

---

# PROJET DE MASTER

## Conception et dimensionnement durable : Étude comparative et conception multi-matériaux

---

Flavien Dumont

Sous la supervision de :

Prof. Alain Nussbaumer & François-Joseph Contat



23 juin 2023





## Remerciements

Il me serait difficile d'adresser mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont assisté tout au long de cette étude tant elles sont nombreuses. Néanmoins certaines d'entre elles ont joué un rôle prépondérant dans l'encadrement de mes recherches et la transmission d'informations pertinentes.

Premièrement, je souhaite remercier Monsieur Alain Nussbaumer, Professeur à l'EPFL, pour la proposition de ce sujet et dont le suivi et la supervision m'ont permis d'atteindre mes objectifs.

Deuxièmement, je souhaite remercier chaleureusement Monsieur François-Joseph Contat, ingénieur structure chez Losinger-Marazzi, pour son soutien indéfectible tout au long du travail, pour l'encadrement bienveillant et pour sa patience infinie. Merci de m'avoir poussé à aller au delà des objectifs initialement prévus.

Ensuite, je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à tous les membres de l'entreprise Losinger-Marazzi qui ont patiemment répondu à mes nombreuses questions. Je souhaite remercier ici Mesdames Ines Altelarrea, Caroline De Souza et Diane Thuaire, et Messieurs Guillaume Bazin, Michaël Lozano, Alexandre Millet, Vincent Payet et Pascal Robert. Finalement j'adresserai un merci tout particulier à Monsieur Didier Bourqui pour son soutien et sa confiance, et pour m'avoir permis d'utiliser les réflexions et résultats de cette étude au profit de projets en cours chez Losinger-Marazzi.

Finalement, je tiens à remercier Madame Caroline Roulin Dumont pour la relecture attentive de ce travail.





FIGURE 2 – Bâtiment administratif du quartier OASSIS



# Abstract

Les émissions de CO<sub>2</sub> émises par le secteur de la construction représentent 11% des émissions globales de l'humanité (2019). En raison de l'urgence climatique, il est nécessaire de les réduire. Dans ce contexte et selon les conclusions données par la pré-étude, les dalles en béton armé contribuent en majeure partie à alourdir le bilan CO<sub>2</sub> d'un ouvrage.

Ainsi, cette étude consiste en une étude comparative de différentes alternatives aux dalles en béton armé. Ces alternatives prennent en compte les critères de résistance, de déformation et de vibration, mais également les exigences acoustiques et de régulation de température. Cette approche holistique permet d'anticiper des aspects ultérieurs du processus de conception, et ainsi d'obtenir une prévision globale des émissions de CO<sub>2</sub> et des coûts.

Cette étude portant sur un bâtiment à géométrie complexe, ses dimensions et résultats lui sont propres. Les critères de dimensionnement et les exigences sont tirés des normes de construction suisses, des Eurocodes et des documents techniques usuels. Le dimensionnement des différentes variantes a été réalisé en appliquant les formules de dimensionnement des normes ou à la suite d'une modélisation sur le logiciel SCIA Engineer. Un métré a ensuite été réalisé et il a été possible d'en calculer les émissions de CO<sub>2</sub> (facteurs d'émissions tirés du document de la KBOB) et d'en estimer les coûts.

Il existe des systèmes de plancher intrinsèquement plus économes qu'une dalle en béton armé si l'on ne considère que l'aspect structurel, mais ces derniers sont vite limités par les contraintes acoustiques, les exigences vibratoires et les systèmes de régulation de température. Ces derniers critères imposent une surcharge importante et ainsi la nécessité d'avoir une structure porteuse plus robuste. Ces implications sont si importantes qu'il n'est plus possible de trouver une variante de plancher significativement meilleure que la solution en béton armé tant la réduction des émissions est éclipsée par la forte hausse des coûts. Cependant, au global, le passage à un système léger engendre des gains écologiques (-11%) et financiers (-3%) notamment grâce à la réduction des efforts dans les porteurs verticaux et dans les fondations, et à la réduction des efforts sismiques. Pour le bâtiment en entier, il est possible de réduire les émissions de 29.3% au prix d'une hausse des coûts de 40.2%.

Ces résultats sont très dépendants des facteurs d'émissions de la KBOB. Ceux-ci étant réévalués régulièrement et manquant de transparence sur les hypothèses faites, les résultats obtenus pourraient être amenés à changer lors des prochaines années.



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>3</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Abréviations Définitions</b>	<b>15</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>17</b>
1.1 Contexte . . . . .	17
1.2 Rappel de la pré-étude . . . . .	18
1.3 Objectif et structure du rapport . . . . .	19
1.4 Normes et documents techniques . . . . .	21
1.5 Logiciels utilisés . . . . .	22
<b>I Règles de conception</b>	<b>23</b>
<b>2 Règles de conception</b>	<b>23</b>
2.1 Résistance à l'incendie . . . . .	23
2.2 Exigences liées à la physique du bâtiment . . . . .	24
2.3 Exigences liées aux CEA . . . . .	25
2.4 Exigences liées à l'intégration des techniques . . . . .	25
2.5 Exigences liées à la hauteur statique . . . . .	26
2.6 Calcul des émissions et des coûts . . . . .	26
2.6.1 Émissions . . . . .	27
2.6.2 Coûts . . . . .	28
2.7 Compilation des contraintes . . . . .	28
<b>II Étude de variantes</b>	<b>31</b>
<b>3 Conception des variantes :</b>	
<b>Étude de trame type régulière</b>	<b>31</b>
3.1 Outils . . . . .	31
3.1.1 Fonctionnement des outils : exemple de la variante CLT . . . . .	32
3.2 Hypothèses . . . . .	33
3.3 Processus . . . . .	33
3.4 Typologies de plancher . . . . .	34
3.4.1 Bois-béton mixte sans armatures : . . . . .	34
3.4.2 Bois-béton mixte avec armatures : . . . . .	35
3.4.3 Acier béton mixte traditionnel . . . . .	36
3.4.4 Acier béton mixte traditionnel : . . . . .	37
3.4.5 Acier béton mixte déconnecté : . . . . .	38
3.4.6 Bois caisson : . . . . .	39
3.4.7 Bois solive : . . . . .	40
3.4.8 Dalle en CLT (Bois lamellé-croisé) : . . . . .	41
3.5 Comparaison . . . . .	42

3.6	Choix . . . . .	43
<b>4</b>	<b>Conception des variantes :</b>	
	<b>Étude d'un étage type</b>	<b>46</b>
4.1	Hypothèses . . . . .	47
4.2	Variante CLT orthotrope . . . . .	48
	4.2.1 Méthode constructive . . . . .	51
4.3	CLT isotrope . . . . .	52
	4.3.1 Méthode constructive . . . . .	55
4.4	Variante acier-béton mixte . . . . .	56
	4.4.1 Méthode constructive . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Comparaison entre les variantes</b>	<b>60</b>
5.1	Comparaison CO <sub>2</sub> . . . . .	60
5.2	Comparaison coûts . . . . .	61
5.3	Synthèse de la comparaison . . . . .	62
5.4	Processus analytique . . . . .	63
	5.4.1 Critères considérés . . . . .	63
	5.4.2 Analyse multicritères hiérarchique . . . . .	64
	5.4.3 Critères appel d'offre . . . . .	66
5.5	Conclusion et choix . . . . .	68
<b>III</b>	<b>Approfondissement de la variante CLT isotrope</b>	<b>71</b>
<b>6</b>	<b>Dimensionnement</b>	<b>71</b>
6.1	Concept de reprise des efforts sismiques . . . . .	71
6.2	Concept de descente de charge . . . . .	73
<b>7</b>	<b>Performances de la variante CLT</b>	<b>74</b>
7.1	Performances CO <sub>2</sub> . . . . .	75
7.2	Performances coûts . . . . .	76
<b>8</b>	<b>Analyse de sensibilité</b>	<b>79</b>
8.1	Exigences acoustiques . . . . .	79
8.2	Charge utile . . . . .	80
8.3	Charge utile et exigences acoustiques . . . . .	80
8.4	Compilation des résultats . . . . .	81
<b>9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>83</b>
9.1	Critique KBOB . . . . .	83
9.2	Études complémentaires . . . . .	85
<b>10</b>	<b>Annexes/Notes de calculs</b>	<b>88</b>
A	Prédimensionnement trame régulière . . . . .	88
B	Variante CLT orthotrope . . . . .	110
	B.1 Charges . . . . .	110
	B.2 Combinaisons . . . . .	110
	B.3 Déformations . . . . .	110
	B.4 Efforts . . . . .	111



