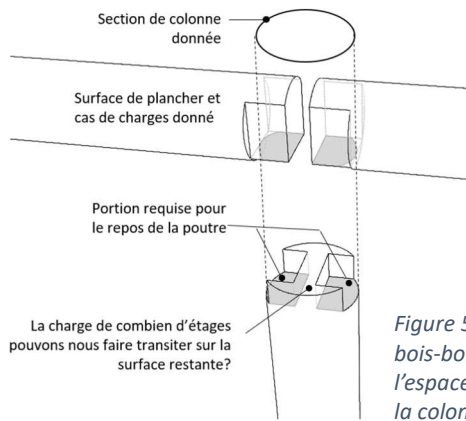


Figure 5-8 Forme des planchers : incidence sur l'architecture mais pas sur les colonnes

## 5.7 Assemblages type bois-bois : rupture par compression



A travers ce graphique et compte tenu de la faible résistance du bois dans son sens perpendiculaire aux fibres ( $f_{c90k} \ll f_{c0k}$ ), la question qui est posée est : Pour une surface de plancher donnée, une section de colonne définie et, après avoir posé les poutres sur la colonne, quelle est la charge (nombre d'étages) que l'on peut faire transiter sur la portion de colonne restante.

Figure 5-9 Assemblage bois-bois : partage de l'espace disponible sur la colonne

$$Nb[-] = \frac{1}{(Spl/A)} * \frac{fc0d}{qELU} - \frac{fc0d}{fc90d}$$

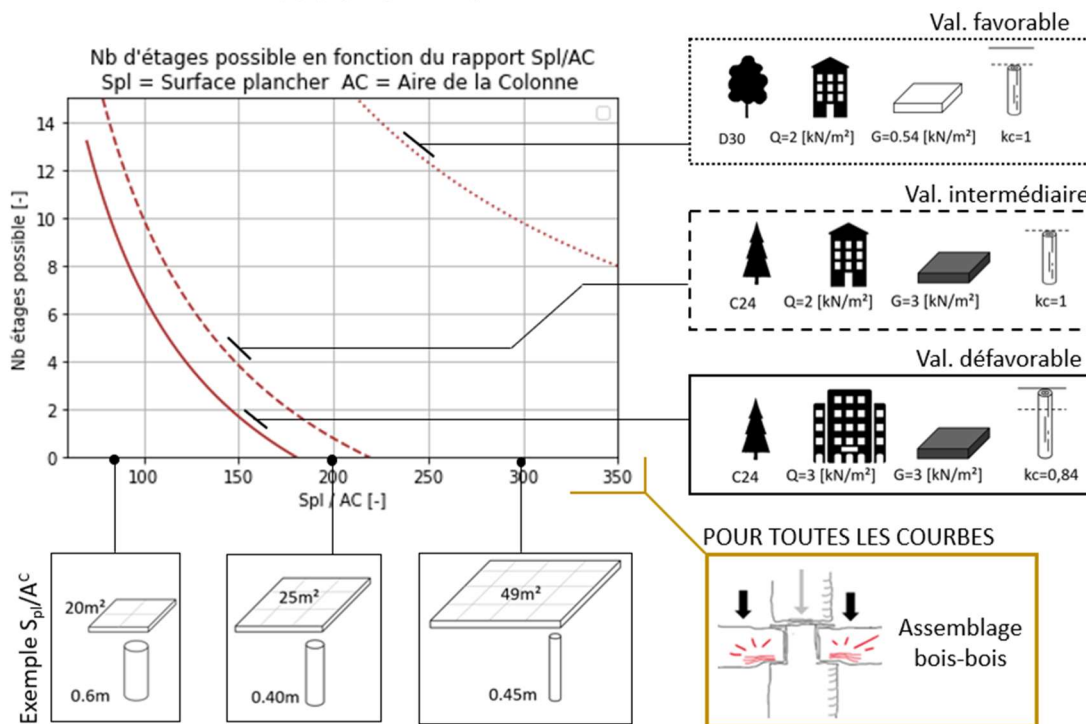
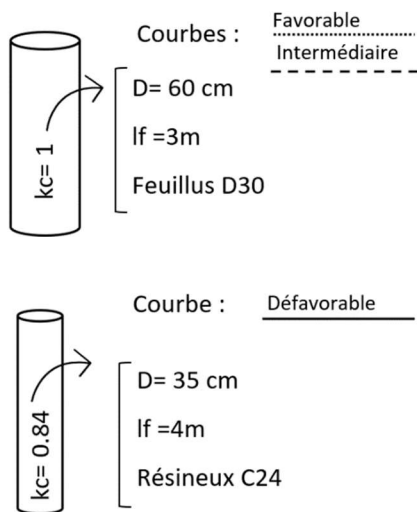


Figure 5-10 Graphique : assemblage type bois-bois  $Nb=f(Spl/AC)$

### OBSERVATIONS :

Le choix du matériau et du cas de charge à une influence notable sur les capacités de ces assemblages. Pour le jeu de variables favorables, ce type d'assemblage est en mesure de répondre à des besoins architecturaux sans difficulté (Ex : Spl 49m², D 45cm Nb 10 étages). Le jeu de variable défavorable demande au projet d'architecture une plus forte capacité d'adaptation. Le point critique pour cette courbe est  $Spl/A= 175$ . Si nous choisissons  $Spl=49m^2$  et  $D=60cm$ , l'entièreté de la colonne est requise pour le repos des poutres sans possibilité de construire d'étage.

## 5.8 Assemblages type consoles : rupture par flambement



Pour garder une analyse adimensionnelle et pouvoir comparer tous les types d'assemblages sur les mêmes graphiques, nous avons choisi de fixer la valeur du coefficient  $k_c$  qui intègre l'effet du flambement dans le calcul. En effet, nous ne pouvons pas faire varier  $k_c$  avec un rapport adimensionnel  $S_{pl}/AC$ , car il ne donne aucune indication sur l'élanement de la colonne. Pour borner le cas défavorable et choisir le diamètre minimal  $D=35\text{cm}$  pour le calcul de  $k_c$ , nous faisons références a un chapitre ultérieur qui traite du feu et qui fixe des diamètres minimum pour une tenue R60. Bien que ce choix soit critiquable et amène une imprécision pouvant aller jusque 16 %, ce choix nous a semblé cohérent compte tenu de nos objectifs d'études.

Figure 5-11 Choix de valeurs fix pour le coefficient  $k_c$

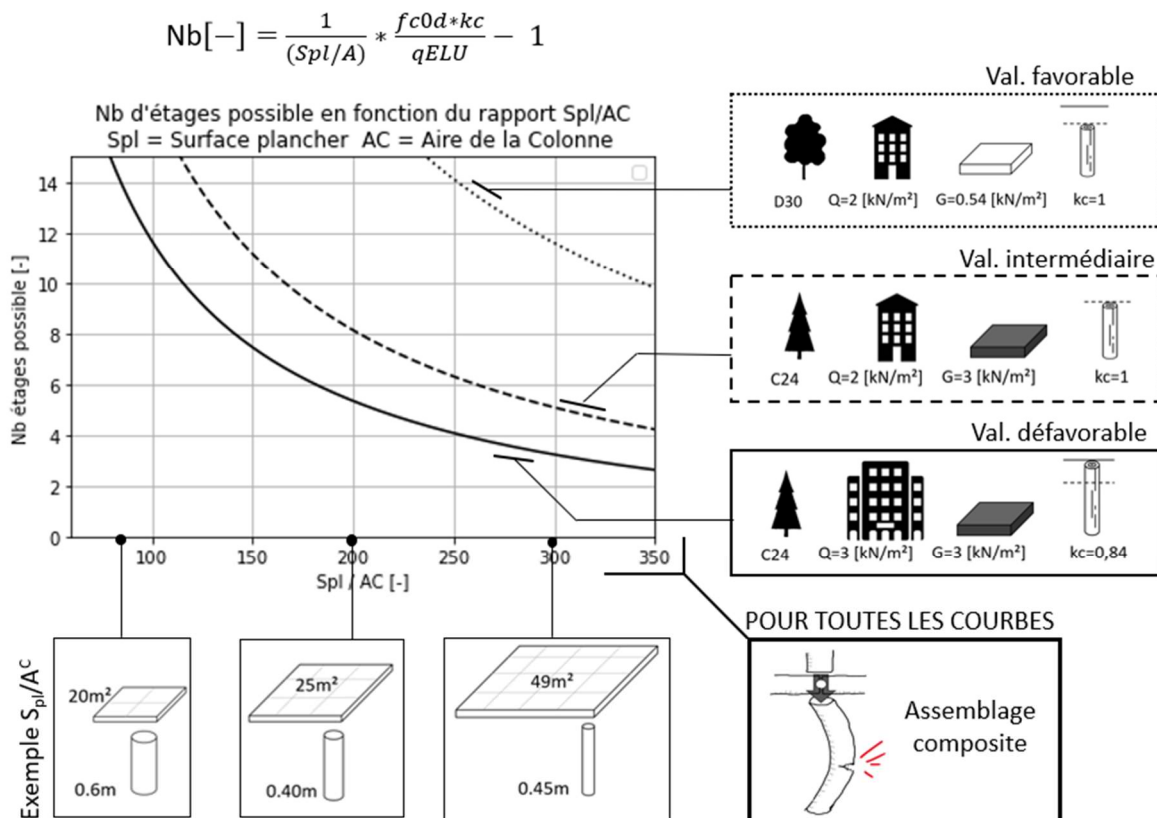
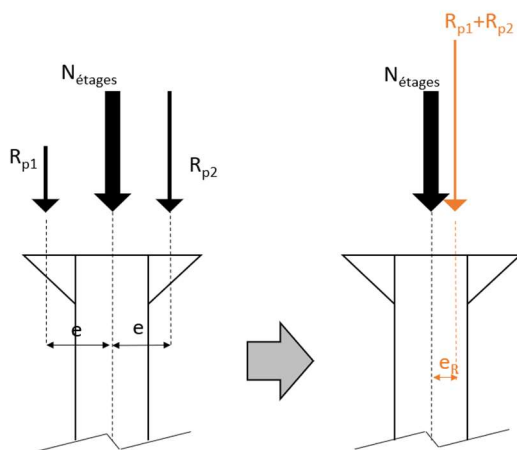


Figure 5-12 Graphique : assemblage type composite  $Nb=f(S_{pl}/AC)$

### OBSERVATIONS :

Par rapport à l'analyse précédente on constate que l'on peut travailler aisément ici avec tous les diamètres de colonnes. Avec une colonne de diamètre 29cm en résineux et une surface de plancher de 20m<sup>2</sup> ( $S_{pl}/A=300$ ), nous pouvons déjà faire un bâtiment R+3. Ce constat agrandit le potentiel d'exploitation de produits forestiers très variés. Dans le cas favorable, le projet d'architecture ne se voit soumis à presque aucune contrainte (cela étant dit pour les bâtiments bas de moins de -25m de hauteur).

## 5.9 Assemblages type composites : rupture par flexion composée



Nous considérons que la descente de charges des étages supérieurs se fait sans excentricité. Soit un chargement gravitaire « G » à gauche et un chargement aux états limites ultimes «  $q_{ELU}$  » à droite. Chaque poutre transmet sa réaction d'appuis  $R_{p1}$  ou  $R_{p2}$  avec une excentricité « e ». Par équilibre des moments on peut exprimer l'excentricité de la résultante des réactions d'appuis comme une fonction de « e ». Ensuite, on peut choisir d'exprimer cette excentricité initiale « e » en fonction de  $A^C$  (l'aire de la colonne) ce qui nous permet de tracer le graphique avec la même variable adimensionnel  $[S_{pl}/A^C]$ . Les graphiques sont tracés pour  $e=D$ .

Figure 5-13 Définition de l'excentricité des réactions d'appuis des poutres

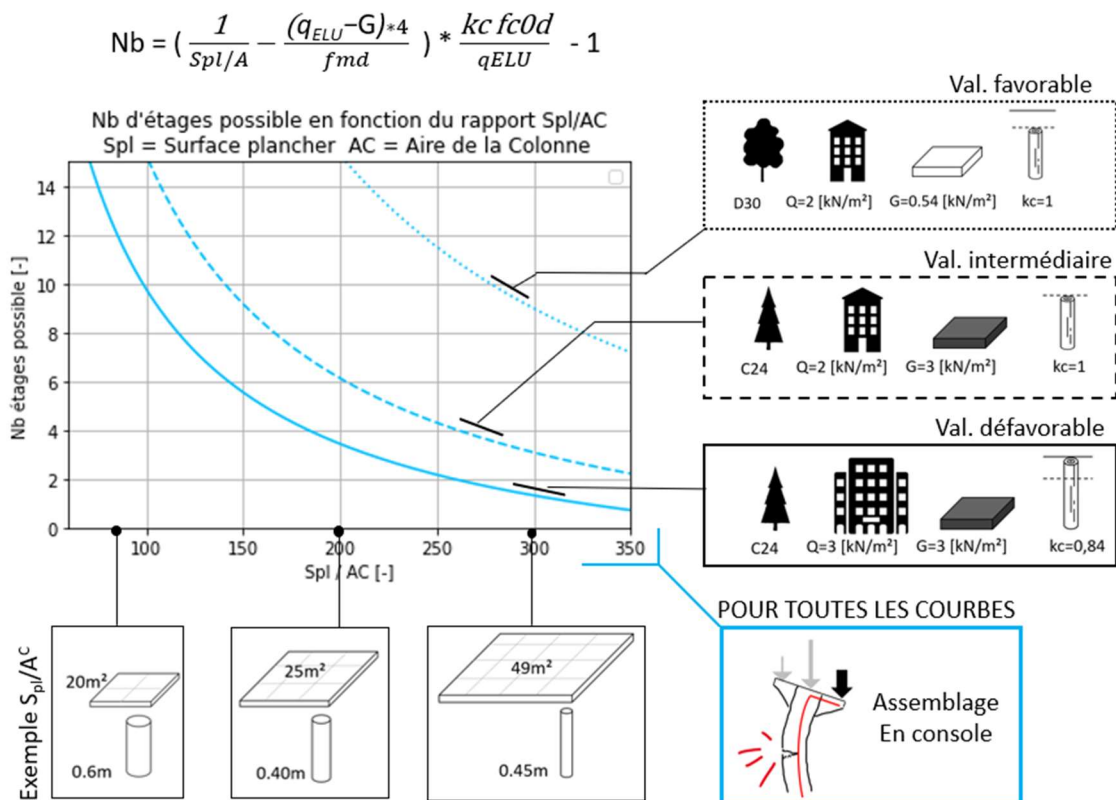


Figure 5-14 Graphique : assemblage type console  $Nb=f(S_{pl}/AC)$

### OBSERVATIONS :

Sans surprise, on constate également un étalement important des courbes. La situation la plus défavorable ne permet pas de travailler avec tous les diamètres de colonnes alors que la situation la plus favorable offre de belles possibilités.

## 5.10 Comparaison des assemblages pour une situation défavorable

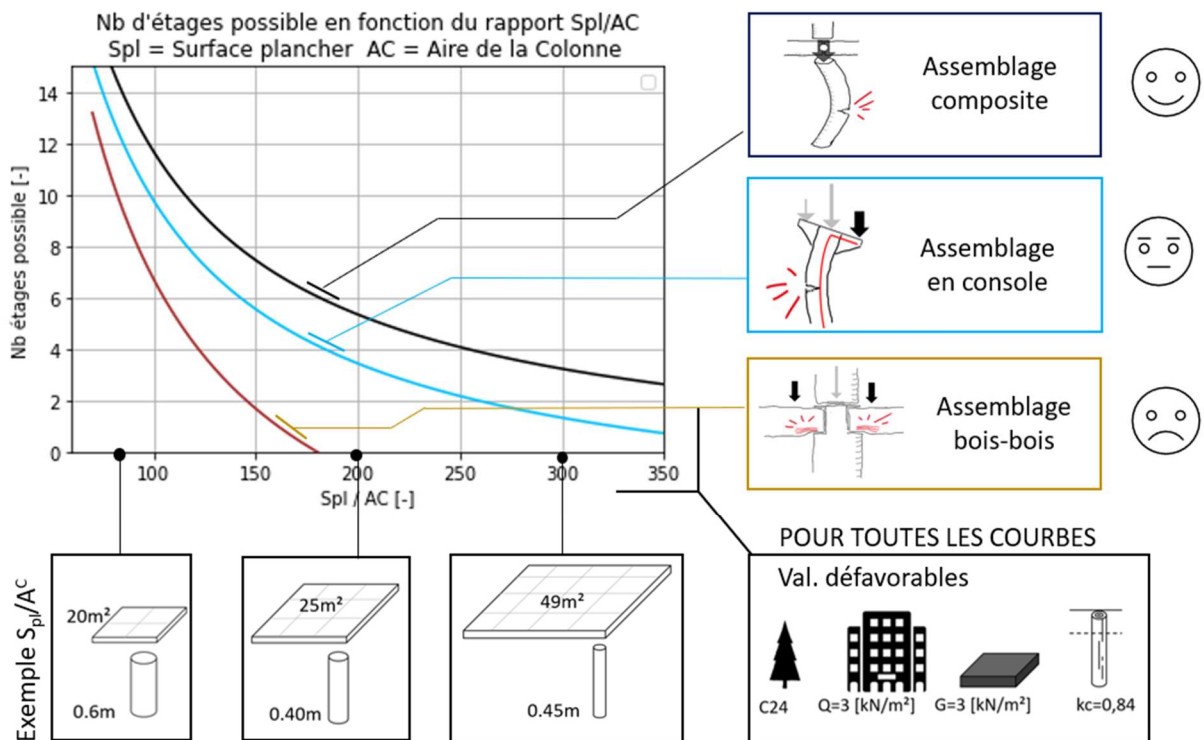


Figure 5-15 Graphique : comparaison des assemblages pour un cas défavorable

### OBSERVATIONS :

Cette situation est la plus défavorable en termes de matériau et de chargement. Il s'agit de bureaux construits en résineux avec un complexe de plancher lourd et un coefficient de flambement  $k_c=0.84$ .