---

C	Variante CLT isotrope . . . . .	112
C.1	Charges . . . . .	112
C.2	Combinaisons . . . . .	112
C.3	Déformations . . . . .	112
C.4	Efforts . . . . .	113
D	Variante acier-béton mixte . . . . .	115
D.1	Charges . . . . .	115
D.2	Combinaisons . . . . .	115
D.3	Déformations . . . . .	116
D.4	Efforts . . . . .	117
E	Variante finale . . . . .	118
E.1	Charges . . . . .	118
E.2	Combinaisons . . . . .	118
E.3	Déformations . . . . .	119
E.4	Efforts . . . . .	120
E.5	Murs sismiques . . . . .	124
E.6	Fondations . . . . .	136



## Liste des tableaux

1	Émissions par variantes . . . . .	60
2	Coûts par variantes . . . . .	61
3	Exemple de matrice de comparaison . . . . .	64
4	Explication des importances . . . . .	65

## Table des figures

2	Bâtiment administratif du quartier OASSIS . . . . .	5
3	Plan du quartier OASSIS . . . . .	17
4	Répartition des émissions par élément et par matériaux (gros-oeuvre uniquement) . . . . .	18
5	Répartition des émissions par étage (gros-oeuvre uniquement) . . . . .	19
6	Interaction des différentes exigences . . . . .	29
7	Schéma du fonctionnement de l'outil . . . . .	32
8	Bois-béton mixte : élastique . . . . .	34
9	Bois béton mixte : plastique . . . . .	35
10	Plancher bois béton mixte . . . . .	35
11	Acier-béton mixte : traditionnel . . . . .	36
12	Acier-béton mixte : traditionnel XCarb . . . . .	37
13	Acier-béton mixte : tôles et solives déconnectées . . . . .	38
14	Bois caisson . . . . .	39
15	Bois solives . . . . .	40
16	CLT . . . . .	41
17	Émissions de CO <sub>2</sub> par m <sup>2</sup> par variante . . . . .	42
18	Coûts par m <sup>2</sup> par variante . . . . .	42
19	Comparaison émissions/prix . . . . .	43
20	Comparaison directe émissions/coûts . . . . .	44
21	Plan de l'étage type de la variante béton armé . . . . .	46
22	Exemple de faux plafond rayonnant . . . . .	48
23	Plan : CLT orthotrope . . . . .	49
24	Coupe type : CLT orthotrope . . . . .	50
25	Connexion poteau-dalle : CLT orthotrope . . . . .	50
26	Détails : CLT orthotrope . . . . .	51
27	Exemple de plafond technologie TS3 : Brunnen 2021 . . . . .	52
28	Plan d'étage : CLT isotrope . . . . .	53
29	Coupe type : CLT isotrope . . . . .	54
30	Connexion poteau-dalle : CLT isotrope . . . . .	54
31	Connexion mur-dalle : CLT isotrope . . . . .	55
32	Exemple de plancher mixte usuel . . . . .	56
33	Plan : ABM . . . . .	57
34	Coupe type : ABM . . . . .	58
35	Détails : ABM . . . . .	58
36	Comparaison des émissions de CO <sub>2</sub> . . . . .	60
37	Comparaison des coûts . . . . .	61
38	Comparaison émissions/prix . . . . .	62

39	Relation émissions/prix . . . . .	62
40	Arbre décisionnel : critères analyse hiérarchique . . . . .	66
41	Arbre décisionnel : critères appel d'offre . . . . .	67
42	Tableau multi-critères . . . . .	68
43	Notes : critères analyse hiérarchique . . . . .	68
44	Notes : critères appel d'offre . . . . .	69
45	Schéma du processus . . . . .	70
46	Concepts de reprise des efforts sismiques . . . . .	72
47	Émissions de CO <sub>2</sub> par élément de construction . . . . .	75
48	Émissions de CO <sub>2</sub> par élément de construction et totales . . . . .	75
49	Prix par élément de construction . . . . .	76
50	Prix par élément de construction et totaux . . . . .	76
51	Variation des émissions de CO <sub>2</sub> . . . . .	81
52	Variation des coûts . . . . .	82
53	Facteurs d'émissions du CLT par fournisseur (ACV phase A1-A3) (ARUP 2021) . . . . .	84
54	Mixe énergétique européen (International Energy Agency) . . . . .	84
55	Déformations : CLT orthotrope . . . . .	110
56	Contraintes de flexion : sens porteur : CLT orthotrope . . . . .	111
57	Contrainte cisailante max : CLT orthotrope . . . . .	111
58	Déformations : CLT orthotrope . . . . .	112
59	Contraintes de flexion : sens porteur : CLT isotrope . . . . .	113
60	Contraintes de flexion : sens perpendiculaire au sens porteur : CLT isotrope . . . . .	114
61	Contrainte cisailante max : CLT isotrope . . . . .	115
62	Déformations : Acier-béton mixte . . . . .	116
63	Moment axe fort : Acier-béton mixte . . . . .	117
64	Moment axe faible : Acier-béton mixte . . . . .	118
65	R+2 : Déformations . . . . .	119
66	R+2 : $\sigma_x^+$ . . . . .	120
67	R+2 : $\sigma_x^-$ . . . . .	121
68	R+2 : $\sigma_y^+$ . . . . .	122
69	R+2 : $\sigma_y^-$ . . . . .	123
70	R+2 : $\tau_{max,b}$ . . . . .	124
71	Murs sismiques longs : N . . . . .	125
72	Murs sismiques longs : V . . . . .	126
73	Murs sismiques longs : M . . . . .	127
74	Murs sismiques courts : N . . . . .	128
75	Murs sismiques courts : V . . . . .	129
76	Murs sismiques courts : M . . . . .	130
77	Réactions d'appuis ponctuelles . . . . .	136
78	Réactions d'appuis linéaires . . . . .	143

## Abréviations & Définitions

- CLT : Cross-Laminated Timber : Bois lamellé croisé
- BLC : Bois Lamellé Collé
- ABM : Acier-Béton Mixte
- KBOB : Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren / Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics



# 1 Introduction

Le dimensionnement durable d'un ouvrage de génie civil consiste à optimiser sa performance tout au long de son cycle de vie, en prenant en compte les impacts environnementaux, économiques et sociaux associés à sa construction, à son utilisation et à sa démolition. Cette démarche vise à assurer la pérennité de l'ouvrage tout en minimisant son empreinte carbone et en maximisant son efficacité énergétique.

Le dimensionnement durable est devenu un enjeu de premier plan dans le domaine de la construction, compte tenu de la pression croissante exercée sur les ressources naturelles et de l'urgence de lutter contre le changement climatique. Ainsi, il est devenu impératif de concevoir des ouvrages qui répondent aux exigences de développement durable et qui sont capables de s'adapter aux changements futurs.

## 1.1 Contexte

Le produit phare de l'entreprise Losinger-Marazzi est le quartier résidentiel avec usage commercial et administratif compris. Dans le contexte de poursuite des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, Losinger-Marazzi s'engage à réduire ses émissions d'équivalent de CO<sup>2</sup> de 30%. Dans ce contexte, entre 2016 et 2020 le quartier OASSIS à Crissier a été érigé. Celui-ci se compose de 7 bâtiments : 6 résidentiels et commerciaux et 1 administratif (cf. fig. 3).



FIGURE 3 – Plan du quartier OASSIS

C'est le bâtiment administratif (voir figure 2), à l'est du quartier, qui a fait l'objet de cette étude. Celui-ci accueille notamment les bureaux de Losinger-Marazzi ainsi que de l'entreprise Patrimonium, maître d'ouvrage du projet.

## 1.2 Rappel de la pré-étude

Ce travail est réalisé en deux parties :

### 1. Une pré-étude :

Durant le semestre d'automne 2022, une étude préliminaire a été réalisée dans le but de se familiariser avec le bâtiment étudié ainsi qu'avec les outils nécessaires à ce travail. Durant cette pré-étude, un métré complet de la structure porteuse du bâtiment UAD a été réalisé. De ce métré, il a été possible de dériver le bilan CO<sub>2</sub> de la structure porteuse dont les conclusions seront exposées ci-après.

### 2. Le projet de master :

Durant le semestre de printemps 2023, les résultats de cette pré-étude ont été utilisés comme pistes pour la présente étude de variantes.

La pré-étude a démontré les conclusions suivantes :

1. Les émissions de CO<sub>2</sub> sont concentrées dans les éléments en béton armé (95% des émissions),

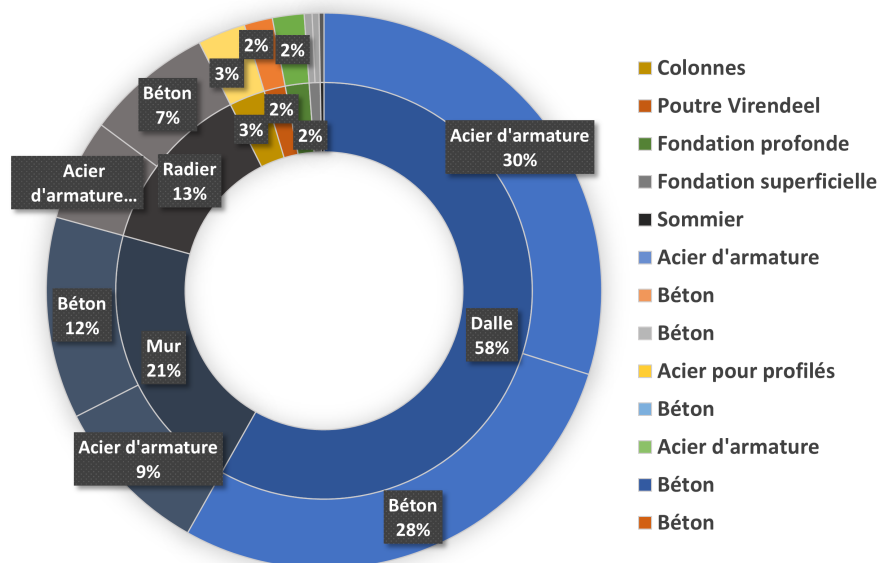


FIGURE 4 – Répartition des émissions par élément et par matériaux (gros-oeuvre uniquement)

2. Elles sont plus importantes dans le système de plancher (58% des émissions),
3. Le matériau des éléments contre terre ne pouvant pas être modifié, la piste principale pour l'étude de variantes est le changement du système de plancher des étages par un système plus économe en émissions de CO<sub>2</sub> et plus léger.



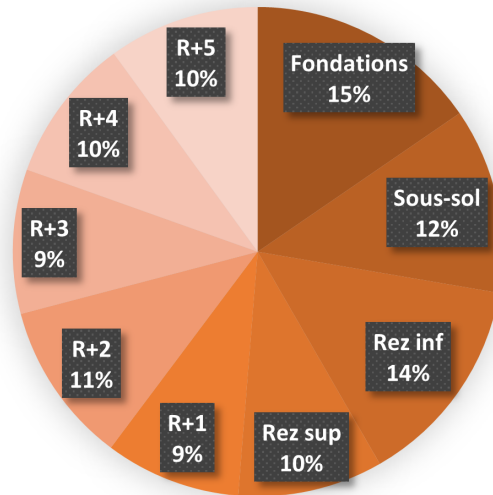


FIGURE 5 – Répartition des émissions par étage (gros-oeuvre uniquement)

4. Il est possible d'avoir une influence directe sur les émissions des étages supérieurs (59%) en adoptant un plancher intrinsèquement plus économe en CO<sub>2</sub>,
5. Il est possible d'avoir une influence indirecte sur les émissions des étages inférieurs (41%) et de la conception sismique en adoptant un plancher plus léger.

Toutes ces pistes seront implémentées dans les différentes variantes étudiées dans le cadre de ce travail.

### 1.3 Objectif et structure du rapport

Le but de ce travail de Master est de quantifier les économies en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> liées à la construction d'un ouvrage. Pour ce faire, ce travail est structuré par ampleur croissante et nombre de variantes étudiées décroissante de la manière suivante :

#### 1. Partie I : Règles de conception :

Cette partie consiste en une compilation des différents points de vue et préoccupations concernant la structure et les différents éléments du plancher. Cette étape est primordiale afin de faire les bons choix dans l'élaboration des variantes.

#### 2. Partie II : Étude de variantes :

Cette partie consiste en l'étude des différents types de plancher par lesquels il serait possible de remplacer la dalle en béton. L'objectif final de cette partie est de pouvoir sélectionner une variante prometteuse. Cette partie comporte deux niveaux de détails distincts :

- Une étude sur une trame régulière afin de pouvoir rapidement éliminer les variantes peu performantes.
- Une étude sur un étage type afin de pouvoir confronter les variantes sélectionnées à la géométrie de l'étage étudié.

#### 3. Partie III : Approfondissement de la variante sélectionnée :

Cette partie consiste en le dimensionnement du bâtiment dans sa globalité

en intégrant le concept structural résultant de l'étude de variantes. L'aspect global du bâtiment permet de quantifier l'impact du changement du système de plancher sur les éléments porteurs (piliers, murs et fondations) et a posteriori les variations des émissions de CO<sub>2</sub> et du prix y relatives.

## 1.4 Normes et documents techniques

L'élaboration des variantes se base sur les documents normatifs suisses et européens suivants :

- SIA 260 : Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses [23]
- SIA 261 : Actions sur les structures porteuses [24]
- SIA 262 : Construction en béton [25]
- SIA 263 : Construction en acier [26]
- SIA 264 : Construction mixte acier-béton [27]
- SIA 265 : Constructions en bois [28]
- SIA 267 : Géotechnique [29]
- SIA 272 : Étanchéité et drainage d'ouvrages enterrés et souterrains [30]
- SIA 400 : Élaboration des dossiers de plans dans le domaine du bâtiment [31]
- AEAI 15-15 : Prescriptions de protection incendie [9]
- EN 1990 : Bases de calcul des structures [3]
- EN 1991 : Actions sur les structures [2]
- EN 1992 : Calcul des structures en béton [4]
- EN 1993 : Calcul des structures en acier [5]
- EN 1994 : Calcul des structures mixtes acier-béton [6]
- EN 1995 : Conception et calcul des structures en bois [7]

Pour les éléments dont le dimensionnement n'est pas précisément inclu dans les normes, les vérifications se basent sur les avis techniques suivants :

- **Panneau CLT :**  
 Avis Technique 3.3/18-958\_V1 : Piveteau-Bois HEXAPLI [11]  
 Avis Technique 3.3/15-798\_V3 : Stora Enso CLT [12]
- **Tôles ondulées :**  
 Cahier technique CPT-3730\_V2 [10]  
 Avis Technique 3/15-800 : Arcelor Mittal Cofraplus 60 [19]  
 Avis Technique 3/15-801 : Arcelor Mittal Cofrastra 40 [20]  
 Avis Technique 3.1/15-802\_V1 : Arcelor Mittal Cofrastra 70 [21]

Les données de calcul des sections métalliques et en bois sont tirées des tables suivantes :

- SZS C4 : Tables de dimensionnement [32]
- SZS C5 : Tables de construction [33]
- TCB [16]

Les principes d'analyse de cycle de vie sont explicités dans les documents suivants :

- **Europe :**  
 How to calculate embodied carbon (HTCEC) 2022 par The institution of structural engineers, Second edition [34]
- **Suisse :**  
 Données de écobilans dans la construction 2009 :2022 par KBOB [10]

## 1.5 Logiciels utilisés

En plus des documents techniques, les calculs ont été effectués à l'aide des logiciels de calcul suivants :

- **SCIA Engineer** :  
Modélisation et calcul des efforts, des déformations et des métrés.
- **Suite Cubus** :  
Logiciel Fagus : utilisé pour les calculs de section.
- **Ancotech** :  
Logiciel fournisseur : utilisé pour calculer le poinçonnement des fondations et du radier.
- **Microsoft Excel**  
Tableur : Calculs variés, automatisés par code Visual Basic Application (VBA).

## Première partie

# Règles de conception

## 2 Règles de conception

Le domaine de la construction est régulé par de nombreuses exigences dont les plus importantes sont la performance technique et la performance économique. Ces deux concepts régissent chaque aspect d'un projet et doivent être intégrés à la réflexion le plus tôt possible.

Durant les premières semaines de ce projet, l'objectif principal a été de se familiariser avec ces différentes règles et usages propres à cette industrie de manière à pouvoir les intégrer dans la conception des différentes variantes.

Le résultat de cette démarche est développé dans les chapitres 2.1 à 2.5 :

### 2.1 Résistance à l'incendie

Le bâtiment étudié a un niveau d'exigence R60, ce qui signifie que la résistance ultime de la structure porteuse doit être garantie pour une durée de 60 minutes d'incendie, excepté le dernier étage qui n'est soumis à aucune exigence incendie (Directive AEAI 15-15).