Notons d'abord l'ordre (décroissant) de capacité de reprise de charges : flambement, flexion-composée puis compression. Grossièrement, passer d'un assemblage type bois-bois vers un assemblage type console offre 3 étages et il est possible d'en gagner encore 2 si nous passons à un assemblage composite qui amène la rupture par flambement. Il y a donc en moyenne 5 étages à gagner entre un assemblage type bois-bois et un type composite. Ensuite, nous rappelons qu'il n'est pas possible d'employer d'assemblage type tenon mortaise pour tous les rapports S/A. Pour certaines situations il est donc indispensable de changer de stratégie d'assemblage.

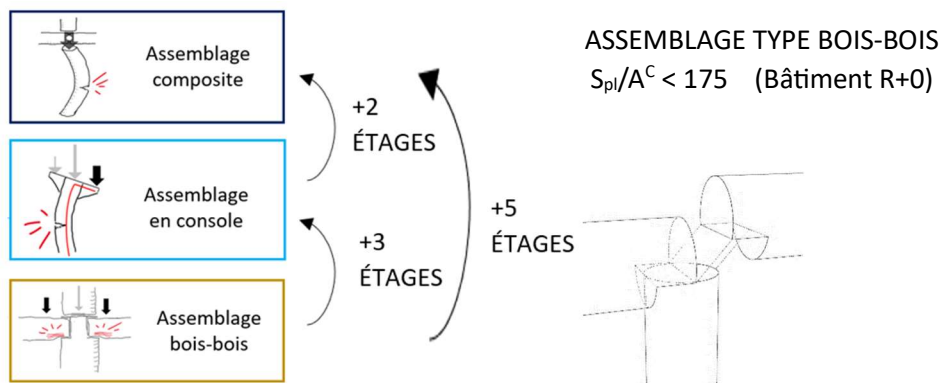


Figure 5-16 Observation issue de la comparaison des assemblages pour un cas défavorable

## 5.11 Comparaison des assemblages pour une situation intermédiaire.

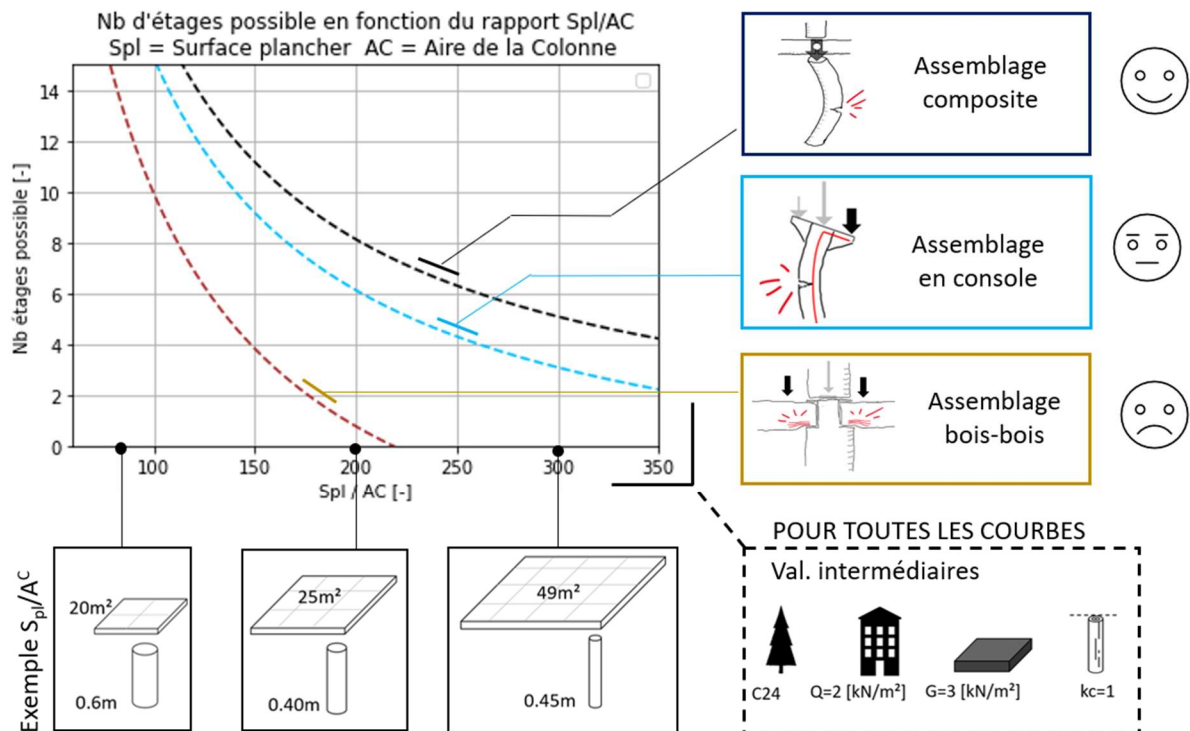


Figure 5-17 Graphique : comparaison des assemblages pour un cas intermédiaire

### OBSERVATIONS :

Il s'agit d'une situation intermédiaire par rapport aux extrêmes que nous avons choisis. La différence avec la précédente est que nous changeons la charge d'exploitation et nous considérons un coefficient  $kc=1$  mais nous gardons un complexe de plancher lourd.

Au-delà d'une amélioration sensible de tous les assemblages par rapport au cas précédent, nous remarquons que l'assemblage en console se distingue maintenant de celui type bois-bois avec une moyenne de 5 étages au lieu de 3 comme dans le cas précédent. Ceci s'explique car, pour un plancher lourd et une charge d'exploitation faible, le déséquilibre des charges sur les deux consoles d'une colonne est moins prononcé.

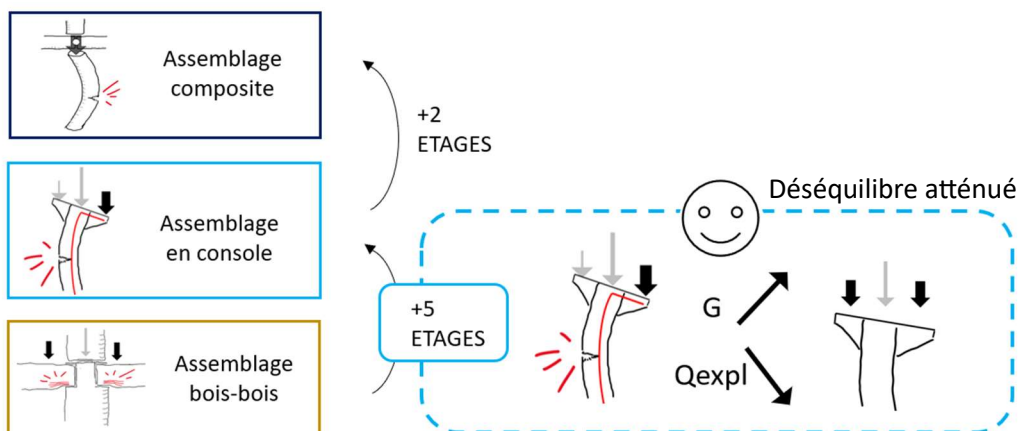


Figure 5-18 Observations issue de la comparaison des assemblages pour un cas intermédiaire

## 5.12 Comparaison des assemblages pour une situation favorable

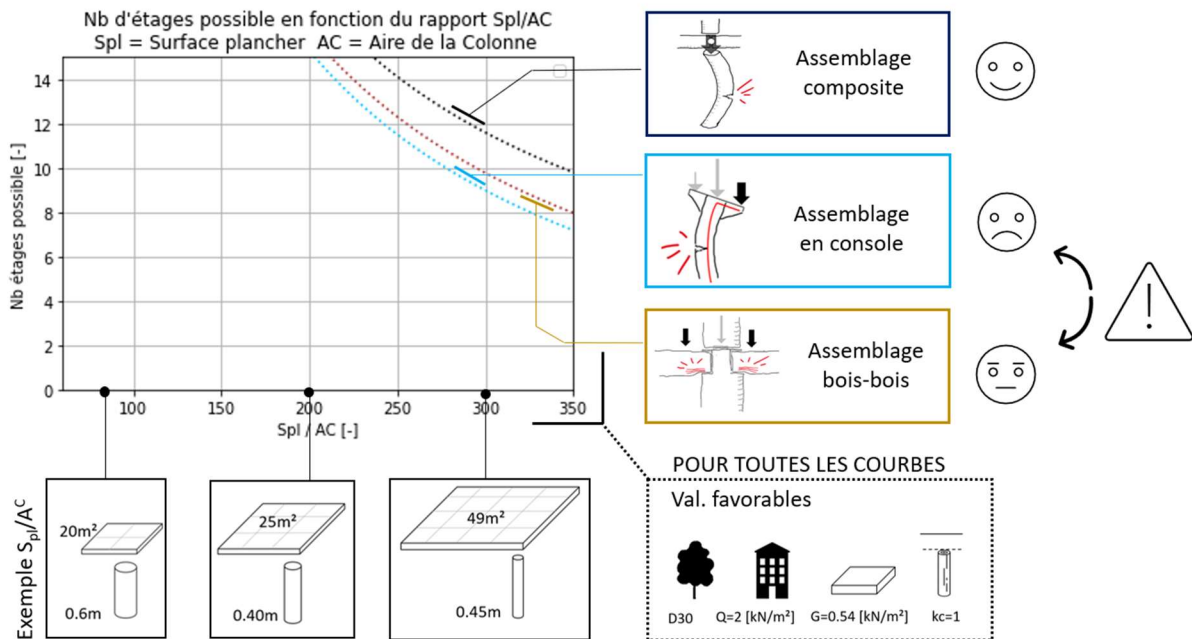


Figure 5-19 Graphique : comparaison des assemblages pour un cas favorable

### OBSERVATIONS

Dans ces conditions, les colonnes ne semblent plus du tout un frein pour le système constructif !!! Le frein devient le prix et la disponibilité des grumes.

### EXPLICATION

Les assemblages type console souffrent de l'excentricité des charges, qui se voit accrue par l'allègement du poids propre des dalles ( $G=0.54$ ) ce qui tend à baisser leur performance.

Le changement de qualité de bois, outre sa capacité à faire remonter toutes les courbes affecte particulièrement le mode de rupture par compression. En effet, les feuillus par leur constitution (plus de rayon de parenchyme) ont une résistance en compression perpendiculaire aux fibres  $f_{c90k}$  qui est accrue et cela diminue le rapport  $f_{c0k}/f_{c90k}$  que nous retrouvons dans l'équation. Ces deux effets combinés ont inversé l'ordre de performance des types d'assemblages.

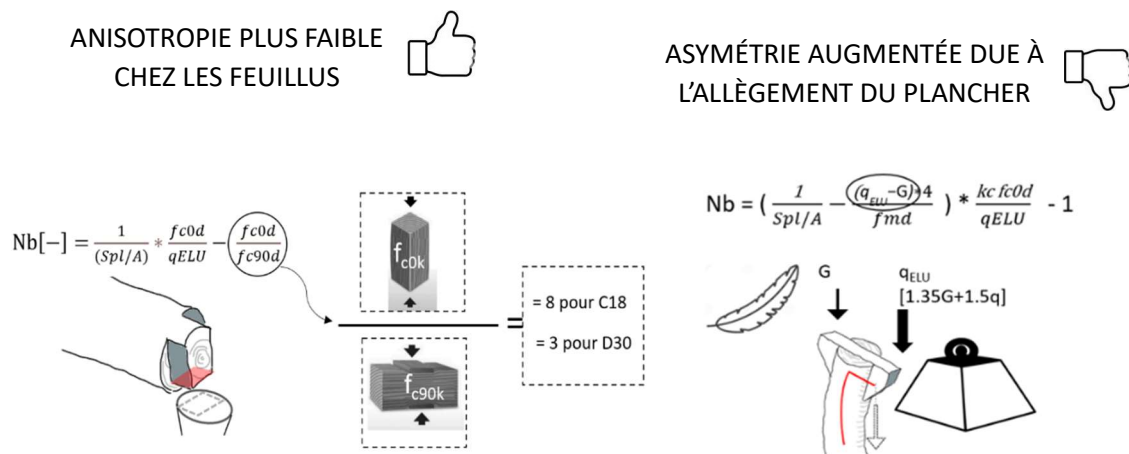


Figure 5-20 Observations issues de la comparaison des assemblages pour un cas favorable

### 5.13 Conclusion de chapitre

L'analyse produite jusqu'ici donne une bonne idée des gains de spatialités possibles si nous changeons de typologie d'assemblage. Dans les cas extrêmes, le choix d'assemblages pertinents peut offrir jusqu'à sept niveaux supplémentaires au bâtiment.

Nous avons vu que les assemblages type bois-bois se révèlent très contraignant pour des conceptions utilisant du résineux et des planchers lourds. Pour ces assemblages, le gain d'étage se fait au détriment d'une spatialité très étriquée qui appelle une certaine créativité de l'architecture. En revanche, l'emploi de feuillus ou d'un complexe de plancher léger rend les assemblages type bois-bois très pertinent et permettrait d'éviter des conceptions d'assemblage complexe et coûteuse.

Nous pouvons dire que la recherche de solutions se fait en vue d'un impact notable pour rendre certaines spatialités architecturales possible et pour la valorisation d'une plus large gamme de produits forestiers.

# Effets du feu

## 6 Effets du feu

Pour cette étude, nous considérons le cas des bâtiments bas (-25m) qui exigent une tenue au feu R60 et le cas des bâtiments élevés (+25m) qui exigent une tenue au feu R120.

Nous commencerons par regarder l'effet du feu sur un mode de rupture par flambement puis nous étendrons le raisonnement pour étudier son effet sur les assemblages type bois-bois. Les assemblages en consoles ne seront pas développés analytiquement. Nous noterons juste la possibilité relativement aisée de vérifier des cas isolés par l'usage de programme de dessin paramétrique.

### 6.1 Effet du feu sur un mode de rupture par flambement

Il est demandé pour chaque bâtiment de faire un calcul aux états limite ultime (ELU) et un calcul en situation accidentel d'incendie (ACC). Pour éviter de recommencer tout le travail effectué jusqu'ici, nous proposons d'identifier les dimensions de tronc nécessaire afin de vérifier que le taux de travail aux ELU soit supérieur au taux de travail en situation ACC. En d'autres mots, il s'agit de trouver pour chaque situation (favorable, intermédiaire et défavorable) les diamètres de tronc au-dessus desquels nous pouvons ignorer l'effet du feu. En toute généralité, le taux de travail aux ELU et en situation ACC se vérifie comme suite :

CONDITIONS POUR QUE LE FEU NE SOIT PAS DIMENSIONNANT:

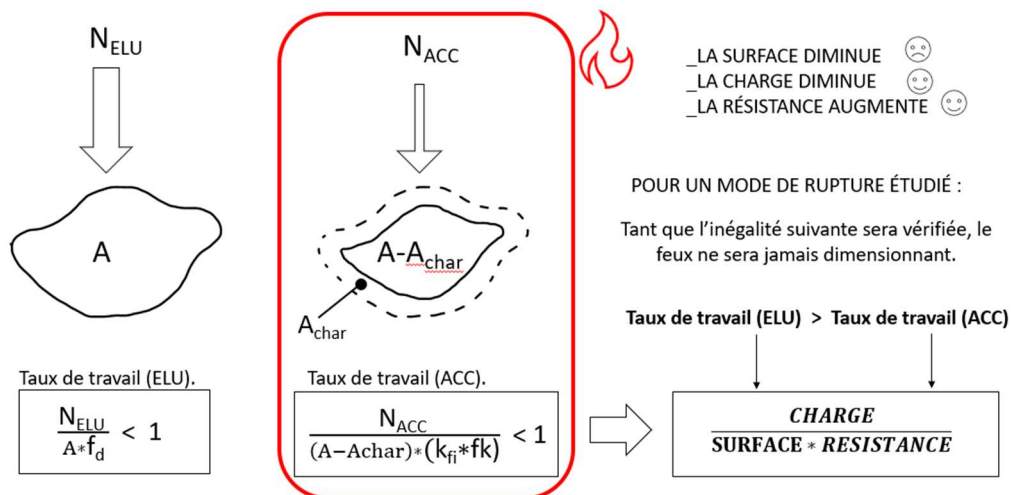


Figure 6-1 Taux de travail : justification des structures au feu

$N_{ELU}$  [N] Force issue d'une combinaison de charges aux états limites ultimes  $q_{ELU} = 1.35G + 1.5Q$

$N_{ACC}$  [N] Force issue d'une combinaison de charges en situation accidentelle  $q_{ACC} = G + \Psi_1 Q$  avec  $\Psi_1 = 0.5$  pour les logements et les bureaux.