Les différents moyens pouvant être mis en oeuvre de manière à satisfaire cette exigence sont :

1. Pour les structures en acier :

- (a) Des plaques de plâtre recouvrant les éléments porteurs principaux.  
Ces plaques sont lourdes et ont un impact environnemental important.
- (b) De la peinture intumescente recouvrant les porteurs critiques.  
C'est une solution adaptée aux porteurs métalliques éloignés des zones de circulation et à l'abri des chocs, la couche de peinture étant relativement fragile.  
Il faut également prendre en compte les particules libérées lors du séchage de la couche de peinture qui peuvent avoir un impact sur la santé des ouvriers et occupants du bâtiment et donc nuire aux performances environnementales du bâtiment.
- (c) Enduire de béton les porteurs concernés.  
Cette méthode est bon marché et les porteurs mixtes peuvent être préfabriqués en atelier.  
Le béton est cependant très coûteux d'un point de vue bilan environnemental.
- (d) Flochage des porteurs :  
Une méthode peu utilisée en Suisse qui consiste à projeter une isolation mélangée à un liant contre un profilé de manière à retarder l'effet du feu sur la structure. Il est relativement facile à mettre en place et peu coûteux

mais a un rendu irrégulier et peu prisé des architectes pour des parties visibles d'un bâtiment de bureaux.

2. Pour les structures en bois :
  - (a) Le feu attaque les faces exposées de tout élément en bois. On doit donc considérer une section résiduelle en fonction de la durée de l'incendie et de l'essence utilisée. On considère également que la résistance de la section résiduelle augmente, le bois calciné étant plus résistant que le bois sain.
  - (b) Les assemblages doivent être réalisés de la même manière que pour les assemblages acier, des joints coupe-feu doivent être disposés afin de confiner les gaz chauds.
  - (c) Il y aurait la possibilité de recouvrir les éléments en bois par une plaque de plâtre afin de les isoler du feu mais cela nuirait à l'aspect de l'élément et augmenterait les émissions de CO<sub>2</sub> globales de l'ouvrage.
3. Pour les structures en béton :
  - (a) Augmenter l'enrobage. Le béton est naturellement résistant aux fortes températures mais les armatures ne le sont pas. Il faut donc garantir une épaisseur minimale d'enrobage en fonction de l'exigence de situation incendie. Cependant pour l'exigence de ce bâtiment l'enrobage minimal suffit à satisfaire ces critères.
  - (b) Les épaisseurs de certains éléments comme les poteaux doivent aussi dépasser une certaine valeur.

De plus, le bâtiment est divisé en différents compartiments qui doivent être coupe-feu. Pour ce faire, chaque variante doit garantir une exigence EI60 (de nouveau excepté le dernier étage) pour le système de cloisonnement, avec les options suivantes :

- Étudier les détails d'assemblage de manière à empêcher la propagation du feu entre les pièces, cela inclut la disposition de joints coupe-feu à l'interstice d'éléments cloisonnants et la protection (plaque de plâtre, peinture intumescente) des éléments dont la destruction permettrait la circulation de gaz chauds.
- Effectuer une analyse plus précise avec un calcul faisant intervenir un fonctionnement en membranes (utilisable pour un plancher mixte acier-béton).

## 2.2 Exigences liées à la physique du bâtiment

La physique du bâtiment s'occupe de l'isolation thermique et acoustique du bâtiment. Dans le cas de variantes de planchers, la partie thermique n'est pas déterminante : en effet la variation de température d'un étage à l'autre est minime. La toiture, en revanche doit être isolée.

Cependant les exigences acoustiques sont déterminantes ici. Les principaux facteurs à considérer sont l'amortissement des bruits de pas et l'isolation vis-à-vis des autres étages. Pour satisfaire ces exigences, la stratégie la plus efficace est de garantir une épaisseur de chape suffisante, de lester le plancher avec du sable ou du gravier, et de disposer plusieurs couches d'isolation entre la surface de la structure porteuse et la chape. Si l'isolation a un impact relativement faible sur les émissions de CO<sub>2</sub>, la chape et le lestage, eux, ont un impact double :

- Premièrement, la quantité de ciment utilisée dans la chape contribue de manière non négligeable au bilan carbone du plancher.
- Deuxièmement, plus la chape est épaisse et le lestage important, plus la surcharge permanente y relative est importante. La structure porteuse devra être plus résistante et donc consommera plus de matériaux.

Note : Les planchers lourds peuvent satisfaire les exigences acoustiques de par leur masse propre : on peut disposer un faux plancher léger au dessus. Les systèmes légers, en revanche, sont plus mauvais dans ce sens, on doit rajouter une chape lourde au dessus sur système porteur. La chape étant dimensionnée en fonction de la charge utile (pour un immeuble de bureaux :  $3kN/m^2$ ) elle a une épaisseur minimale de 80 mm.

Ces exigences ont un impact important sur le dimensionnement du système de plancher. Elles impliquent un poids mort très important et inévitable selon les exigences en vigueur. Le chapitre 8.1 permet de quantifier leur impact.

### 2.3 Exigences liées aux CEA

Les CEA s'occupent de tout ce qui est relatif les revêtements de sol, le cloisonnement et le clos couvert. Leur apport à cette étude consiste principalement en la discussion au sujet des revêtements de sol.

Ce qui ressort de cette discussion est que, pour du bureau, on a principalement deux systèmes :

1. Une chape :

Une épaisseur de de ciment et de sable ou d'anhydrite disposée sur la surface du plancher. Celle-ci est dimensionnée par la charge utile et a un impact non négligeable sur les charges et les émissions de CO<sub>2</sub>. C'est la solution la moins chère et la plus usuelle.

2. Un faux plancher technique :

Une solution consistant en un panneau reposant sur des supports réguliers. Cette solution a l'avantage de laisser un espace entre la dalle et le plancher permettant de disposer des canalisations et l'alimentation électrique. De plus, les rendant accessibles une fois l'installation terminée, ce système étant facilement démontable.

Malgré sa légèreté, il est deux fois plus cher qu'une chape traditionnelle et émet 2 à 5 fois plus de CO<sub>2</sub> selon le fabricant.

### 2.4 Exigences liées à l'intégration des techniques

Les techniques du bâtiment ou CVS (Chauffage, Ventilation et Sanitaire) sont un aspect primordial du fonctionnement d'un bâtiment. La conception de variantes doit impérativement les prendre en compte afin d'éviter de coûteuses modifications plus tard dans le projet.

Dans le cadre de la conception des variantes, la ventilation et le chauffage sont intégrés dans le plancher quelle que soit sa composition et cela pose deux problèmes :

- Le chauffage : dans la variante en dalle béton sur piliers, les installations de chauffage consistent en une dalle active, ce qui signifie noyer des conduites dans la dalle et, lors de l'exploitation du bâtiment, faire circuler un fluide chaud ou froid afin de réguler la température des espaces en fonction des besoins. Cette manière de faire est très efficace et efficiente du point de vue des coûts, mais elle n'est possible que dans le cas d'une dalle en béton nue ou coulée sur une tôle ondulée mais sans faux plafond. Ces critères interdisent son utilisation dans des variantes bois ou mixte pour des raisons d'acoustique. La solution pour pallier ce problème pourrait être l'installation d'îlots de faux plafonds rayonnants voire d'un faux plafond rayonnant intégral. Ces solutions sont malheureusement plus coûteuses qu'une dalle active et peuvent nuire à l'aspect d'un plafond, tout en présentant un bilan CO<sub>2</sub> peu reluisant. On peut également considérer un chauffage au sol noyé dans la chape. C'est un système efficace pour le chauffage en hiver mais inutile en cas de forte chaleur, contrairement à une dalle active.
- La ventilation : La variante en dalle béton sur piliers a l'avantage d'avoir un plancher avec un rendu lisse qui permet l'installation de techniques (ventilation et électricité) de manière apparente et sans avoir à percer d'élément porteur. Si les variantes proposées ont un système porteur en poteaux-poutres-dalle, la présence de porteurs principaux avec une retombée plus importante nuit à la libre circulation des techniques et peut de ce fait impacter la hauteur d'étage. Afin de pallier cette problématique, il est primordial de concevoir le système porteur en anticipant la circulation des gaines de ventilation. Pour ce faire, il faut planifier des interruptions de porteurs et optimiser l'orientation des sommiers de manière à ne pas interférer avec la circulation de ces techniques. Néanmoins, une variante en plancher dalle éviterait ce problème.

## 2.5 Exigences liées à la hauteur statique

Si la hauteur statique du plancher est limitante vis-à-vis de la circulation des techniques, elle a également une influence sur la hauteur d'étage et donc sur la hauteur du bâtiment. En effet, on doit garantir un certain gabarit libre en dessous des techniques et avec un plancher plus épais, la hauteur d'étage doit être augmentée. Dans ce cas, cela influence la longueur des piliers et des murs, augmentant légèrement le volume de matériaux nécessaire à leur fabrication.