$A_{char}$  [mm<sup>2</sup>] portion de surface carbonisée par le feu

Epaisseur de carbonisation efficace  $d_{ef} = \beta_n [\text{mm/minute}] * t_{req} [\text{minutes}] + 7 [\text{mm}]$ . ( $\beta_n = 0.7$  Pour un résineux et 0.55 pour les feuillus)

$f_d = f_k * \frac{k_{mod}}{\gamma_m}$  résistance définie du bois aux ELU

$k_{fi} * f_k$ : Résistance du bois majoré en situation accidentelle avec  $k_{fi} = 1.25$

VARIABLES PRÉDÉFINIES POUR NOS TROIS CAS D'ÉTUDES.




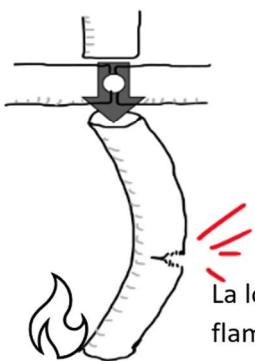
 <p>D30    Q=2 [kN/m<sup>2</sup>]    G=0.54 [kN/m<sup>2</sup>]</p>	<p>D30 : <math>\beta_n = 0,55</math> [mm/minute]</p> <p>qELU= 3,7 [kN/m<sup>2</sup>]    et    qACC =1,54 [kN/m<sup>2</sup>]</p>
 <p>C24    Q=2 [kN/m<sup>2</sup>]    G=3 [kN/m<sup>2</sup>]</p>	<p>C24: <math>\beta_n = 0,8</math> [mm/minute]</p> <p>qELU=7,05 [kN/m<sup>2</sup>] et qACC = 4 [kN/m<sup>2</sup>]</p>
 <p>C24    Q=3 [kN/m<sup>2</sup>]    G=3 [kN/m<sup>2</sup>]</p>	<p><math>\beta_n = 0,8</math> [mm/minute]</p> <p>qELU= 8,55 [kN/m<sup>2</sup>] et qACC =4,5 [kN/m<sup>2</sup>]</p>

Figure 6-3 Jeu de valeur fix pour la justification du flambement au feu

RUPTURE PAR FLAMBEMENT



La longueur de flambement Lf=4m pour tous les cas

$$\frac{CHARGE}{SURFACE * RESISTANCE} (ELU) > \frac{CHARGE}{SURFACE * RESISTANCE} (ACC)$$

$$\frac{N_{ELU}}{A * f_d * k_c} > \frac{N_{ACC}}{(A - A_{char}) * (k_{f_{0,k}} * k_{c_{ACC}})}$$

$$\frac{S * N_b * q_{ELU} * \gamma_M}{A * f_{0,k} * k_c * ELU * k_{mod}} > \frac{S * N_b * q_{ACC}}{(A - A_{char}) * (k_{f_{0,k}} * k_{c_{ACC}})}$$

$$\frac{q_{ELU} * \gamma_M * k_c}{q_{ACC} * k_{mod}} > \frac{A * k_c * ELU}{(A - A_{char}) * k_{c_{ACC}}}$$

$$m > \frac{D^2 * k_{c_{ELU}}}{(D - 2d_{ef})^2 * k_{c_{ACC}}}$$

Constante > f(D)

Résolution : Boucle While Python

Figure 6-2 Garantir un taux de travail ELU inférieur à celui en situation ACC

Il est intéressant de constater que le diamètre D est notre seule variable dans cette inéquation et que la surface de plancher n'intervient pas dans la résolution finale. Compte tenu de la difficulté à isoler D, vous trouverez en annexe le code python qui itère le calcul pour des valeurs toujours plus grandes de D jusqu'à vérifier l'égalité des deux termes. Notez que si nous avons dû fixer le coefficient kc pour la première partie de ce travail, ici nous sommes rigoureux avec son emploi et vérifions le critère du feu de manière stricte.

**RUPTURE PAR FLAMBEMENT :**  
**Diamètres de colonnes minimum**  
**Taux de travail (ELU) > Taux de travail (ACC)**

    
 D30 Q=2 [kN/m<sup>2</sup>] G=0.54 [kN/m<sup>2</sup>]

    
 C24 Q=2 [kN/m<sup>2</sup>] G=3 [kN/m<sup>2</sup>]

    
 C24 Q=3 [kN/m<sup>2</sup>] G=3 [kN/m<sup>2</sup>]

**SITUATION FAVORABLE**

**SITUATION INTERMÉDIAIRE**

**SITUATION DÉFAVORABLE**



Figure 6-4 Rupture par flambement, diamètre de colonnes minimum pour une tenue au feu

Exemple : Pour une situation défavorable et une exigence R60, nous pouvons ignorer l'effet du feu sur le mode de rupture par flambement si le diamètre est supérieur à 341mm. Ceci sera toujours vrai quel que soit la surface de plancher ou le nombre d'étages.

## 6.2 Effet du feu sur les assemblages type bois-bois.

Pour les assemblages, la forme a de l'importance. Garantir une tenue au feu implique qu'après 60 (ou 120) minutes au feu, il y ait une surface d'appuis suffisante pour le repos des poutres et aussi une surface d'appui suffisante pour le transfert des charges des étages supérieurs. La forme aura pour incidence d'exposer plus ou moins l'une ou l'autre surface d'appui. Nous illustrons ceci dans l'exemple ci-dessous. Dans l'encadré de gauche, le transfert des charges des étages en cas d'incendie est conditionné par la forme de l'assemblage. Dans l'encadré, à droite, il s'agit des réactions d'appui des poutres en cas d'incendie qui est conditionné par la forme.

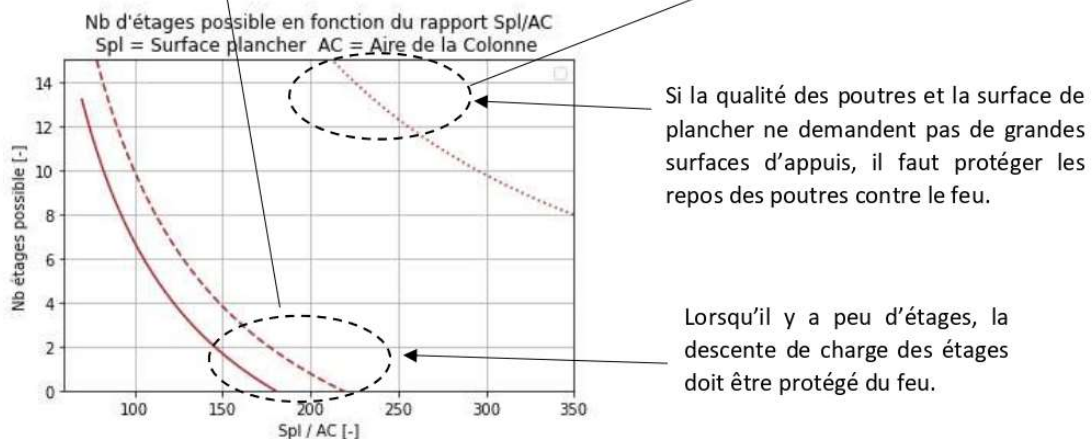
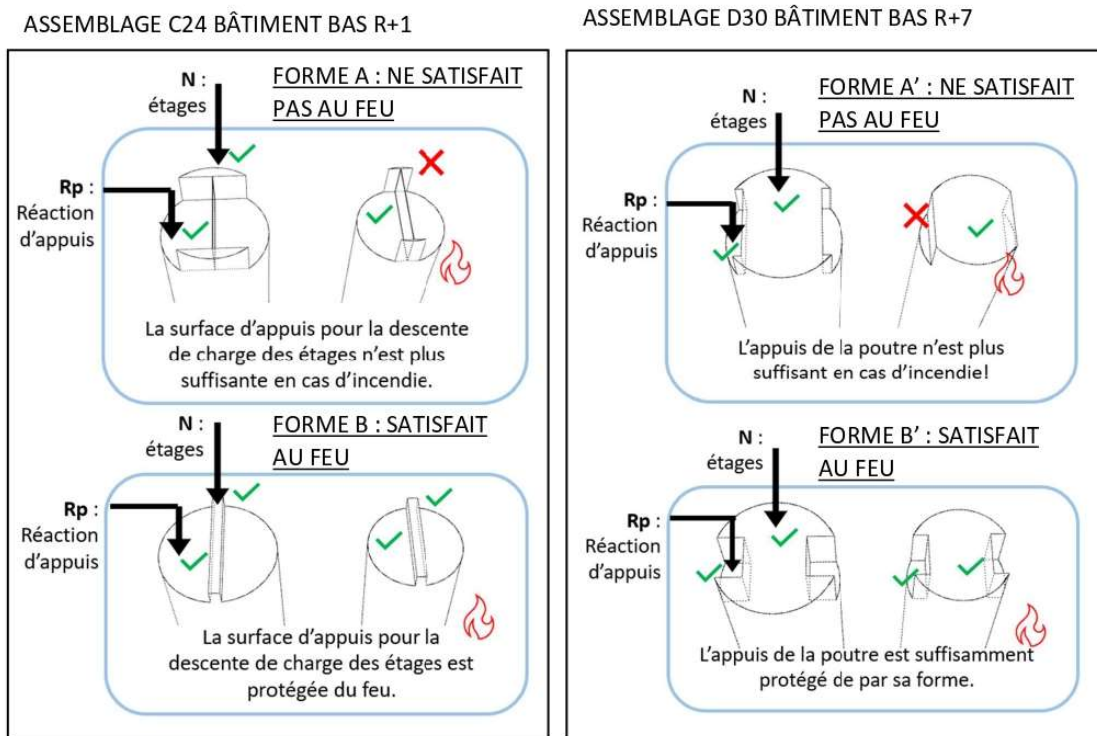


Figure 6-5 Effets du feu sur les assemblages bois-bois

Nous proposons d'attribuer un facteur « x » d'exposition au feu qui quantifie la proportion avec laquelle les surfaces d'appui colonne-colonne et poutre-colonne sont exposées au feu. Pour faciliter l'explication, nous utiliserons un schéma avec une colonne et une poutre mais l'écriture mathématique n'est en rien modifiée si l'on considère une, deux ou quatre poutres. Il s'agit simplement de parler d'une surface dédiée au repos des poutres et une surface dédiée au transfert des charges d'étages.

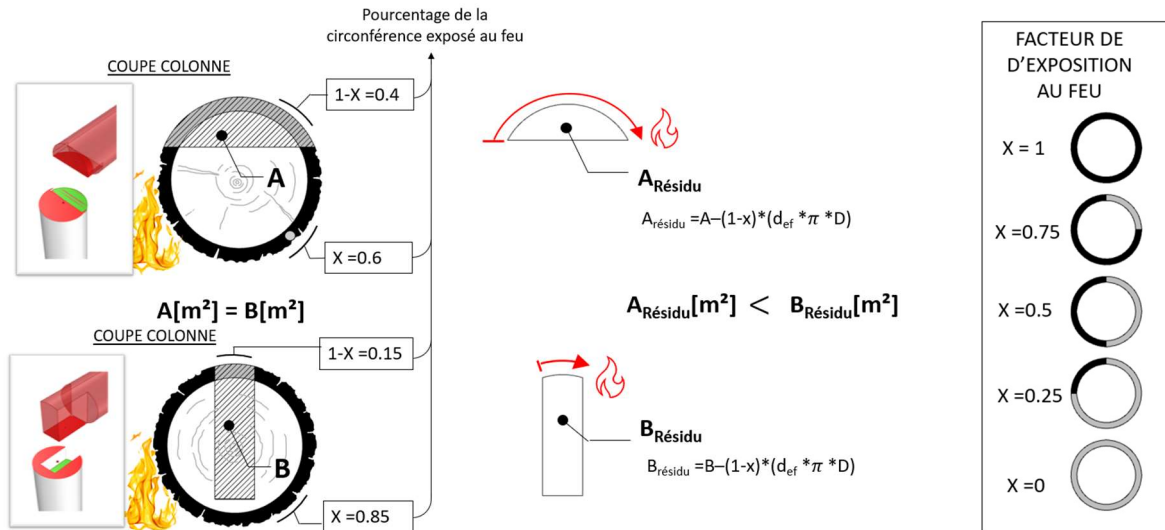


Figure 6-6 Facteur d'exposition au feu

Compte tenu du fait que le feu consomme la colonne sur toute sa circonférence, nous savons qu'une surface de carbonisation  $A_{\text{char}}$  vaut approximativement  $d_{\text{ef}} * \pi * D$  sera consommée par le feu (avec  $d_{\text{ef}}$  la profondeur de carbonisation). Le facteur X indique qu'elle est le pourcentage de cette air  $A_{\text{char}}$  qui sera retiré à la surface d'appuis colonne-colonne et le facteur (1-X) indique le pourcentage restant de  $A_{\text{char}}$  qui sera retiré de l'appui poutre-colonne.

Dans cet exemple, l'assemblage du dessus expose à 40% l'appui poutre-colonne au feu et à 60% l'appui colonne-colonne au feu. Ceci est représenté par un facteur  $X=0,6$

Pour un facteur X donné, nous cherchons les conditions à satisfaire pour que chacune des surfaces  $A_1$  et  $A_2$  vérifie :

$$\frac{\text{CHARGE}}{\text{SURFACE} * \text{RESISTANCE}} (\text{ELU}) > \frac{\text{CHARGE}}{\text{SURFACE} * \text{RESISTANCE}} (\text{ACC})$$

DÉFINITIONS DES SURFACES  $A_1$  et  $A_2$

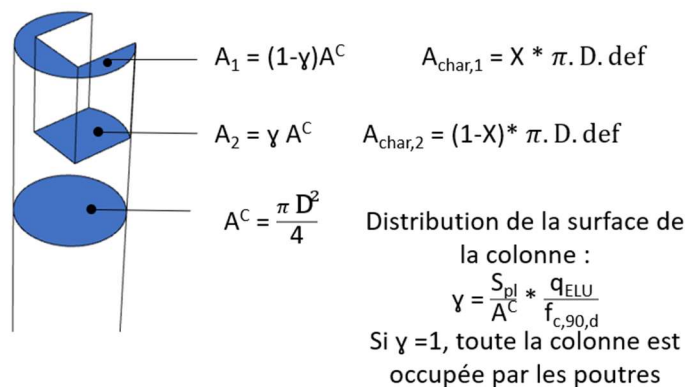


Figure 6-7 Distribution de la surface de la colonne

Maintenant que nous disposons d'une expression mathématique pour chaque surface, nous pouvons reprendre un développement similaire à celui que nous avons fait pour le flambement en retirant les coefficients  $k_c$  de l'inéquation. Ce qui nous donne :

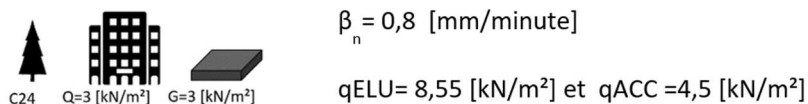
$$m > \frac{A_1}{(A_1 - A_{char,1})} = \text{fonction de } (S_{pl}, D, X)$$

$$m > \frac{A_2}{(A_2 - A_{char,2})} = \text{fonction de } (S_{pl}, D, X)$$

Après avoir développé les termes de l'inéquation nous trouvons une certaine fonction de  $(S_{pl}, D, X)$ . Nous proposons de tracer pour chaque inéquation un graphique qui, pour une valeur  $S_{pl}$  et  $D$  connue nous renverra un facteur d'exposition  $X_{min}$  ou  $X_{max}$  à ne pas dépasser pour garantir que le feu ne soit pas dimensionnant. Pour expliquer le fonctionnement de la méthode, nous allons continuer en traitant un exemple concret.

### 6.3 Graphiques pour assemblages bois-bois résistant au feu.

Comme précédemment, pour tracer nos graphiques, il nous faut définir un cas d'étude. Choisissons par exemple le cas « défavorable ». Nous disposons donc des valeurs suivantes pour définir le terme «  $m$  » constants de nos inéquations.



Ceci nous permet de tracer les deux graphiques suivants. Si nous définissons la surface de plancher en abscisse et le diamètre de la colonne en ordonnée, nous obtenons la valeur limite de «  $X$  » ( $X_{min}$  ou  $X_{max}$ ) grâce à l'échelle colorimétrique qui se trouve à droite de chaque graphique.

L'exemple pointé sur le graphique est celui d'un bâtiment R+1 avec une surface de plancher de 36m<sup>2</sup>. Il nous indique que le facteur d'exposition  $X$  concernant la zone de contact colonne-colonne ne peut pas être supérieur à 0,3. Sur l'illustration, seul des assemblages avec des tenons rectangulaires sont représentés, mais le facteur  $X$  reste valable pour toutes les formes. Ceci nous invite par exemple à exclure les formes d'assemblages en queue d'aronde qui auront tendance à positionner la surface sensible sur le contour de la colonne.

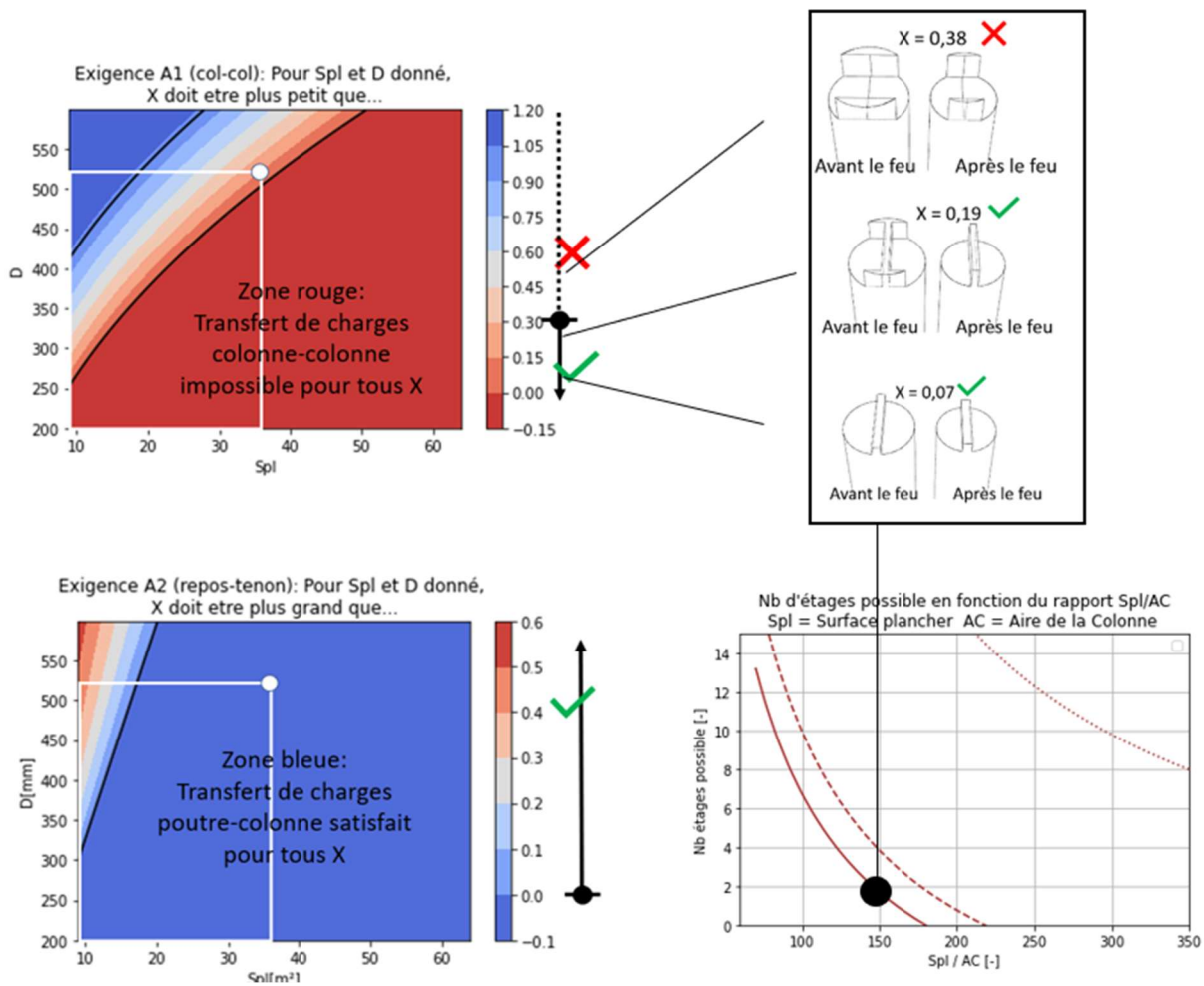


Figure 6-8 Graphique pour la conception d'assemblages bois bois résistant au feu

## 6.4 Conclusion de chapitre

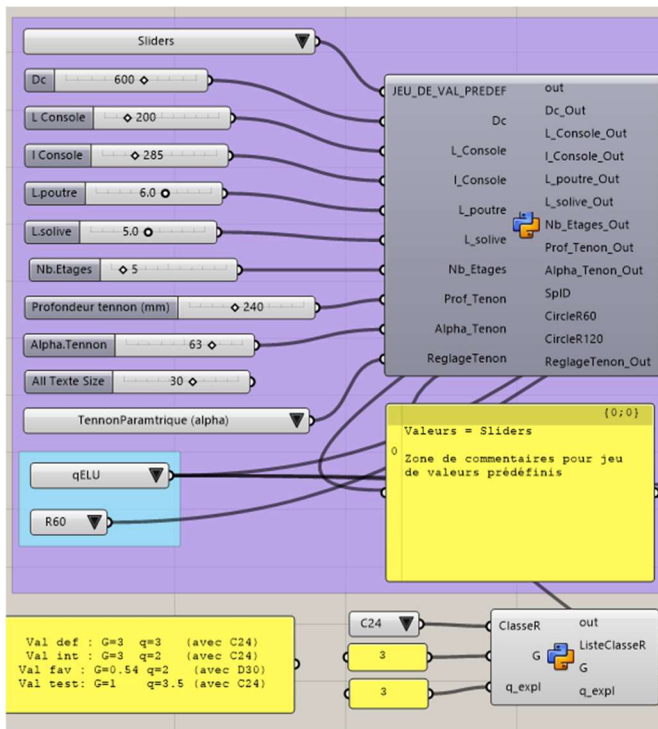
Pour le flambement, les résultats obtenus sont très positifs et nous permettront, dans la majorité des cas, de pouvoir ignorer le feu. Nous retiendrons que pour un bâtiment R60 dont les colonnes ont un diamètre supérieur à 341mm, le feu n'est pas un problème pour la rupture par flambement. Il faudra au cas par cas vérifier la tenue au feu des assemblages types composites retenus.

Pour les assemblages type bois-bois, nous retiendrons deux choses. La surface colonne-colonne des bâtiments R+1 ou R+2 est très petite et donc très sensible au feu. La surface Poutre-Colonne peut être sensible pour des petites surfaces de plancher, cela étant davantage vrai pour les feuillus même si ceux-ci se consomment moins vite au feu.

# Conception paramétrique des assemblages

## 7 Conception paramétrique des assemblages

Jusqu'ici, les graphiques proposés traitent d'assemblages en toute généralité et ne se prononcent sur aucune forme géométrique. Afin d'explorer ces formes et de préciser des cas concrets d'assemblage, il est possible de s'aider d'outils de dessins paramétriques. Nous avons réalisé un programme sur l'un de ces logiciels de dessins (Grasshopper) qui nous permet d'extraire les données géométriques d'un assemblage pour le calculer. Seul les assemblages type bois-bois et console sont traité pour une étude aux ELU et en situation ACC.



Nous présentons ici quelques images sans commentaire sur son utilisation. Nous relevons toutefois l'importance de bien considérer ce type d'outils pour faire de la recherche. Cela semble être le meilleur outil pour manipuler les géométries courbes des troncs, les cas de charges asymétriques ou encore simuler la carbonisation du bois. Une représentation 3D permet aussi de soulever des réflexions techniques ou de mise en œuvre. Lorsque le code que nous avons réalisé touche à ses limites il est toujours possible d'extraire les géométries et de continuer la proposition d'assemblage à la main (fixation de consoles avec des boulons, protection au feu de zones sensibles, calcul de surface avec leur centre de gravité...).

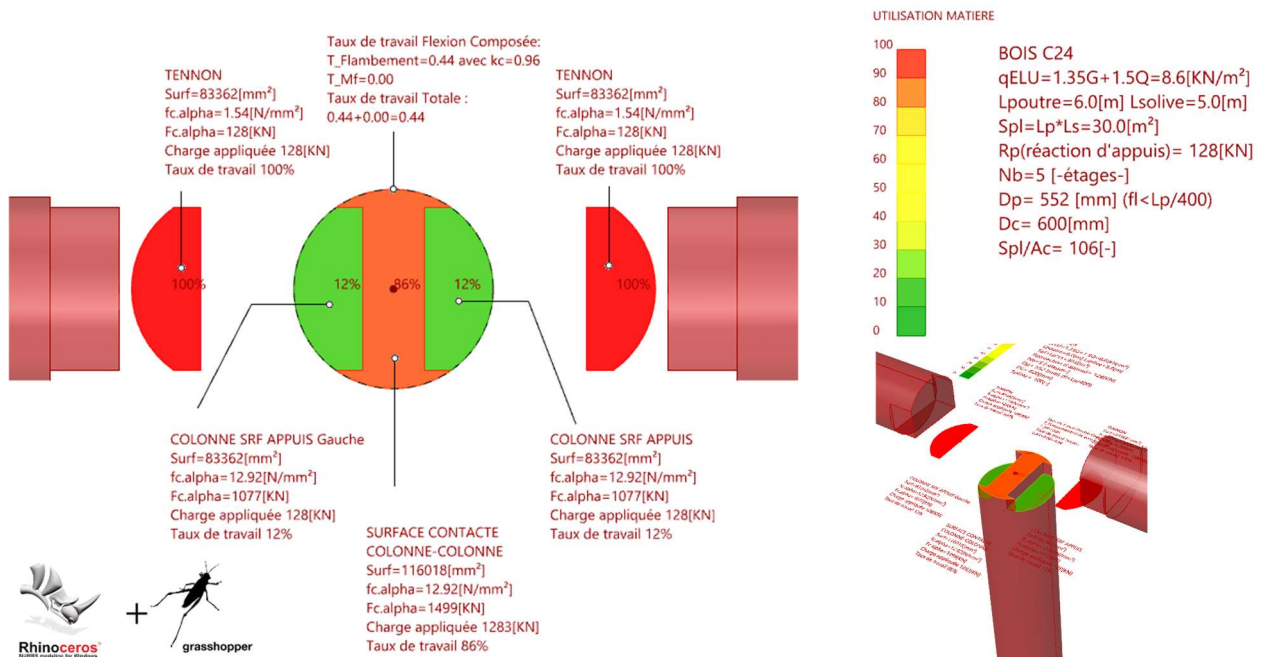


Figure 7-1 Visuel du programme réalisé avec grasshopper

# Cas concret et solutions d'assemblages

## 8 Cas concret et solutions d'assemblages

CHOIX D'UNE SITUATION COMMUNE POUR COMPARER NOS ASSEMBLAGES.

Dans ce chapitre, nous allons dimensionner quelques assemblages concrets. Pour mieux les comparer, nous les dimensionnerons tous pour un cas de charges et des dimensions colonne plancher identiques. Ceci nous permettra d'observer les difficultés techniques et de comparer le nombre d'étages accessibles. Nous avons choisi une grande surface de plancher, une charge d'exploitation élevée et un complexe de plancher lourd, car ceci permet une architecture sans compromis.

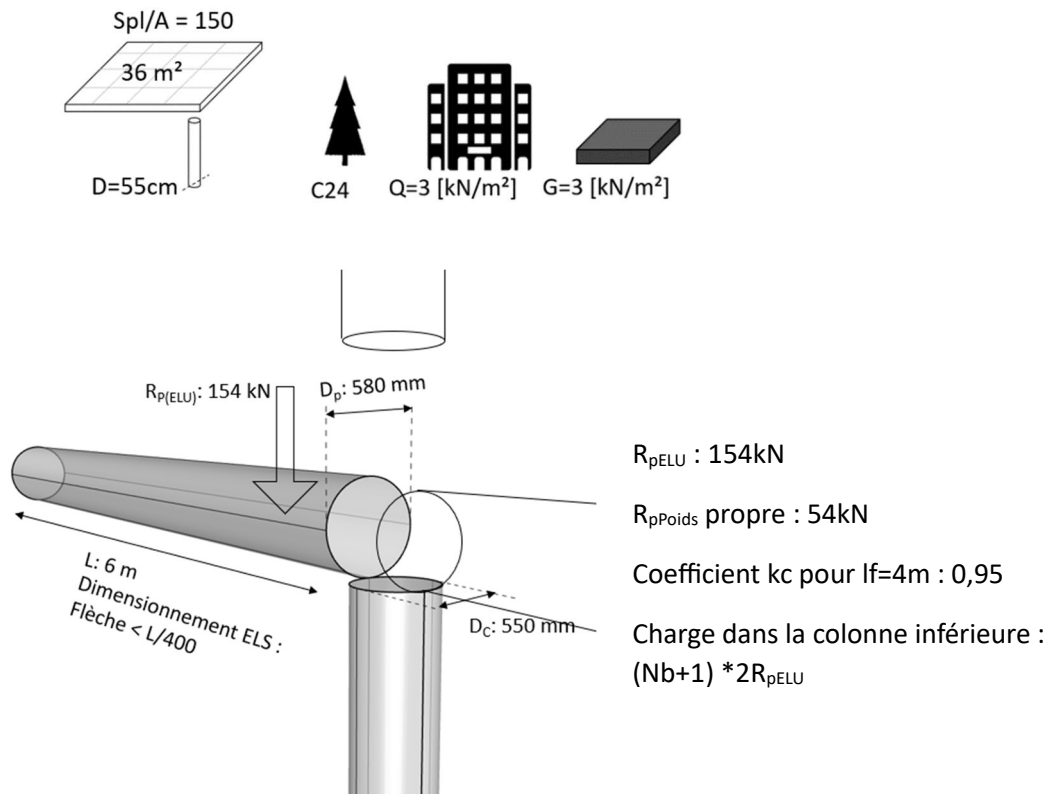


Figure 8-1 Choix de variables communes pour les exemples concrets

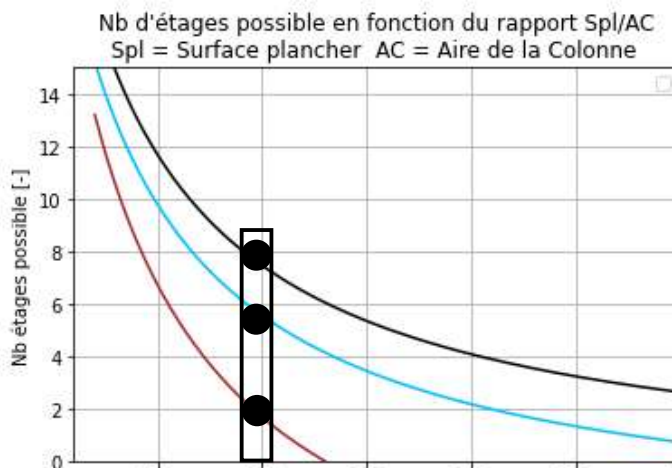


Figure 8-2 Solutions positionnées sur le graphique de référence

Pour les exemples à venir,  $k_c$  valant 0,95 et l'excentricité étant calculé avec des valeurs exactes, certains résultats seront plus favorables que le graphique.

## 8.1 BLC vs Bois rond : Ce qui va pour un ne va pas pour l'autre. Contre-exemple d'assemblage avec ferrure en âme.

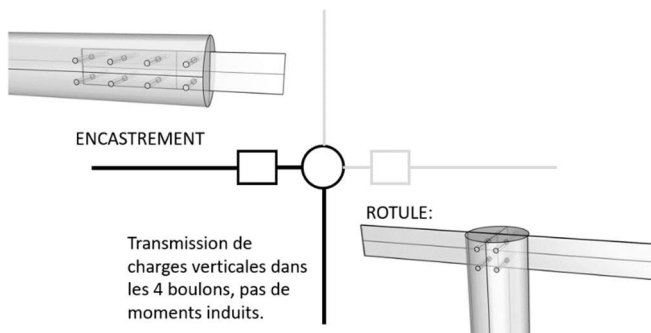


Figure 8-3 Schéma statique d'une solution avec encastrement


Pour les constructions en BLC, il est fréquent de voir des solutions d'assemblages avec des ferrures en âme. De ce fait, nous serions tentés de vouloir reproduire cela avec du bois rond. C'est donc ce que nous avons fait, et à travers cet exemple, nous mettons en évidence les difficultés que cela représente pour le bois rond.

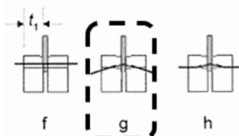
L'ambition de cet assemblage est de transmettre les réactions d'appuis des poutres à la colonne sans excentricité ni

moments fléchissant induit, de sorte à atteindre une rupture par flambement. La ferrure est encastree dans la poutre et nous acceptons l'hypothèse d'une rotule à 4 boulons car aucun moment ne leur seront transmis.

### JUSTIFICATION COLONNE-FERRURE (CAS CRITIQUE : ELU)

En l'absence de prescriptions dans l'EC5, pour ce calcul, les conditions de pinces sont appliquées en considérant une section rectangulaire circonscrite à la section du tronç.

Sens du fil  Portance locale C24  
 $f_{h0k} = 20 \text{ [N/mm}^2\text{]}$



$t_1 = 275 \text{ mm}$   
 $f_{uk} = 600 \text{ [N/mm}^2\text{]}$   
 $F_{vrk\_f} = 166 \text{ kN}$ ,  $F_{vrk\_g} = 75 \text{ kN}$ ,  $F_{vrk\_h} = 63 \text{ kN}$   
 « h » : Rotule plastique dans la tige:  
 En considérant les 2 plans de cisaillements, l'effort  $F_{vd}$  admissible par boulons est:  
 $F_{vd} = 2 * F_{vrk} * K_{mod} / \gamma_M = 77,5 \text{ kN}$   
 Effort à reprendre dans une file :  $R_p = 127 \text{ kN}$

Justification :  $\rightarrow \frac{154}{2 * 77,5} = 0,99 < 1$

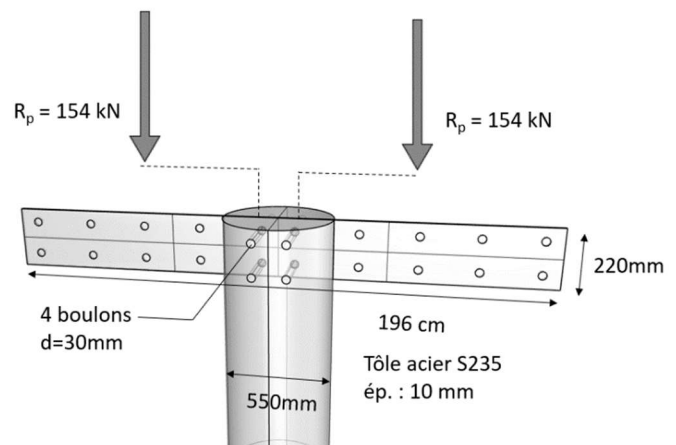


Figure 8-4 Détail de calcul ferrure-colonne

La transmission des réactions d'appui à la colonne se fait sans encombrement et la connexion colonne-colonne peut donc se faire sur toute la section. Il est maintenant possible de transmettre la charge des étages en exploitant l'entièreté de la colonne de manière à solliciter un mode de rupture par flambement. Il reste maintenant à vérifier l'encastrement des ferrures dans les poutres.