L'influence majeure de cette augmentation, en revanche, est l'augmentation de surface de façade. Celle-ci est plus chère, plus lourde et implique des systèmes d'attache plus importants.

## 2.6 Calcul des émissions et des coûts

Le résultat principal du dimensionnement des variantes est un métré des différents matériaux. Ceux-ci ont des coûts et des émissions de CO<sub>2</sub> qui y sont associés.



### 2.6.1 Émissions

Le calcul des émissions est un calcul simplifié se basant sur des facteurs d'émissions fournis par la Conférence de coordination des services de la construction et des immeubles des maîtres d'ouvrage publics (KBOB). Ces facteurs sont les résultats de nombreuses analyses cycle de vie sur divers matériaux et modes constructifs. Ces facteurs sont les moyennes de ces analyses et elles ne prennent pas en compte les particularités des fournisseurs ni la provenance des matériaux. C'est toutefois le document qui a valeur de norme en Suisse en ce qui concerne la labélisation des projets. Malgré cette imprécision, ce sont ces valeurs qui ont été utilisées dans cette étude.

Cependant, en 2026, les normes européennes (Eurocodes) vont remplacer les normes suisses actuelles (SIA). Dans certains pays européens, comme la France ou l'Allemagne, les facteurs d'émissions de CO<sub>2</sub> peuvent être calculés par chaque fournisseur. Ils ont donc tout intérêt à optimiser leur processus de fabrication afin de diminuer l'impact de leurs produits. Si les changements apportés à la législation suisse permettent ce type de fonctionnement, certaines valeurs, actuellement surévaluées, pourraient être affinées et éventuellement réduites en fonction du fournisseur.

Le calcul des émissions de CO<sub>2</sub> par élément est le suivant :

$$m_{CO_2,i} = k_i \cdot m_i \quad (1)$$

avec :  $m_{CO_2,i}$  [kgCO<sub>2</sub>] : la masse de CO<sub>2</sub> émise pour l'élément  $i$ ,  $k_i$  : le facteur d'émissions du matériau de l'élément  $i$  [kgCO<sub>2</sub>/kg],  $m_i$  : la masse de l'élément  $i$  [kg]

Les facteurs d'émissions sont les suivants :

Facteurs d'émissions			
Matériaux	Élément type	Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	Facteur d'émissions [kgCO <sub>2</sub> /kg]
Bois massif	Poutres	436	0,29
Bois lamellé collé	Poutres	439	0,336
Bois lamellé croisé	Panneaux CLT	485	0,471
Acier	Profilés	7850	0,738
	Armatures	7850	1,52
	Tôles	7850	4,49
Béton	Pieux	2400	0,119
	Gros œuvre KBOB	2400	0,101
	Gros œuvre CEM II/B-LL	2400	0,091
Plaques de plâtre	Protection feu	1200	0,553
Gravier	Lestage	2000	0,018
CEA	Chape ciment	2000	0,120
	Isolation EPS	250	0,727
Verre	Double vitrage façade	44.4 [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	
Tuyaux PE	Dalle active	2.02 [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	
Alu & Cuivre	Faux plafond rayonnant	10.9 [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]	

Note : la table de la KBOB fournit une valeur moyenne pour le béton qui est 10% supérieure à la valeur applicable aux bâtiments usuellement construits par Losinger-Marazzi. Les deux valeurs ont été utilisées parallèlement dans cette étude.

### 2.6.2 Coûts

Le calcul des prix est basé sur les tarifs fournisseurs donnés par le service de valorisation gros oeuvre de Losinger-Marazzi. Les tarifs en fourniture et pose sont les suivants :

Coûts		
Matériaux	Élément type	Calcul du prix
Bois massif	Poutres	$800 \text{ CHF}/\text{m}^3$
Bois lamellé collé	Poutres	$1200 \text{ CHF}/\text{m}^3$
Bois lamellé croisé	Panneaux CLT	$1000 \text{ CHF}/\text{m}^3 + 25 \text{ CHF}/\text{m}^2$
Bois lamellé croisé	Panneaux CLT (TS3)	$1000 \text{ CHF}/\text{m}^3 + 68 \text{ CHF}/\text{m}^2$
Acier	Profilés	$3.5 \text{ CHF}/\text{kg}$
	Armatures	$1.20 \text{ CHF}/\text{kg}$
	Tôles	$50 \text{ CHF}/\text{m}^2$
Béton	Pieux	$300 \text{ CHF}/\text{m}'$
	Dalles	$160 \text{ CHF}/\text{m}^3 + 42.50 \text{ CHF}/\text{m}^2$
	Murs	$185 \text{ CHF}/\text{m}^3 + 65 \text{ CHF}/\text{m}^2$
Plaques de plâtre	Protection feu	$120 \text{ CHF}/\text{m}^2$
Gravier	Lestage	$25 \text{ CHF}/\text{t}$
CEA	Chape ciment 80 mm + EPS	$38 \text{ CHF}/\text{m}^2$
	Chape ciment 60 mm + EPS	$36 \text{ CHF}/\text{m}^2$
Verre	Double vitrage façade	$800 \text{ CHF}/\text{m}^2$
Tuyaux PE	Dalle active	$30 \text{ CHF}/\text{m}^2$
Alu & Cuivre	Faux plafond rayonnant	$61.5 \text{ CHF}/\text{m}^2$

## 2.7 Compilation des contraintes

Au vu de ces considérations, le plancher de chaque variante doit être :

1. Suffisamment épais pour satisfaire les exigences de résistance à l'incendie, mais
2. Suffisamment fin pour ne pas avoir d'impact négatif en façade,
3. Suffisamment léger pour ne pas nuire à la descente de charge et aux contraintes de déformations, mais
4. Suffisamment lourd pour satisfaire les exigences acoustiques
5. Suffisamment régulièrement soutenu pour garantir la sécurité structurale et l'état limite de service, mais
6. Suffisamment libre d'obstacle afin de garantir la libre circulation des techniques

Chaque variante devra donc satisfaire simultanément tous ces critères tout en optimisant les émissions de CO<sub>2</sub> et les coûts. Leur interaction est présentée à la figure 6.

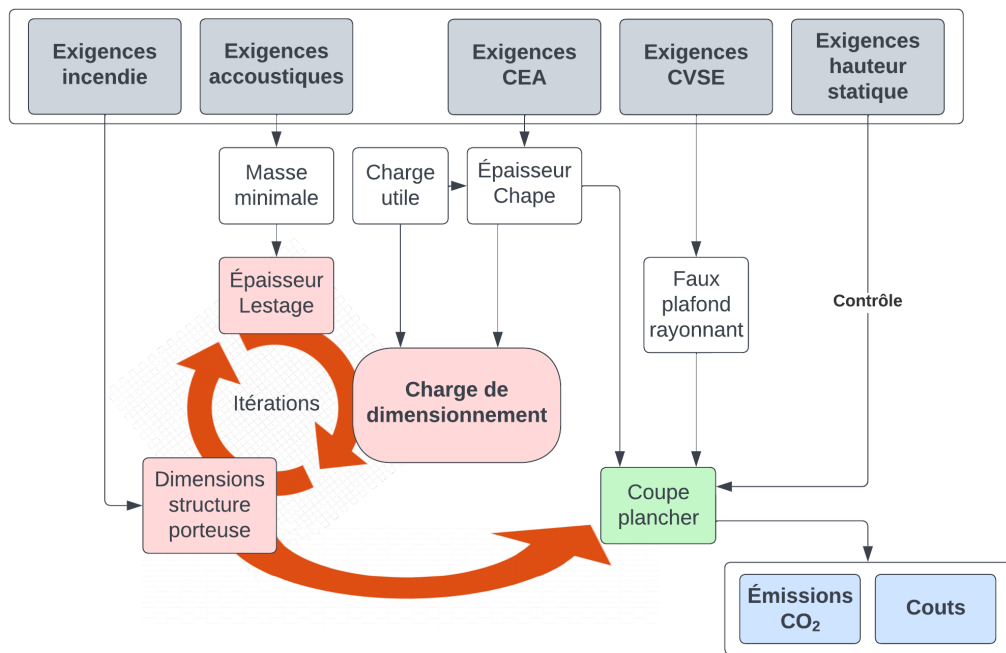
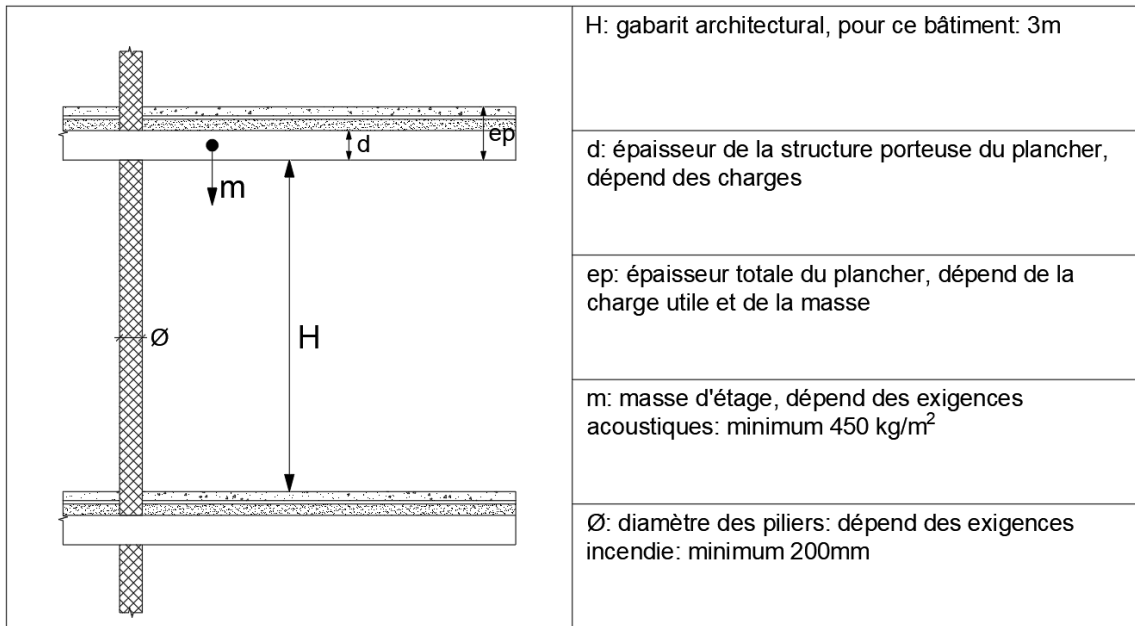