LA CAPACITÉ DE REPRISE DE L'ENCASTREMENT EST LIMITÉE PAR LE PHÉNOMÈNE ILLUSTRÉ CI-DESSOUS.

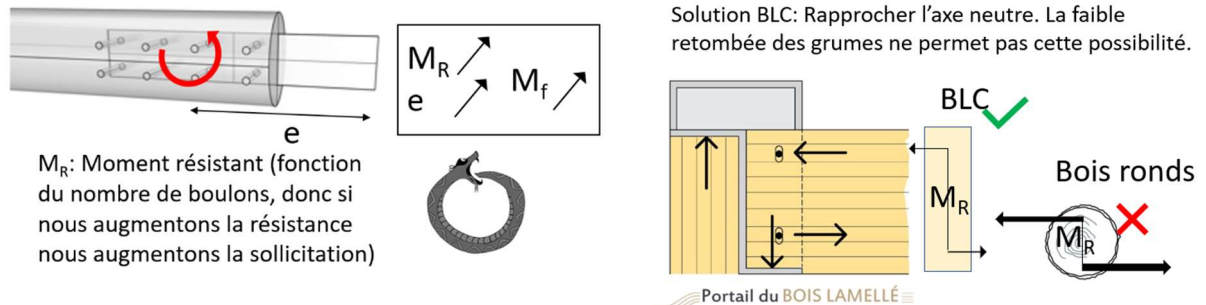


Figure 8-5 Problématique liée à l'encastrement d'une ferrure dans une poutre

Pour réduire le moment fléchissant induit aux poutres à des valeurs acceptables, nous continuons notre contre-exemple en considérant le caractère symétrique de l'assemblage, pour contrebalancer les efforts. Notons que ce choix implique malheureusement l'obligation de trouver une autre solution pour les cas « une poutre une colonne » en bord de bâtiment. L'encastrement de la ferrure doit garantir l'équilibre des moments et l'équilibre vertical. L'équilibre des moments étant largement plus contraignant pour les boulons, nous calculerons l'encastrement pour une phase chantier ou le moment fléchissant est à son maximum.

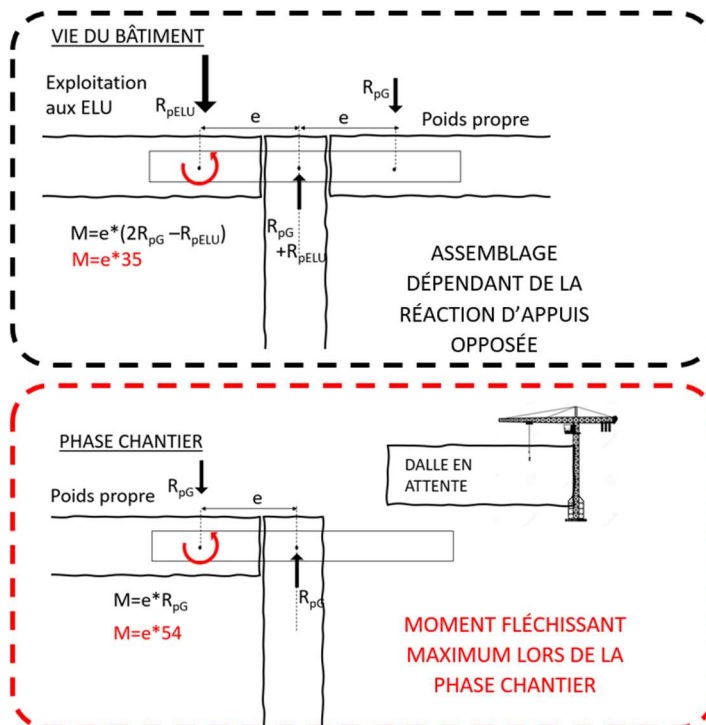


Figure 8-6 Recherche du moment induit maximum

## JUSTIFICATION POUTRE-FERRURE (CAS CRITIQUE : PHASE CHANTIER)

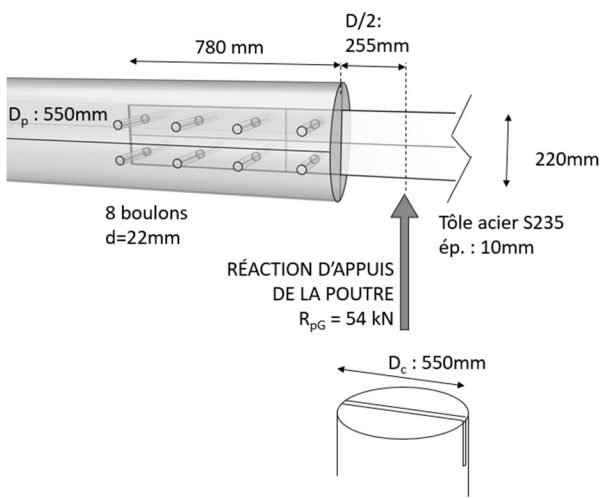
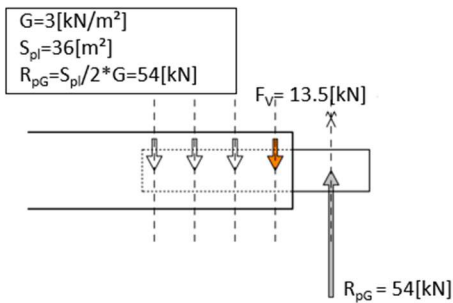


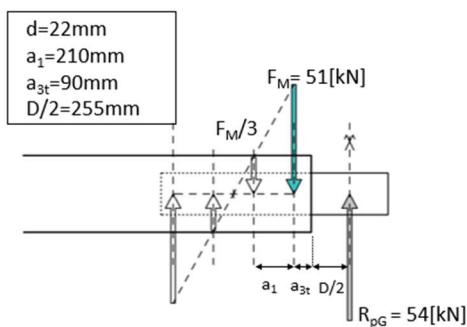
Figure 8-7 Sollicitation et dimensions de l'assemblage ferrure-poutre

Pour justifier la connexion, nous cherchons l'effort maximum qui est induit dans la première file de boulons. Sur base de la réaction d'appui de la poutre en phase chantier (poids propre), nous garantissons l'équilibre vertical et l'équilibre de rotation de la ferrure. La somme des efforts induits doit pouvoir être reprise par la première file de boulons qui est la plus sollicitée. Notons que l'effort induit par le moment fléchissant est largement supérieur à celui induit par l'équilibre vertical. Bien que nous ne le démontrions pas, dans les hypothèses faites, la phase chantier est bien dimensionnante.

### ÉQUILIBRE VERTICALE :



### ÉQUILIBRE DES MOMENTS :



### CONTRAINTE MAX REPRISE PAR UNE FILE DE DEUX BOULONS d=22mm :

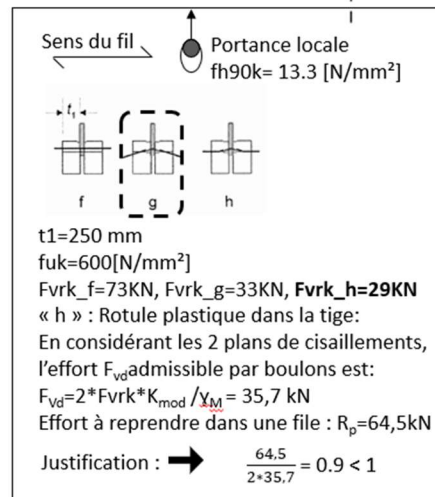
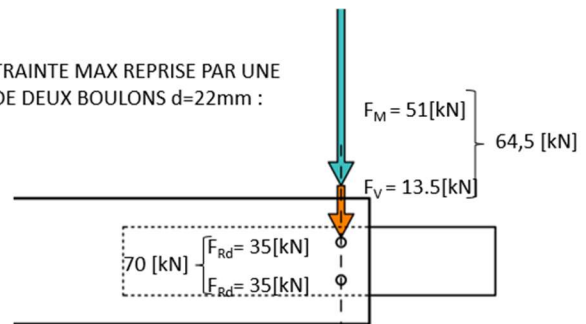


Figure 8-8 Détail de calcul ferrure-poutre

#### CRITIQUE DE L'ASSEMBLAGE :

La volonté de vouloir encastrier une ferrure dans une poutre ronde de faible retombée, se fait avec beaucoup de peine. Ceci nous a amenés à rejeter toute tentative d'encastrement pour ces recherches.

L'absence de prescriptions dans l'EC5 sur les conditions de pince est un obstacle conséquent qui pour être surmonté nécessiterait de faire des hypothèses très contraignantes (section rectangulaire inscrite dans le plan du tronc au lieu de circonscrite) ou à engager des recherches dans ce domaine. Ceci nous amène à rejeter toute tentative d'emploi de boulons sollicités en cisaillement dans des valeurs trop élevées.

La quantité de matière, la réalisation et la mise en œuvre de cet assemblage, qui à ce stade n'est pas prévu pour une tenue au feu, ne semble pas une solution soutenable. Ceci nous amène à considérer l'importance d'un désign simple d'un point de vue mise en œuvre.

Bien que l'emploi de ferrure en âme trouve de belles applications pour le BLC, nous voyons qu'il n'est pas toujours possible de plagier ces typologies d'assemblages. Le bois rond appelle à développer des assemblages qui lui sont adaptés.

## 8.2 Assemblage type bois-bois : problématique pour les bâtiments R+1

Pour le cas de charges et les dimensions de tronc donnés, les assemblages type bois-bois ne permettent pas de réaliser plus d'un niveau. En donnant des dimensions concrètes à l'assemblage nous nous heurtons aux difficultés qui résultent d'une très petite surface disponible pour la transmission de la charge des étages.

Pour des raisons de tenue au feu, nous sommes obligés de contenir la petite surface de contact colonne-colonne entre les deux poutres telle que mentionnée dans le chapitre sur le feu.

En l'absence de matière suffisante pour creuser une mortaise avec deux joues, il est possible de maintenir les poutres sur leurs appuis par l'emploi d'une tige métallique simplement déposée dans des réservations.

Pour garantir la rigidité de l'élément central il est possible de chanfreiner les poutres sur leur dessus et aussi d'insérer des tiges métalliques entre les deux colonnes.

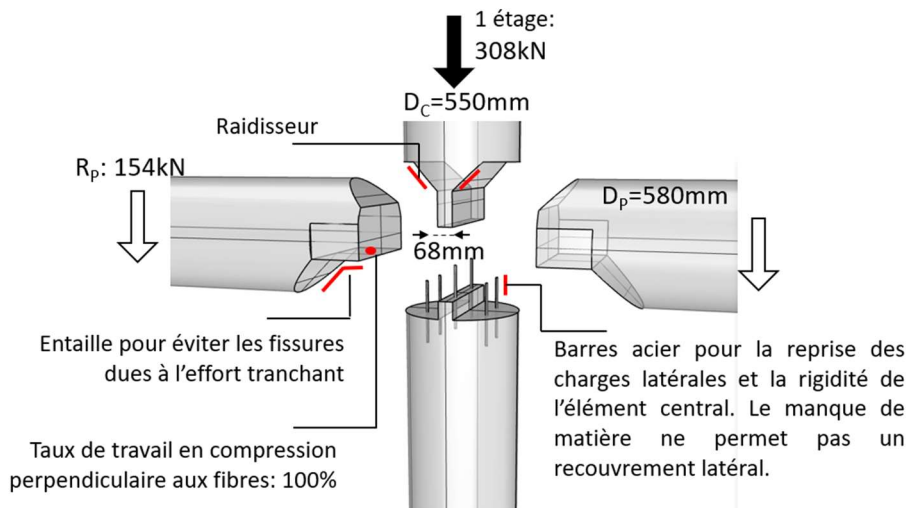


Figure 8-9 exemple d'assemblage bois-bois

CRITIQUE DE L'ASSEMBLAGE :

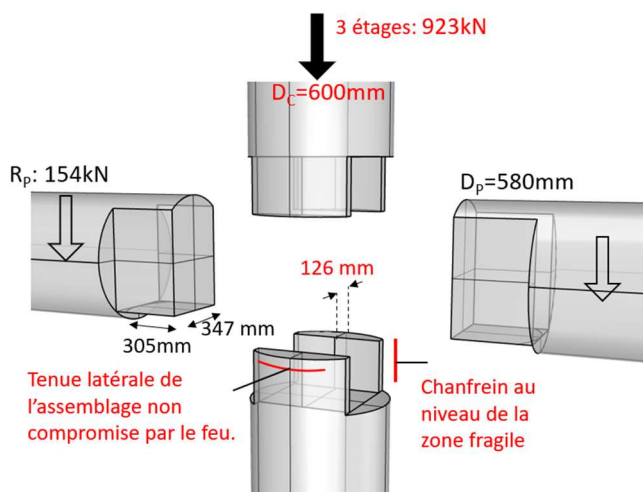


Figure 8-10 Correction des faiblesses de l'assemblage par l'emploi d'un plus gros diamètre

Bien que nous ayons proposé des solutions pour pallier aux problèmes soulevés, la fragilité de la partie centrale reste très préoccupante. Un diamètre de 60 cm permettrait d'éviter ce problème et par la même occasion de construire en R+3. Ci-contre, un exemple adapté aux remarques. Notons qu'il est possible d'adopter ce design sans construire en R+3, mais que cela se traduirait par un « gaspillage » de matière pour faute de solutions techniques. Toutefois, un assemblage 100% bois pourrait permettre des économies financières capables de compenser ce « gaspillage ».

### 8.3 Assemblage entre type bois-bois et type console

Dans cette proposition nous ajoutons une pièce de bois en feuillus D30 dont la résistance perpendiculaire aux fibres est trois fois plus résistante à celle d'un résineux C24. Nous profitons de cette propriété sans changer toute la poutre. Pour en profiter davantage il faudrait affiner le tenon et traiter avec des questions d'équilibre car la réaction d'appuis se trouverait en dehors de la colonne.

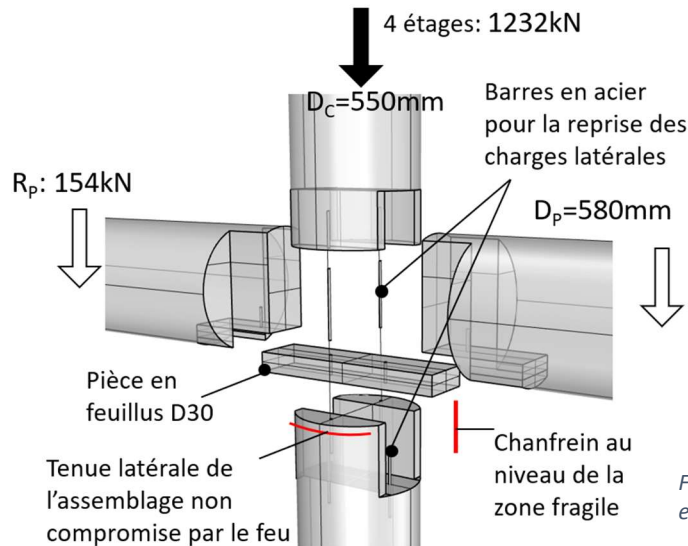


Figure 8-11 Exemple d'assemblage entre type bois-bois et type console

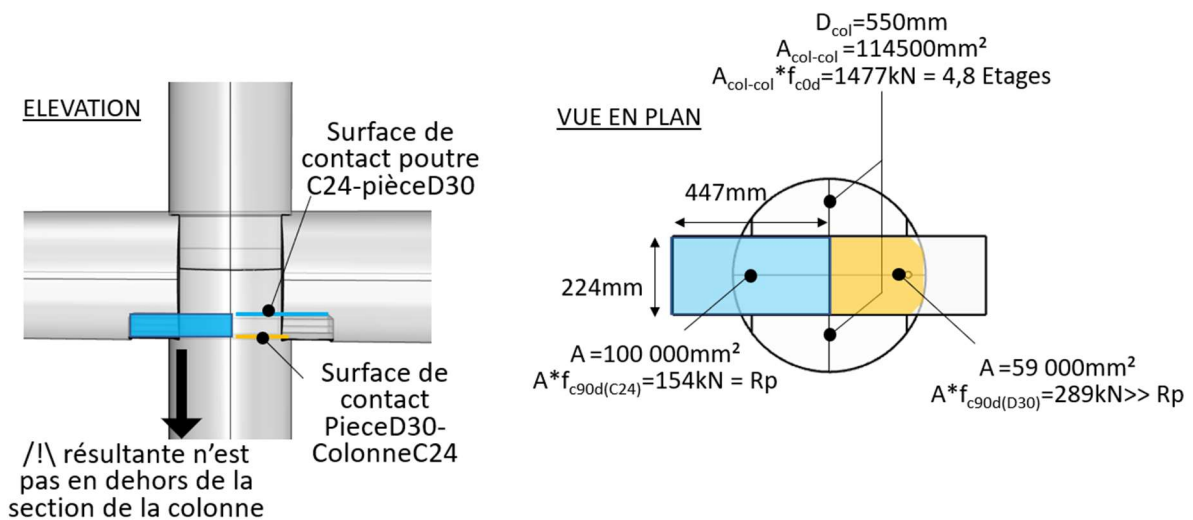


Figure 8-12 Détails de calculs : assemblage entre type bois-bois et type console

#### CRITIQUE DE L'ASSEMBLAGE :

Cette solution est très enthousiasmante car elle est très facile à réaliser et offre une belle capacité de reprise de charge. Le simple ajout d'une pièce en chêne dans notre assemblage nous a permis de passer d'un bâtiment R+1 à un bâtiment R+4.