FIGURE 6 – Interaction des différentes exigences



## Deuxième partie

# Étude de variantes

### 3 Conception des variantes : Étude de trame type régulière

La première étape dans la conception des variantes a été de prendre en compte les aspects présentés dans les chapitres précédents et de manière à :

- Premièrement, trier les idées économiquement, écologiquement ou techniquement non-viables.
- Deuxièmement les connaissances acquises ont permis de déterminer les épaisseurs de chape, de lestage et d'isolation nécessaires à garantir une bonne performance acoustique. Cette considération permet de définir les surcharges permanentes liées à chaque typologie de plancher.
- Troisièmement, la prise en compte de la circulation des gaines de ventilation et autres techniques impose de considérer l'orientation des porteurs de manière à limiter au maximum l'interférence avec celles-ci afin de réduire au minimum les percements dans les porteurs.

De plus, de manière à optimiser le processus, les variantes proposées dans les paragraphes suivants ont toutes été basées sur une trame type rectangulaire (5×6m). Cette simplification a permis de tout dimensionner via un tableur Excel et d'automatiser ce dimensionnement (CF : chapitre 3.1). Les dimensions trouvées avec cette simplification ont ensuite été comparées aux valeurs nécessaires pour un dimensionnement affiné.

#### 3.1 Outils

Le dimensionnement de variantes étant un processus très itératif et l'optimisation de différents paramètres demandant la satisfaction simultanée de différents critères, la résolution à la main de chaque calcul de dimensionnement est naturellement peu efficiente.

Une partie importante de ce travail a donc été le développement d'outils numériques de dimensionnement, d'optimisation et de comparaison de variantes. Le support de ces outils est le tableur Microsoft Excel. Ce choix est justifié par le besoin de réemploi par l'entreprise Losinger-Marazzi de ces outils pour des prédimensionnements ultérieurs. Un outil développé sur Matlab ou Python aurait été moins facile d'accès pour quelqu'un de non-initié à leur utilisation.

3.1.1 Fonctionnement des outils : exemple de la variante CLT

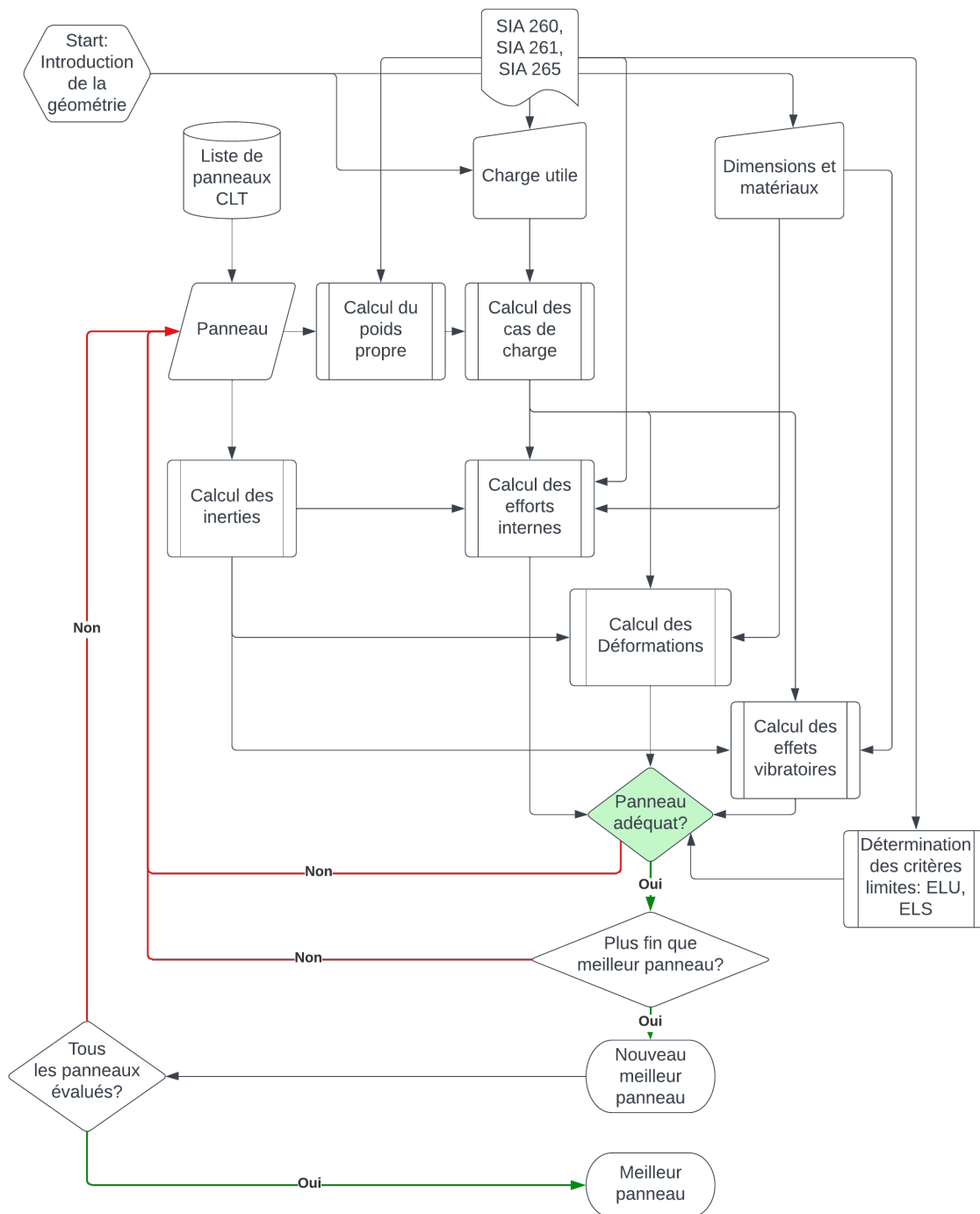


FIGURE 7 – Schéma du fonctionnement de l'outil

L'outil de dimensionnement fonctionne comme montré sur le graphique à la figure 7. L'utilisateur rentre les paramètres liés à la géométrie de la trame qu'il souhaite étudier ainsi que les charges qu'il souhaite prendre en compte et les exigences incendie.

Une fois ces paramètres choisis le dimensionnement peut être lancé. L'outil dispose d'une base de donnée des sections des panneaux en bois lamellé croisé les plus courants disponibles dans le commerce. Il va donc itérer automatiquement en soumettant un à un chacun de ces panneaux à une feuille Excel effectuant tous les calculs d'aptitude au service et à l'état limite ultime (déformation, vibration et résistance). La feuille Excel permettant de définir si un panneau est adéquat ou non, l'outil enregistre ceux qui satisfont les critères et renvoie celui qui minimise un paramètre au choix de l'utilisateur : ces paramètres sont, le plus souvent, le prix, les émissions de CO<sub>2</sub>, la hauteur statique ou une combinaison des trois.