## 8.4 Assemblage en console, pièces rapportées en bois.

Les pièces en console de ces assemblages permettent de dégager la surface de la colonne pour la transmission des charges des étages. Nous voyons sur les calculs que le taux de travail le plus important est celui produit par la flexion composée. L'empiètement des consoles sur la colonne nécessaire à leur fixation n'est donc pas un problème. Les repos console-colonne doivent impérativement être protégés du feu, nous proposons ici une solution parmi d'autres.

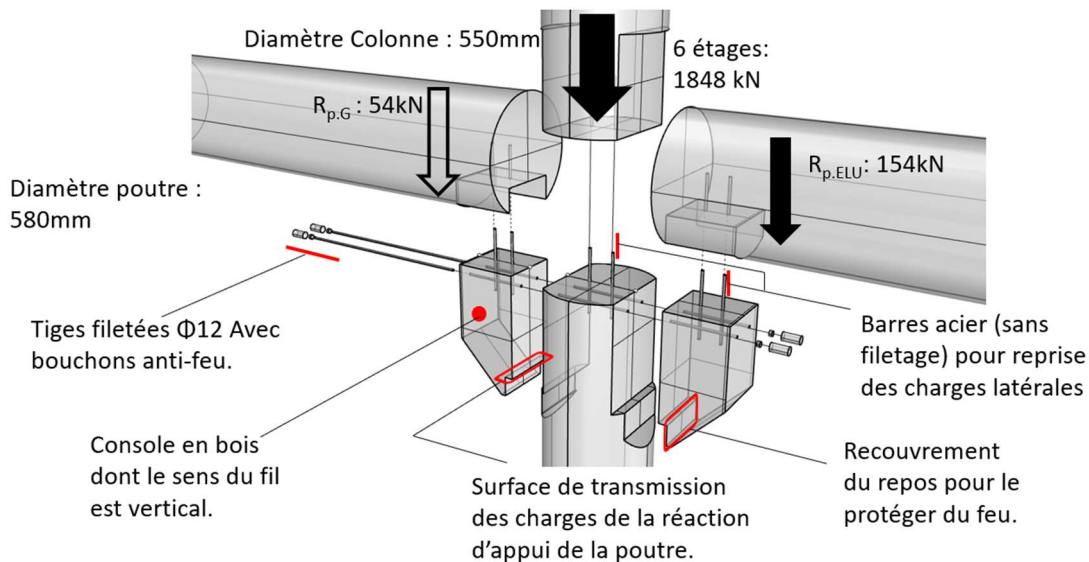


Figure 8-13 Exemple d'assemblage en console avec pièces rapportées en bois

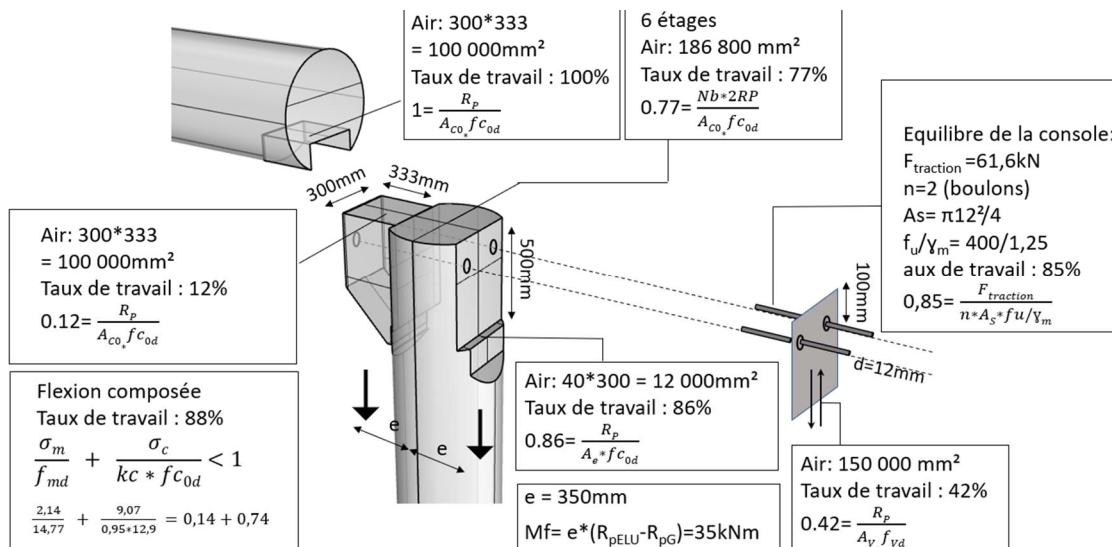


Figure 8-14 Détail de calculs : assemblage en console avec pièce rapportées en bois

### CRITIQUE DE L'ASSEMBLAGE :

Malgré la performance satisfaisante de l'assemblage en console, la complexité et la nécessité de deux pièces supplémentaires de grande taille sont contraignantes. À une certaine dimension, la flexion composée peut poser des problèmes en cas d'incendie.

## 8.5 Assemblage en console, pièce rapportée en béton.

Cette proposition essaie de saisir l'opportunité qu'offre une conception en console pour simplifier la géométrie des colonnes. En effet, par rapport aux consoles en bois de l'exemple précédent, ici, seul une coupe droite est requise sur les colonnes. L'emploi de béton permet de faire une console très résistante en une seule pièce, capable de s'insérer entre les deux colonnes sans se rompre, ce qui n'aurait pas été possible avec du bois. Nous proposons de fixer la partie en béton avec des broches collées, mais une alternative avec des vis en oblique est envisageable.

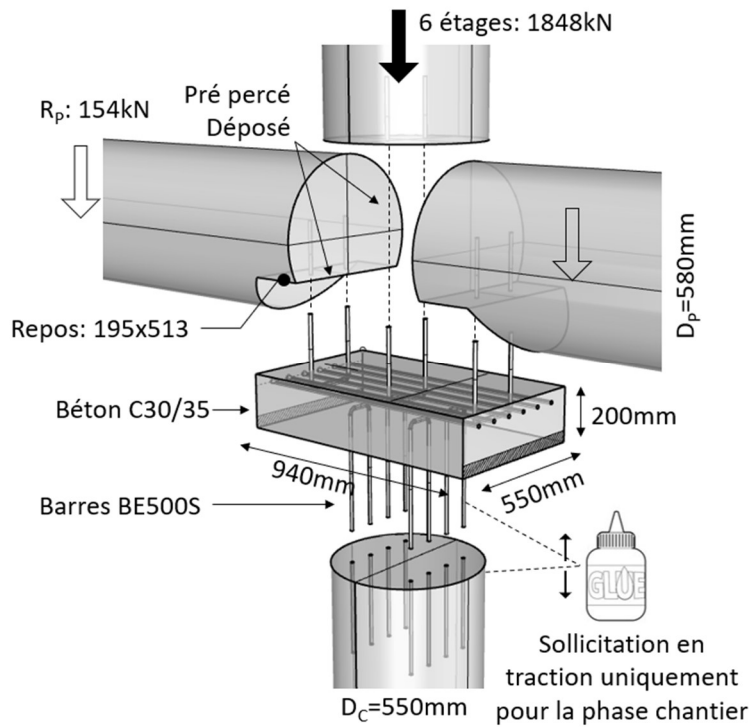
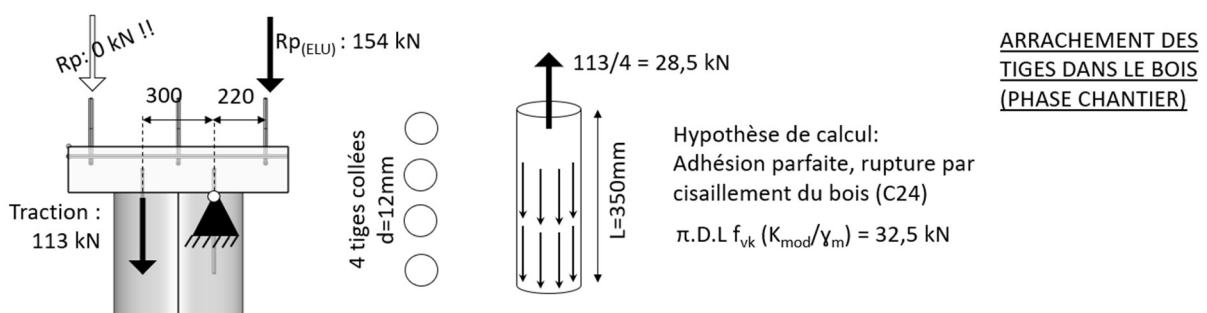
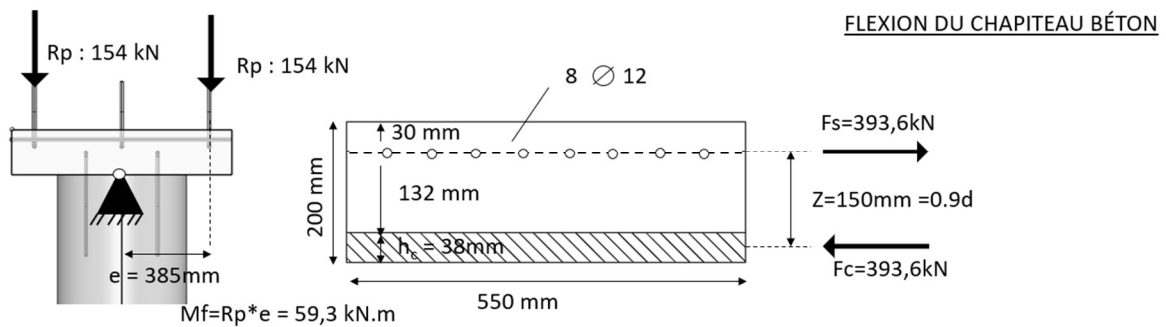


Figure 8-15 Exemple d'assemblage en console avec pièce rapportée en béton



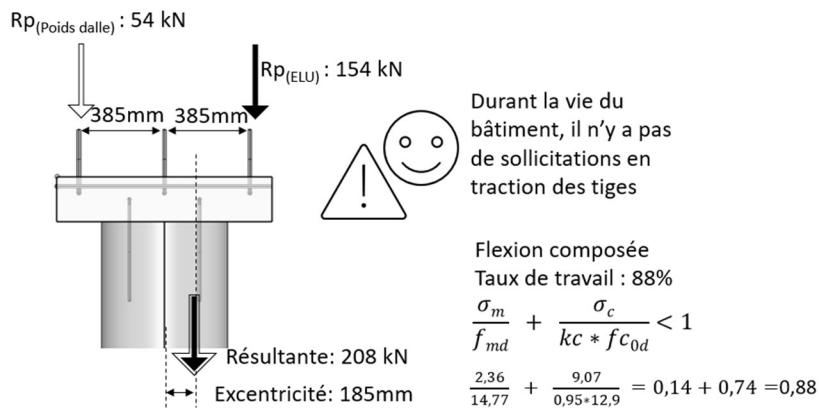


Figure 8-16 Détail de calculs : assemblage en console, pièce rapportée en béton

### CRITIQUE DE L'ASSEMBLAGE :

Une étude approfondie de la fixation du béton au sommet peut éviter la phase délicate du collage. Il est important de considérer les hypothèses de chargement lors de la construction du bâtiment. Étant donné que la résultante des réactions d'appui, lors d'un chargement asymétrique reste dans la colonne pendant la durée de vie du bâtiment, il peut ne pas être nécessaire de garantir la reprise d'un effort de traction comme nous l'avons fait. Pour les ancrages en bois de bouts, il est crucial de contrôler le retrait du bois. Pour cela, il serait nécessaire de réaliser une fente dans la colonne afin de contrôler l'endroit où se produisent les retraits du bois s'il est mis en œuvre à l'état vert. Ce type d'assemblage prendrait tous son sens s'il permettait d'envoyer les colonnes depuis la forêt vers le chantier sans passer par un atelier pour être taillé.

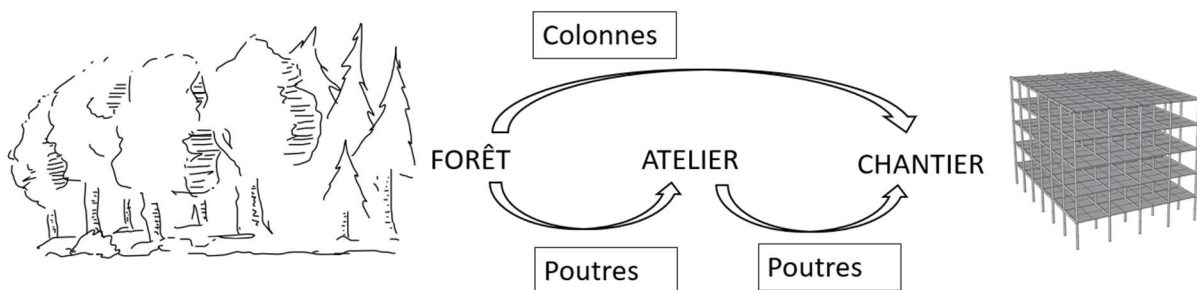


Figure 8-17 Choix d'assemblage et transport des troncs

## 8.6 Assemblage type composite, IPE béton (R+9)

Pour continuer notre recherche de simplicité et de performance, nous proposons l'emploi d'IPE et de béton. Nous offrons la place nécessaire au repos des poutres en condensant la descente de charge des étages dans l'âme des profilés acier. Il n'y a ni soudure ni perçage dans l'acier, les dalles béton sont d'une géométrie très simple et les colonnes n'ont besoin que de deux trous et une coupe droite. Dans cet assemblage, l'excentricité est négligeable et nous pouvons bénéficier d'un mode de rupture par flambement.

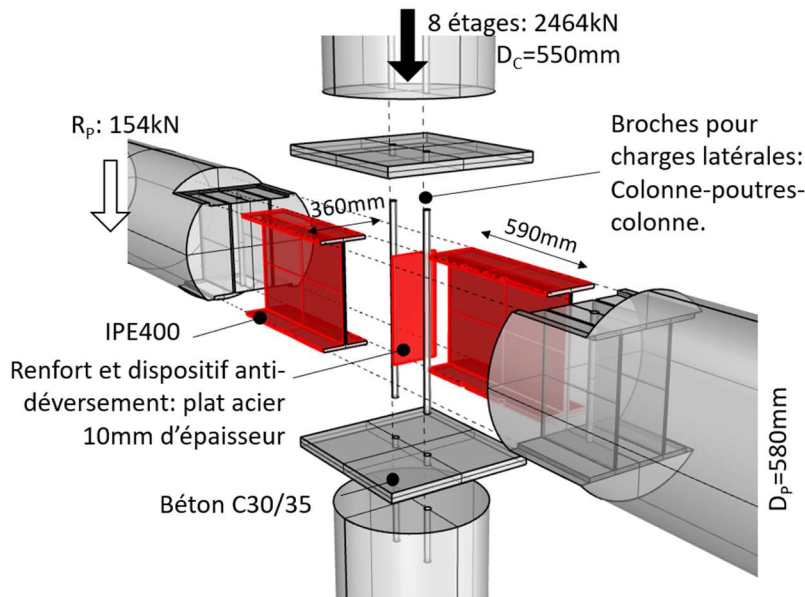


Figure 8-18 Exemple d'assemblage composite

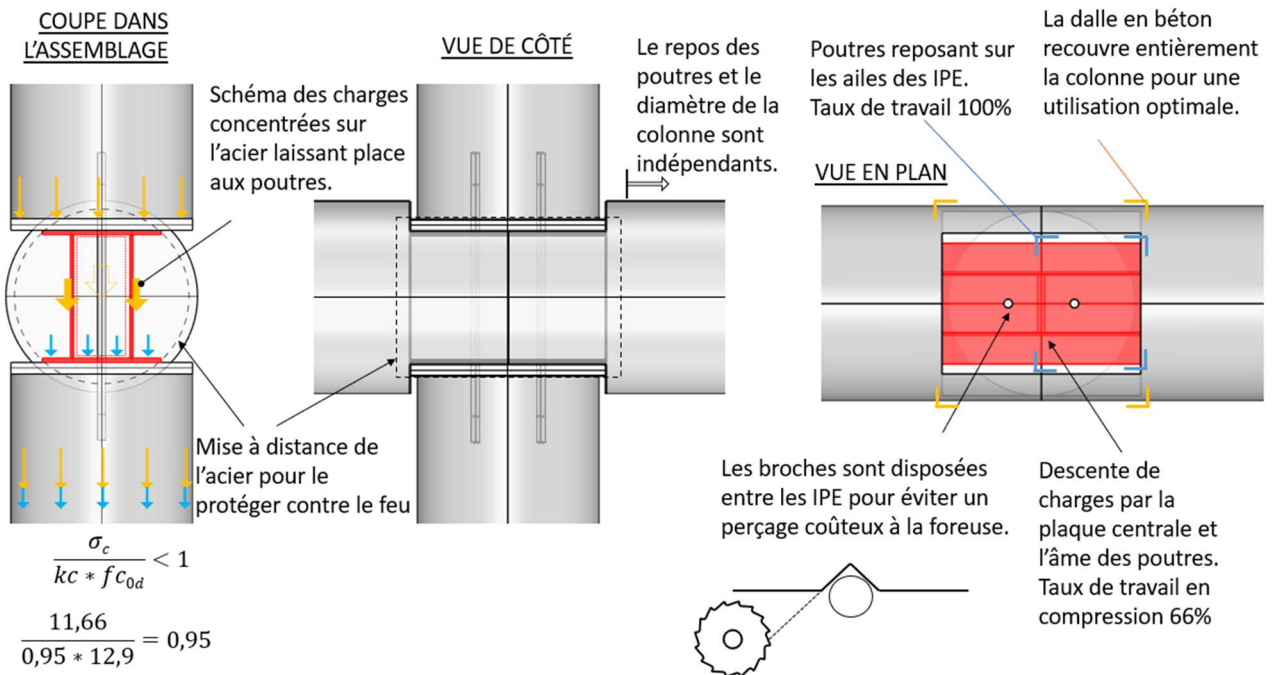
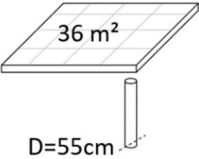



Figure 8-19 Détails de calculs : assemblage composite


## 8.7 Synthèse des propositions d'assemblages




36 m<sup>2</sup>  
D=55cm



C24



Q=3 [kN/m<sup>2</sup>]

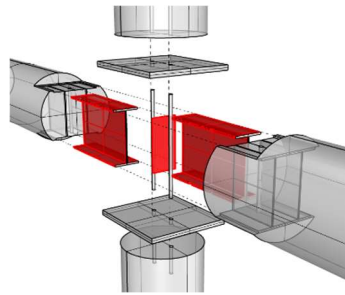


G=3 [kN/m<sup>2</sup>]

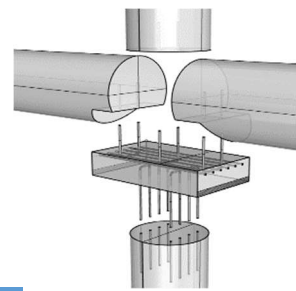
Calculs pour un chargement aux ELU 1,35G+1,5Q.  
Pas de charges latérales  
Réaction d'appui d'une poutre 154kN  
Tenue au feu R60

### ASSEMBLAGE COMPOSITE : R+9

Nous offrons la place nécessaire aux repos des poutres en condensant la descente de charges des étages dans l'âme des profilés acier.