Un outil similaire a été développé pour chacune des variantes. Cela permet de s'affranchir des calculs répétitifs nécessaires à la vérification d'un concept au stade de conception. Ensuite les différentes variantes ainsi optimisées sont comparées en fonction de leurs compétences écologiques et économiques.

### 3.2 Hypothèses

Les hypothèses prises à cette étape de l'analyse sont les suivantes :

1. Le dimensionnement s'est basé sur une trame régulière rectangulaire de 5m par 6m
2. Les critères de calcul considérés sont :
  - La résistance structurale
  - La résistance en situation incendie
  - Les déformations
3. Les critères d'optimisation sont les suivants (basés sur une approximation des quantités par m<sup>2</sup>) :
  - Le prix par m<sup>2</sup> : Les prix unitaires ont été définis suite à une discussion avec le service de valorisation gros oeuvre (cf chapitre 2.6.2).
  - Les émissions de CO<sub>2</sub> par m<sup>2</sup> : Les facteurs d'émissions ont été tirés de la KBOB (cf chapitre 2.6.1).
  - Le poids par m<sup>2</sup>
4. A ce stade, on a omis les aspects suivants :
  - La disposition des porteurs verticaux
  - Les considérations sismiques (mis à part la masse d'étage mais le calcul ne prend pas en compte les gains y relatifs)
  - Les gains liés aux fondations (même réflexion que le point précédent)
  - La circulation des techniques (trop liée à la géométrie des étages)
  - L'isolation des compartiments coupe-feu
  - Les détails de connexion

### 3.3 Processus

Les premières réflexions sont articulées autour des matériaux : bois, acier et béton. Puis une phase de développement de typologies de planchers a suivi. Certaines de ces variantes ont été écartées très tôt car pas réalisables d'un point de vue

constructif ou trop exigeantes vis-à-vis de la physique du bâtiment. Ce fut notamment le cas de la variante en béton préfabriqué, celle-ci aurait pu fonctionner dans le cadre d'un bâtiment à trame régulière, ce qui n'est absolument pas le cas de l'objet de cette étude. Les exigences acoustiques ont eu raison des typologies de planchers en bois trop légères. Les autres typologies ont été dimensionnées à dimensions et charges égales. Cette phase a culminé dans la comparaison de 8 types d'alternatives à la solution béton traditionnelle. Chacune de ces solutions a été optimisée à l'aide de l'outil développé (CF chapitre 3.1).

### 3.4 Typologies de plancher

Chacune de ces typologies a été étudiée sur une trame type régulière de 6 par 5 mètres. C'est le premier niveau d'approximation qui permet de trier beaucoup de variantes de manière efficiente. Les systèmes proposés sont basés de l'expérience, sur les systèmes étudiés en cours et sur les traités de génie civil [13] [17] [18] [15], et autres documents techniques [22].

Les coupes types des différentes typologies de plancher sont les suivantes :

#### 3.4.1 Bois-béton mixte sans armatures :

Béton coulé sur un panneau 3-plis lui-même reposant sur une solive en BLC. Les connecteurs Bois-Béton sont de type Profix PHBV.

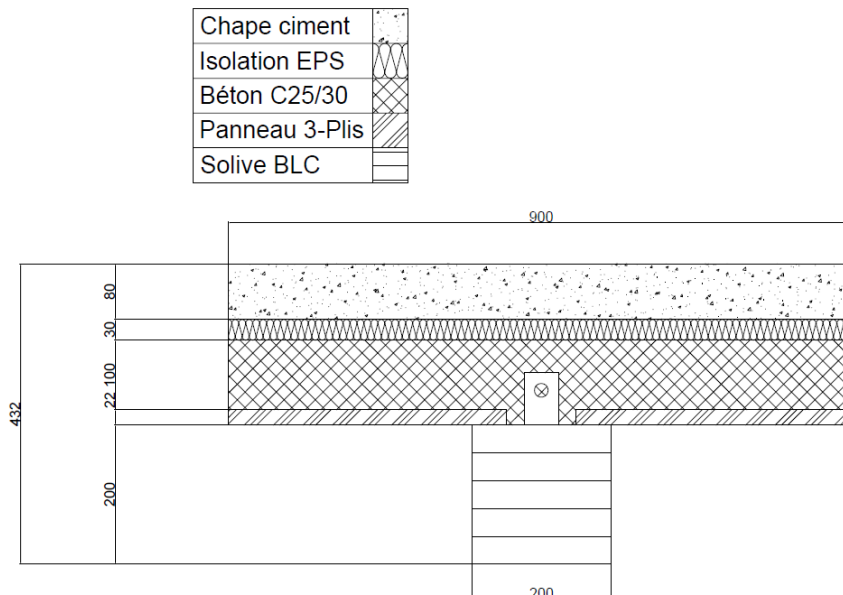


FIGURE 8 – Bois-béton mixte : élastique

Le béton reste dans le domaine élastique ce qui permet d'économiser de l'armature. C'est un cas théorique, de l'armature de fissuration devrait toujours être disposée, mais il est intéressant de quantifier les gains en  $\text{CO}_2$  réalisables par cette altération.



### 3.4.2 Bois-béton mixte avec armatures :

Il s'agit du même système que précédemment mais un comportement plastique du béton est admis.

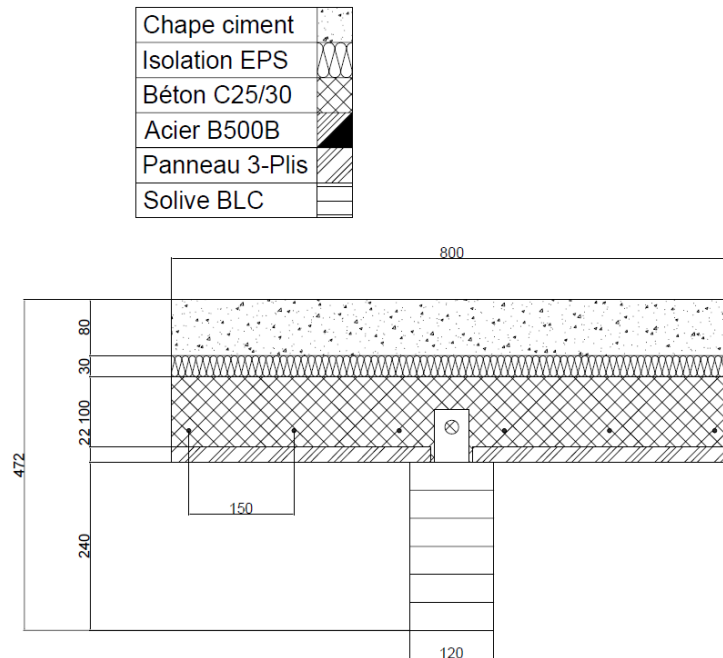


FIGURE 9 – Bois béton mixte : plastique

C'est le cas usuel, avec plastification de la zone fissurée.