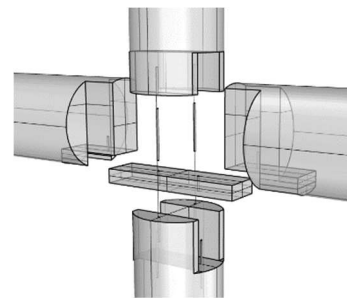
Rupture globale par flambement



### ASSEMBLAGE EN CONSOLE : R+6

Le repos des poutres se fait en dehors de l'espace de la colonne, sur une dalle en béton traversante. La charge des étages peut transiter sur toute la surface de la colonne.

Rupture globale par Flexion composée



### ASSEMBLAGE HYBRIDE BOIS-BOIS CONSOLE : R+4

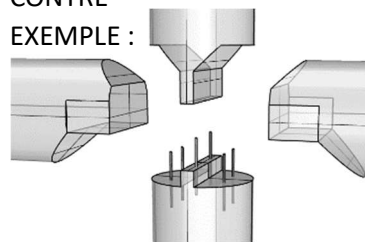
L'ajout d'une pièce en chêne avec un léger débord sous les tenons réduit l'encombrement des poutres sur la colonne. Le débord ne cause pas de problème de déséquilibre.

Rupture locale par compression

### ASSEMBLAGE BOIS-BOIS : R+1

Les poutres peu résistantes perpendiculairement aux fibres nécessitent une grande surface de support, ce qui limite l'espace disponible pour le transfert de charges des étages. Cette zone étroite devient donc fragile et nécessite un renforcement.

#### CONTRE-EXEMPLE :



#### PROBLÉMATIQUE DES ASSEMBLAGES BOIS-BOIS.

Rupture locale par compression



Figure 8-20 Synthèse des propositions d'assemblage

# Explorations futures et réflexions sur la mise en œuvre

## 9 Explorations futures et réflexions sur la mise en œuvre

Maintenant que nous avons une vision claire sur la performance des assemblages et la possibilité d'atteindre l'optimum structurel, nous pouvons nous intéresser non seulement au ratio économie performance, mais aussi à l'accessibilité du système constructif. En effet, plus le système est simple et nécessite peu d'outils, plus il sera répandu et nous pourrons en bénéficier largement. Pour amorcer cette réflexion, nous vous proposons quelques pistes à travers des photos commentées.

MORTAISEUSE ARTISANALE, AVEC EXEMPLE D'UN EMPLOI DÉTOURNÉ DE MATÉRIAUX.

Pas de robot.

Pas de soudure.



Figure 9-1 Photos encastrement IPE

### CHOIX D'UN OUTIL UNIQUE

Mise à longueur des troncs et taille de l'assemblage avec un seul outil de coupe. Economie de temps considérable par rapport à une réalisation avec une fraise de défonçage. Exemple d'assemblage 100% bois réalisé entièrement avec une scie.

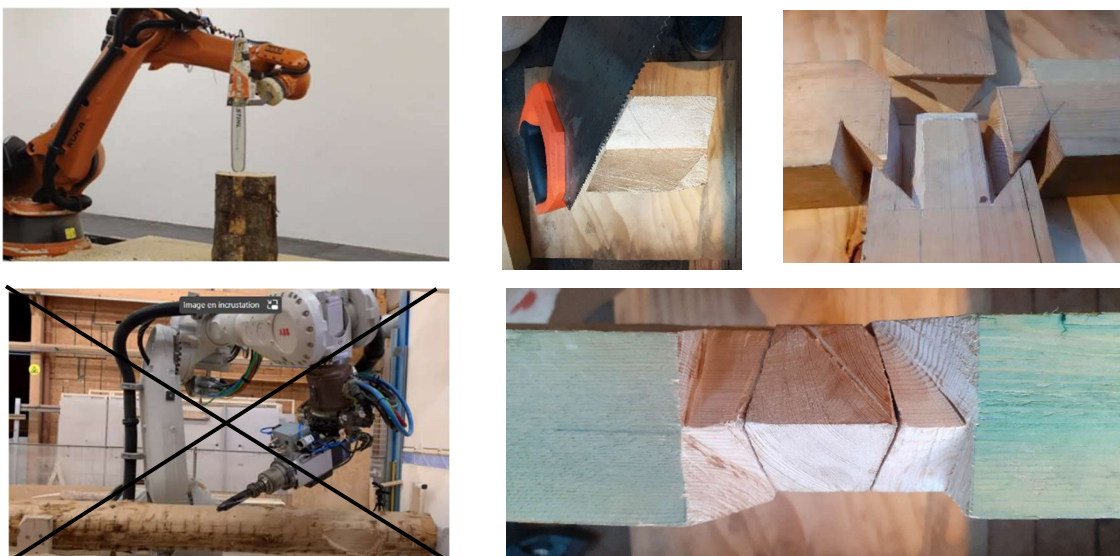


Figure 9-2 Photos d'assemblage taillé avec un seul outil

## EMPLOI DE BROCHES

De simples barres en acier, protégées du feu et insérées sans peine peuvent simplifier les assemblages en reprenant les faibles charges latérales. Exemple d'assemblage réalisé avec un outil de coupe et trois trous de faibles diamètres.



Figure 9-3 photos assemblage avec broche

## USAGE DE TECHNIQUES TRADITIONNELLES

Pas de photogrammétrie.

Repère pour la mise en œuvre et système de classification pour la rectitude des troncs



Figure 9-4 Photos et schéma : gestion des formes organiques des troncs

## BUTTONS EN BÉTON POUR L'ACCUEIL DES PLANCHERS

Appuis ponctuels non sensible au feu et de profondeur réglable pour plancher ou autres éléments.



Figure 9-5 Photos supports plancher et points d'appuis

## ALTERNATIVE À L'EMPLOI DE VIS POUR LE RENFORT DU BOIS DANS SON SENS PERPENDICULAIRE AUX FIBRES

Proposition d'un renfort par l'injection de résine.

Performance à comparer en laboratoire.

INJECTION DE RÉSINE



COUPE AXIAL

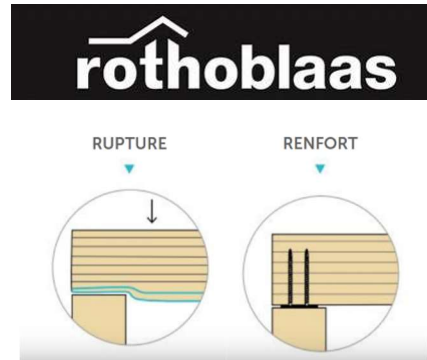
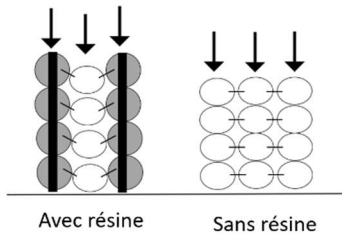


Figure 9-6 Photos renfort par injections de résine

## STANDARDISATION DES SECTIONS POUR CONNECTEUR COMPOSITE

La tronçonneuse et l'usage de gabarit fixé au guide permet une précision appréciable. Voici un exemple parmi d'autres.

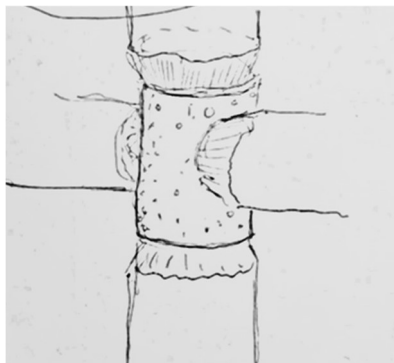


Figure 9-7 Photos tronçonneuse et gabarit

## EXPLOITATION L'EMPATTEMENT ET DU DÉFILEMENT DES ARBRES

Il peut y avoir une différence notable de diamètre. Bénéfice esthétique ou structurel à explorer.



Figure 9-8 empattement et défilement

# Conclusion

## 10 Conclusion

Il a été montré que si nous souhaitons utiliser du bois rond dans un système constructif type poteau poutre, le diamètre limité des grumes contraint le bâtiment à rester sous certaines dimensions. Nous avons donc étudié les assemblages pour permettre d'élargir le potentiel (taille des planchers et nombre d'étages) de la construction en bois rond.

Grâce à une étude théorique des grumes et à la manipulation des règles de calcul des Eurocodes, nous avons pu représenter le domaine architectural possible pour la construction en bois rond. En analysant différents cas de charges standard, nous avons pu déterminer de manière théorique et exhaustive la surface de plancher et le nombre d'étages réalisables en fonction des types d'assemblages.

Les assemblages type bois-bois se sont révélés très peu efficaces. Compte tenu des diamètres de troncs limités, il n'est pas toujours possible de compenser cette inefficacité par l'emploi d'un plus gros bois. Ceci se traduit par le fait que certaines typologies architecturales, même peu ambitieuses, ne sont simplement pas réalisables avec des assemblages bois-bois. Par exemple, pour un cas de charge  $G=3\text{kN/m}^2$  et  $Q=3\text{kN/m}^2$ , une surface de plancher de  $36\text{m}^2$  et un diamètre de tronc de  $55\text{cm}$  (diamètre d'exploitation courant pour les épicéas en futaie régulière), il est seulement possible de réaliser un bâtiment R+1. En revanche, si nous nous autorisons l'emploi d'autres matériaux et réalisons un assemblage type composite il est possible, pour cette même configuration, de construire un bâtiment R+9.

Concernant les problématiques liées au feu, nos résultats ont montré qu'il n'y a pas de contraintes majeures au développement du système constructif en bois rond. En effet nous avons pu démontrer que les conditions pour que le feu ne soit pas dimensionnant sont indépendantes du nombre d'étages ou de la surface de plancher. Par exemple, sous nos pires hypothèses de chargement, nous pouvons ignorer l'effet du feu sur un mode de rupture par flambement en utilisant des troncs d'un diamètre supérieur à  $340\text{mm}$ . Concernant les modes de rupture locales qui peuvent se présenter dans un assemblage, il est plus difficile de tirer des généralités, mais nous savons qu'il est toujours possible de protéger localement et de manière ciblée les zones sensibles des assemblages.

L'exercice de mise en forme, avec des dimensions précises, de quelques solutions d'assemblages nous a montré que les trois modes de rupture, que nous avons identifiés comme dimensionnant pour la colonne, pouvaient effectivement correspondre à différentes propositions techniquement soutenables.

Cet exercice a montré que les troncs, de formes très différentes des bois équarries, demandent des méthodes d'assemblage qui leur sont propre. Ce résultat ouvre des perspectives pour de nouvelles recherches, car il faut maintenant trouver des méthodes qui assurent un bon compromis entre efficacité et économie. Cela signifie qu'il faut prendre en compte d'autres aspects que ceux purement structurels, qui ont été traités dans ce mémoire. Autrement dit, il faut trouver des assemblages pratiques, tout en respectant les contraintes de coût, de performance et de faisabilité.

Il semblerait pertinent de dresser davantage de propositions techniques, d'essayer de les évaluer en termes de coût et de contraintes, de structurer ces données pour avoir une vision globale et pouvoir les comparer, puis d'inviter tous les acteurs impliqués dans un projet de construction pour en discuter.

Distinguer le coût absolu d'un assemblage de sa valeur relative signifie qu'il est nécessaire de considérer l'ensemble du système constructif et l'architecture pour prendre des décisions qui optimisent la valeur globale du projet, au-delà des considérations financières strictes.

# Bibliographie

## 11 Bibliographie

\_Apprendre à programmer avec Python 3. Swinnen, G, Edition Eyrolles (2022).

\_Conception paramétrique avec Rhino et Grasshopper, Couwenbergh, J.-P., & Gallas, M.-A. Edition Eyrolles (2021).

\_Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. Norme européenne, EN 1995-1-1. 2004+A1. Comité européen de normalisation. (2013).

\_Manuel du bois lamellé. Volume 2. Présentation d'un matériau du XXIème siècle Adaptation française du Glulam Handbook SNBL, SWEDISH WOOD, CODIFAB, ACERBOIS (2018).

\_Introduction au béton armé, théorie et application courantes selon l'Eurocode 2. Granju, J.-L. Edition Eyrolles (2012)

\_Normes d'itinéraires sylvicoles: OPBRENGST TABELLEN voor belangrijke boomsoorten in Nederland. IBN rapport nr. 221. Jansen, J.J., Sevenster, J., Faber, P.J. ( 1996).

\_Timber Engineering: STEP 1 - Design - Details and Structural Systems (1st ed.). Blass, H.J., Aune, P., Choo, B.S., Gortlacher, R., Griffiths, D.R., Hilson, B.O., Racher, P., Steck, G. (Eds.). Centrum Hout (1995).

\_Timber Engineering: STEP 2 - Design - Details and Structural Systems (1st ed.). Blass, H.J., Aune, P., Choo, B.S., Gortlacher, R., Griffiths, D.R., Hilson, B.O., Racher, P., Steck, G. (Eds.). Centrum Hout (1995).

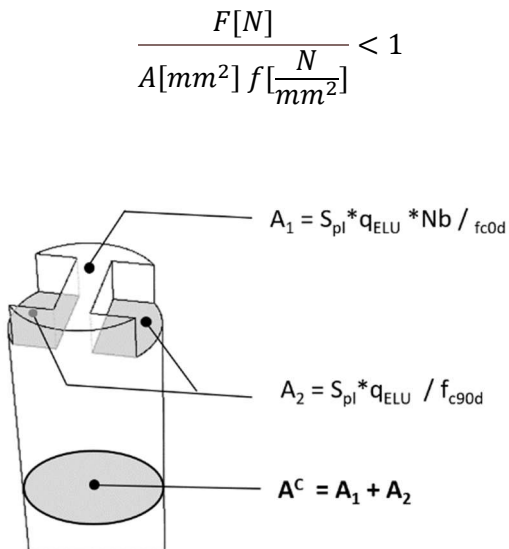
# Annexes

## 12 Annexes

### 12.1 Développements des formules mathématiques utilisées pour les graphiques

#### RUPTURE LOCALE PAR COMPRESSION

Calcul du taux de travail :



$$\frac{F[N]}{A[mm^2] f \left[ \frac{N}{mm^2} \right]} < 1$$

$$A^c = S_{pl} * q_{ELU} * Nb / f_{c0d} + S_{pl} * q_{ELU} / f_{c90d}$$

$$\Leftrightarrow A^c / S_{pl} [-] = \left( \frac{q_{ELU} * Nb}{f_{c0d}} \right) + \left( \frac{q_{ELU}}{f_{c90d}} \right)$$

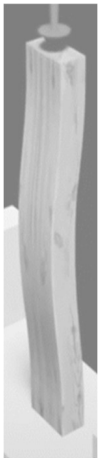
$$\Leftrightarrow \frac{A^c}{S_{pl} * q_{ELU}} = \left( \frac{Nb}{f_{c0d}} \right) + \left( \frac{1}{f_{c90d}} \right)$$

$$\Leftrightarrow \frac{A^c}{S_{pl} * q_{ELU}} - \left( \frac{1}{f_{c90d}} \right) = \left( \frac{Nb}{f_{c0d}} \right)$$

$$Nb = \frac{1}{S_{pl}/A^c} * \frac{f_{c0d}}{q_{ELU}} - \left( \frac{f_{c0d}}{f_{c90d}} \right)$$

#### Rupture globale par flambement

Calcul du taux de travail :



$$\frac{(Nb+1) * S_{pl} * q_{ELU}}{A^c * f_{c0d} * kc} < 1$$

$$Nb+1 < \frac{A^c * f_{c0d} * kc}{S_{pl} * q_{ELU}}$$

$$Nb < \frac{1}{S_{pl}/A} * \frac{f_{c0d} * kc}{q_{ELU}} - 1$$

## RUPTURE GLOBALE PAR FLEXION COMPOSÉE

La formule pour le taux de travail en flexion composée somme le taux de travail due à la flexion avec celui due au flambement

$$\frac{\sigma_m}{f_{md}} + \frac{\sigma_c}{k_c * f_{c0d}} < 1$$

Développons un terme à la fois

$$\frac{\sigma_m}{f_{md}} = \frac{M}{\left(\frac{I}{D}\right) * f_{md}} = \frac{e_R * (R_{p1} + R_{p2})}{\left(\frac{A^2}{\frac{4\pi}{D}}\right) * f_{md}} = \frac{e_R * (R_{p1} + R_{p2}) * D * 2\pi}{A^2 * f_{md}} = \frac{e_R * (R_{p1} + R_{p2}) * \sqrt{\frac{4A}{\pi}} * 2\pi}{A^2 * f_{md}} = \frac{e_R * (R_{p1} + R_{p2}) * 4 * \sqrt{\pi}}{A^{3/2} * f_{md}}$$

On développe séparément le terme  $e_R (R_{p1} + R_{p2}) =$

$$e_R = e * \frac{(R_{p2} - R_{p1})}{(R_{p2} + R_{p1})} = e * \frac{(S_{pl} * q_{ELU} - S_{pl} * G)}{(S_{pl} * q_{ELU} + S_{pl} * G)} = e * \frac{(q_{ELU} - G)}{(q_{ELU} + G)} \quad \leftarrow \text{Par équilibre des moments}$$

$$e_R = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} * \frac{(q_{ELU} - G)}{(q_{ELU} + G)} = 2 * \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}} * \frac{(q_{ELU} - G)}{(q_{ELU} + G)} \quad \leftarrow \text{Si on choisit « e » = D}$$

$$R_{p1} + R_{p2} = \frac{S_{pl}}{2} * G + \frac{S_{pl}}{2} * (q_{ELU}) = \frac{S_{pl}}{2} * (G + q_{ELU})$$

$$e_R (R_{p1} + R_{p2}) = \frac{\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}} * \frac{(q_{ELU} - G)}{(q_{ELU} + G)} * S_{pl} * (G + q_{ELU})$$

En remettant dans l'équation de départ ce que nous venons de trouver.

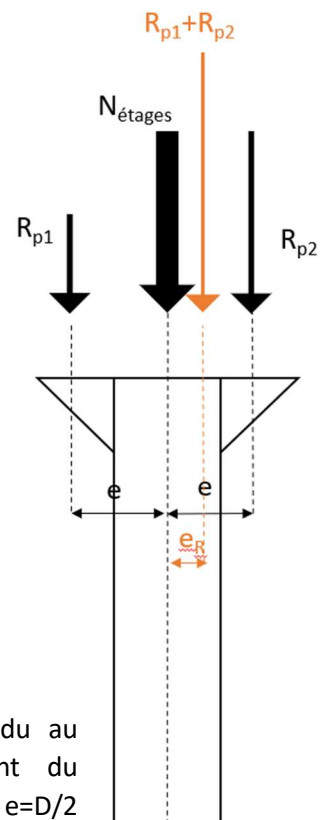
$$\frac{\sigma_m}{f_{md}} = \frac{\frac{\sqrt{A}}{\sqrt{\pi}} * \frac{(q_{ELU} - G)}{(q_{ELU} + G)} * S_{pl} * (G + q_{ELU}) * 4 * \sqrt{\pi}}{A^{3/2} * f_{md}} = \frac{S_{pl} * (q_{ELU} - G) * 4}{A * f_{md}}$$

$$\frac{\sigma_m}{f_{md}} = \frac{S_{pl}}{A} \frac{(q_{ELU} - G) * 4}{f_{md}}$$

$$\frac{\sigma_c}{k_c * f_{c0d}} = \frac{S_{pl}}{A} \frac{(Nb + 1) q_{ELU}}{k_c * f_{c0d}}$$

Comme attendu, le taux de travail du au moment fléchissant est indépendant du nombre d'étages. Notons que si on veut  $e = D/2$  il suffit de multiplier ce terme par 0.5

Pour  $N_b = 0$  on retrouve bien la charge d'une seule dalle de toiture de surface  $S_{pl}$ .



Maintenant que nous avons développé séparément les deux termes de notre équation nous pouvons reprendre la formule pour un taux de travail égal à un et essayé d'isoler Nb

$$\frac{\sigma m}{fmd} + \frac{\sigma c}{kc * fc0d} = 1$$

$$\frac{S_{pl}}{A} \frac{(q_{FLU}-G)*4}{fmd} + \frac{S_{pl}}{A} \frac{(Nb+1)qELU}{kc*fc0d} = 1$$

$$\frac{1}{Spl/A} - \frac{(q_{FLU}-G)*4}{fmd} = \frac{(Nb+1)qELU}{kc*fc0d}$$

$$Nb = \left( \frac{1}{Spl/A} - \frac{(q_{FLU}-G)*4}{fmd} \right) * \frac{kc fc0d}{qELU} - 1$$

## 12.2 Python : graphique adimensionnel + exigence diamètre pour tenue au feu

```
from math import pi
import matplotlib.pyplot as plt

# défavorable ou favorable. Cette notation facilite les calculs pour la suite.

# Il est plus facile d'écrire l'élanement (lambda) : lmbd_fav=(lf_fav*(A_fav/l_fav)**0.5)
# Que de l'écrire : lmbdmin=(lfmin*(Amax/lmax)**0.5)
# Dans ce dernier cas on ne sait pas dire facilement si réduire la valeur numérique est favorable ou
non!
#####
# Variables
#####

fc0k_def=21 #21N/mm² C24
fc0k_fav=23 #23 N/mm² D30

fc90k_def=2.5 #2.2 N/mm² C18
fc90k_fav=8 #8 N/mm² D30

fmk_def=24
fmk_fav=30

E0k_def = 7400
E0k_fav=9200

lf_def= 4000 #4000mm
lf_fav=3000 #3000mm

G_def=3 #3 plancher Tronc dalle béton
G_fav=0.54 #0.54 plancher classique

q_def=3 # 3kN/m² B bureaux
q_fav=2 # 2kN/m² A Logement

D_def=350 # valeur choisie pour fixer kc_def
D_fav=600 #600mm Diamètre max

Spl_def=57 # 57m²
Spl_fav=20 #16m²

#####

fc0d_def= fc0k_def * 0.8 / 1.3
fc0d_fav= fc0k_fav * 0.8 / 1.3

fc90d_def = fc90k_def * 0.8 / 1.3
fc90d_fav = fc90k_fav * 0.8 / 1.3

fmd_def = fmk_def * 0.8 / 1.3
fmd_fav = fmk_fav * 0.8 / 1.3

A_def=pi*D_def**2/4
A_fav=pi*D_fav**2/4

qELU_def=1.35*G_def+1.5*q_def
qELU_fav=1.35*G_fav+1.5*q_fav

I_def=pi*D_def**4/64
```

```

l_fav=pi*D_fav**4/64

qELU_def=1.35*G_def+1.5*q_def
qELU_int=1.35*G_def+1.5*q_fav
qELU_fav=1.35*G_fav+1.5*q_fav

print("qELU_def =", round(qELU_def,1))
print("qELU_int =", round(qELU_int,1))
print("qELU_fav =", round(qELU_fav,1))

#####

lmbd_def=(lf_def*(A_def/l_def)**0.5)
lmbd_fav=(lf_fav*(A_fav/l_fav)**0.5)

lmbdE_def=pi * (E0k_def / fc0k_def)**0.5
lmbdE_fav=pi * (E0k_fav / fc0k_fav)**0.5

lmbdrel_def = (lmbd_def / lmbdE_def)
lmbdrel_fav = (lmbd_fav / lmbdE_fav)

k_def = (0.5 * (1 + 0.2 * (lmbdrel_def - 0.3) + lmbdrel_def**2))
k_fav = (0.5 * (1 + 0.2 * (lmbdrel_fav - 0.3) + lmbdrel_fav**2))

kc_def = round((1 / (k_def + (k_def**2 - lmbdrel_def**2)**0.5)), 3)
kc_fav = round((1 / (k_fav + (k_fav**2 - lmbdrel_fav**2)**0.5)), 3)
kc_int=kc_fav

print("kc_def",kc_def)
print("kc_int",kc_int)
print("kc_fav",kc_fav)

#####

SA=list(range( int(Spl_fav*1e6/A_fav) , int(Spl_def*1e6/A_def) ) ) #Plage de valeurs plausibles 100-250

#####
# Compression
#####

Nbcomp_def=[]
Nbcomp_int=[]
Nbcomp_fav=[]#Nb d'étage (Nb) en fonction du critère de compression (comp) avec la colonne qui reçoit deux poutres (2P)
for i in SA:
    Nbcomp_def.append(fc0d_def/(i*(qELU_def/1e3))-fc0d_def/fc90d_def)#
    Nbcomp_int.append(fc0d_def/(i*(qELU_int/1e3))-fc0d_def/fc90d_def)#
    Nbcomp_fav.append(fc0d_fav/(i*(qELU_fav/1e3))-fc0d_fav/fc90d_fav)#

#####
# Flambement
#####

Nbkc_def=[]
Nbkc_int=[]

```

```

Nbkc_fav=[]
for i in SA:
    Nbkc_def.append((1/i)*(kc_def*fc0d_def/(qELU_def/1e3))-1)
    Nbkc_int.append((1/i)*(kc_fav*fc0d_def/(qELU_int/1e3))-1)
    Nbkc_fav.append((1/i)*(kc_fav*fc0d_fav/(qELU_fav/1e3))-1)

#####
# Flexion composée
#####

Nbflexcomp_def=[]
Nbflexcomp_int=[]
Nbflexcomp_fav=[]

for i in SA:
    fD=1 # "e"=fD*D C'est facteur pour exprimer l'excentricité de l'appuis des poutres. Si fD=1 la
    réaction d'appuis des poutres se retrouvent à une distance D du centre. Si ça vaut zéro, il y a juste du
    flambement.
    Nbflexcomp_def.append( ((1/i)-((qELU_def-G_def)/1e3)*4*fD/fmd_def) *
    (kc_def*fc0d_def/(qELU_def/1e3)) -1 )
    Nbflexcomp_int.append( ((1/i)-((qELU_int-G_def)/1e3)*4*fD/fmd_def) *
    (kc_fav*fc0d_def/(qELU_int/1e3)) -1 )
    Nbflexcomp_fav.append( ((1/i)-((qELU_fav-G_fav)/1e3)*4*fD/fmd_fav) *
    (kc_fav*fc0d_fav/(qELU_fav/1e3)) -1 )

#####
# Graph
#####

plt.xlabel('Spl / AC [-]')
plt.ylabel("Nb étages possible [-]")

plt.plot(SA,Nbcomp_def,color='brown')#, label="Compression "
# plt.plot(SA,Nbcomp_int,linestyle="--",color='brown')#, label="Compression int "
# plt.plot(SA,Nbcomp_fav,linestyle=":",color='brown')#, label="Compression"

plt.plot(SA,Nbkc_def,color='black')#, label="flambement kc={:.2f}".format(kc_def)
# plt.plot(SA,Nbkc_int,linestyle="--",color='black')#, label="flambement kc={:.2f}".format(kc_def)
# plt.plot(SA,Nbkc_fav,linestyle=":",color='black')#, label="flambement kc={:.2f}".format(kc_fav)

plt.plot(SA,Nbflexcomp_def,color="#00BFFF")#"#007FFF" ou #00BFFF ou cyan#, label="Flex-
Composée "
# plt.plot(SA,Nbflexcomp_int,linestyle="--",color="#00BFFF")#, label="Flex-Composée "
# plt.plot(SA,Nbflexcomp_fav,linestyle=":",color="#00BFFF")#, label="Flex-Composée"

#plt.xlim(SA[0]-10,SA[-1])
plt.xlim(SA[0]-10,350)
plt.ylim(0,15)
plt.legend(loc='best')
plt.title("Nb d'étages possible en fonction du rapport Spl/AC\n Spl = Surface plancher AC = Aire de la
Colonne ")
plt.grid()
plt.show()

#####
# CALCUL FEU : Dmin Flambement
#####
beta_n =0.8 #0.8 Résineux ou 0.55 D30 (ro_k > 450kG/m³)

```

```

treq=120 # 60 ou 120
d_ef=treq*beta_n+7
psy1=0.5 #0.5 habitations bureaux
gamaM=1.3
kfi=1.25
Kmod=0.8
qACC=G_def+psy1*q_def# changer valeur pour cas def int ou fav
m=(qELU_int*gamaM*kfi)/(qACC*Kmod)

def fctkc(DC,LC):
    AC = pi * DC**2 / 4
    Ic = pi * DC**4 / 64
    lmbd = (LC * (AC / Ic)**0.5)
    lmbdE = (pi * (7400 / 21)**0.5)###C24 E0K=7400 et fc0k = 21 pour D30 E0K=9200 et fc0k = 23
    lmbdrel = (lmbd / lmbdE)
    k = (0.5 * (1 + 0.2 * (lmbdrel - 0.3) + lmbdrel**2))
    kc = round((1 / (k + (k**2 - lmbdrel**2)**0.5)), 3)
    if lmbdrel<0.3:
        kc=1
    return kc

D=600
Valeur=1
#d_ef=49 # R60 : d_ef=49 et R120: d_ef=91
while m > Valeur:
    Valeur=D**2*fctkc(D,4000)/((D-2*d_ef)**2*fctkc(D-2*d_ef,4000))
    D-=1

print("qACC=",qACC)
print("d_ef=",d_ef)
print("Dmin pour satisfaire au feu = ",D)

```

### 12.3 Python : graphique tenue au feu des assemblages bois-bois

```

#####
# CALCUL FEU : Exigence facteur X sur A1 (surface colonne colonne)
#####

from math import pi
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

qELU=0.00855 #cas intermédiaire
qACC=0.0045 #cas intermédiaire
Kfi=1.25
Kmod=0.8
gamaM=1.3
fc90d=2.5*Kmod/gamaM
m=(qELU*Kfi*gamaM)/(qACC*Kmod)

Spl = np.arange(9, 64.1, 0.1)
#Spl=list(range(9 , 64 ))
print(len(Spl))
D=list(range(200,600))

Spl, D = np.meshgrid(Spl, D)
d_ef=55

def calculXA1(Spl,D):

```

```

t1=(m-1)/m
t2=(pi*D**2/4 - Spl*1e6*qELU/fc90d)
t3=1/(pi*D**2/4-pi*(D-2*d_ef)**2/4)
#t3=1/(pi*D*d_ef)
X=t1*t2*t3

return X

# calcul de D pour chaque combinaison de d et L
X = calculXA1(Spl, D)

# limiter les valeurs de X à la plage [0,1]
X = np.clip(X, -0.1, 1.1)

# plot contour 2D
plt.contourf(Spl, D, X, cmap='coolwarm_r')#viridis'
plt.colorbar()
plt.xlabel('Spl')
plt.ylabel('D')
plt.title('Exigence A1 (col-col): Pour Spl et D donné, \nX doit etre plus petit que...')

plt.contour(Spl, D, X, levels=[0], colors='black')
plt.contour(Spl, D, X, levels=[1], colors='black')
# définir la plage de valeurs x à afficher
#plt.xlim([min(Spl), max(Spl)])

plt.show()
#####
# CALCUL FEU : Exigence facteur X sur A2 (surface poutres colonne)
#####

from math import pi
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

qELU = 0.00855
qACC = 0.0045
Kfi = 1.25
Kmod = 0.8
gamaM = 1.3
fc90d = 2.2 * Kmod / gamaM
m = (qELU * Kfi * gamaM) / (qACC * Kmod)

Spl = np.arange(9, 64.1, 0.1)#.tolist()
#Spl = list(range(9, 64))
print(len(Spl))
D = list(range(200, 600))

Spl, D = np.meshgrid(Spl, D)
d_ef = 55

def calculXA1(Spl, D):
    #X = (((1 - m) * Spl*1e6 * qELU) / (m * pi * D * d_ef * fc90d)) + 1
    X = (((1 - m) * Spl*1e6 * qELU) / (m * (pi*D**2/4-pi*(D-2*d_ef)**2/4) * fc90d)) + 1
    return X

# calcul de D pour chaque combinaison de d et L
X = calculXA1(Spl, D)

```

```
# limiter les valeurs de X à la plage [0,1]
X = np.clip(X, -0.1, 1.1)

# plot contour 2D
plt.contourf(Spl, D, X, cmap='coolwarm') #viridis_r utiliser cmap='viridis_r' pour inverser l'échelle de
couleurs
plt.colorbar()
plt.xlabel('Spl[m²]')
plt.ylabel('D[mm]')
plt.title('Exigence A2 (repos-tenon): Pour Spl et D donné, \nX doit etre plus grand que...')
plt.contour(Spl, D, X, levels=[0], colors='black')
plt.show()
```