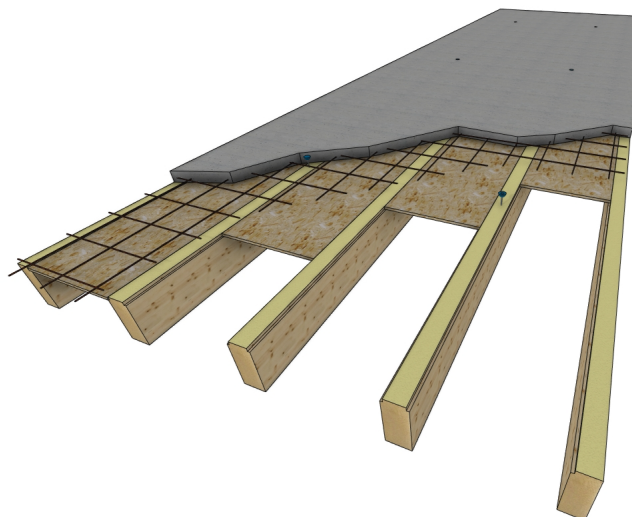


FIGURE 10 – Plancher bois béton mixte

3.4.3 Acier béton mixte traditionnel

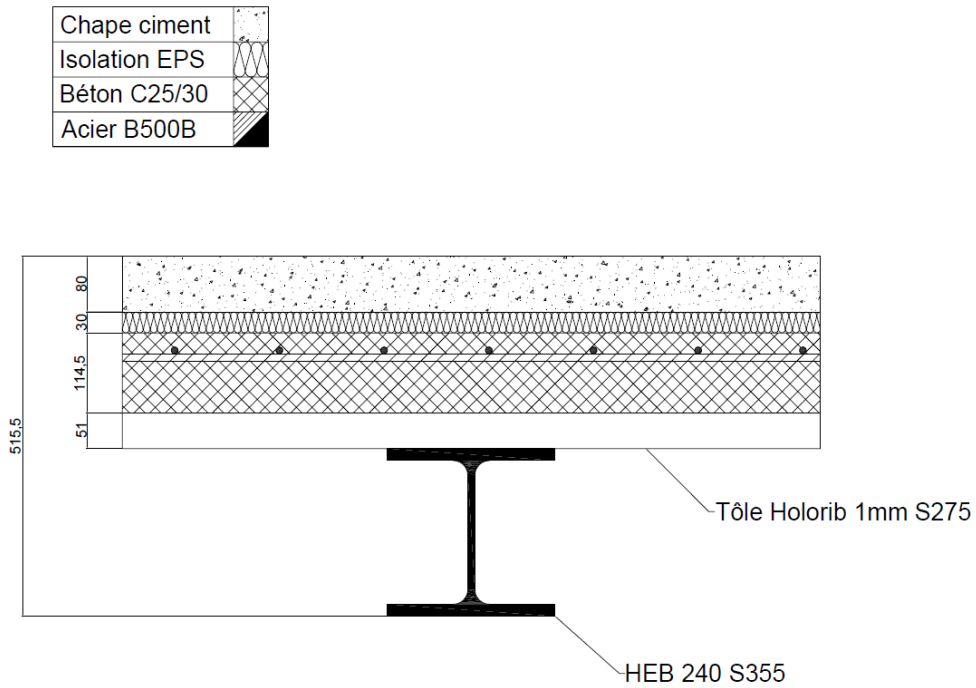


FIGURE 11 – Acier-béton mixte : traditionnel

Fonctionnement classique d'une dalle mixte.

### 3.4.4 Acier béton mixte traditionnel :

Acier XCarb (Arcelor Mittal)

L'acier XCarb est un produit de l'aciérie Arcelor Mittal qui garantit l'utilisation de 100% de ferraille recyclée et l'utilisation d'électricité produite à partir d'énergie renouvelable. Les données fabricants projettent une émissions de CO<sub>2</sub> de 200g par kg d'acier contre 738g par kg d'acier pour un acier traditionnel (KBOB). Cependant, en Suisse, seule la valeur donnée par la KBOB est utilisable pour l'attribution de labels (Minergie et autres). Cette situation pourrait être amenée à changer dans les prochaines années, c'est pourquoi cette alternative est considérée.

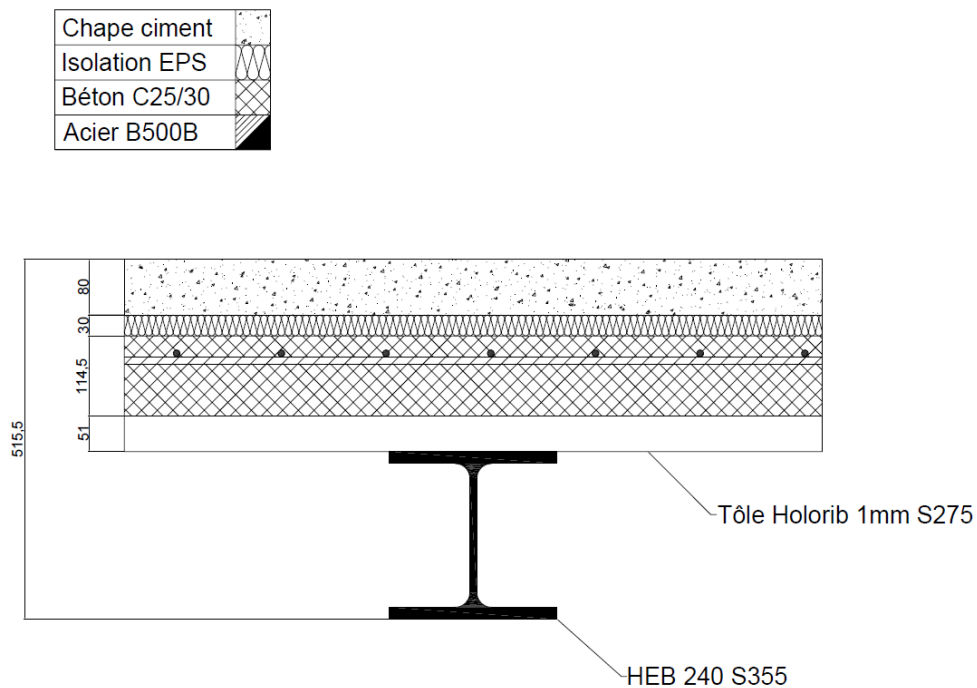


FIGURE 12 – Acier-béton mixte : traditionnel XCarb

Fonctionnement classique d'une dalle mixte : L'acier utilisé est produit à partir de ferraille recyclée et les fours à arc sont alimentés en énergie renouvelable. C'est un processus de fabrication qui n'est pas encore pris en compte par les organismes suisses mais les résultats sont une baisse de 50 à 70% des émissions liées à l'acier pour un augmentation du prix de l'ordre de 2 à 3 %.

## 3.4.5 Acier béton mixte déconnecté :

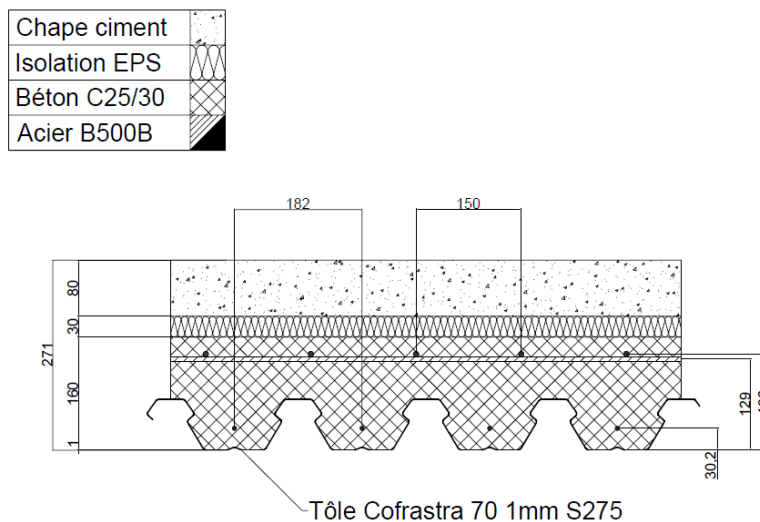


FIGURE 13 – Acier-béton mixte : tôles et solives déconnectées

La poutraison et la dalle ne sont pas gougeonnées : le béton et la tôle doivent donc reprendre seuls la flexion. On économise sur la poutraison et les assemblages gougeonnés au prix d'un étayage plus important et d'une tôle plus robuste.

**3.4.6 Bois caisson :**

Une paire de panneaux 3-plis épais vissés sur une solive en BLC.

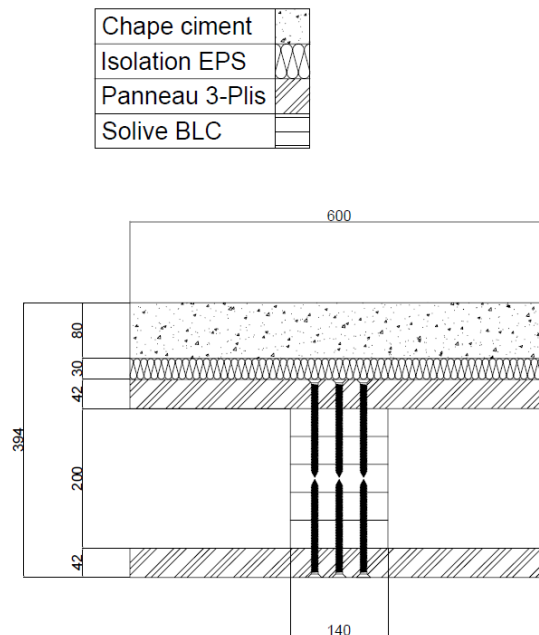


FIGURE 14 – Bois caisson

C'est une solution qui émule le fonctionnement d'une poutre en double T et est de ce fait efficace et dense mais les assemblages sont chers et nombreux. Ici on a considéré des assemblages par vis à bois mais des systèmes collés existent sur le marché, de même que des caissons préfabriqués.

**3.4.7 Bois solive :**

Un panneau 3-plis épais vissé sur une solive en BLC.

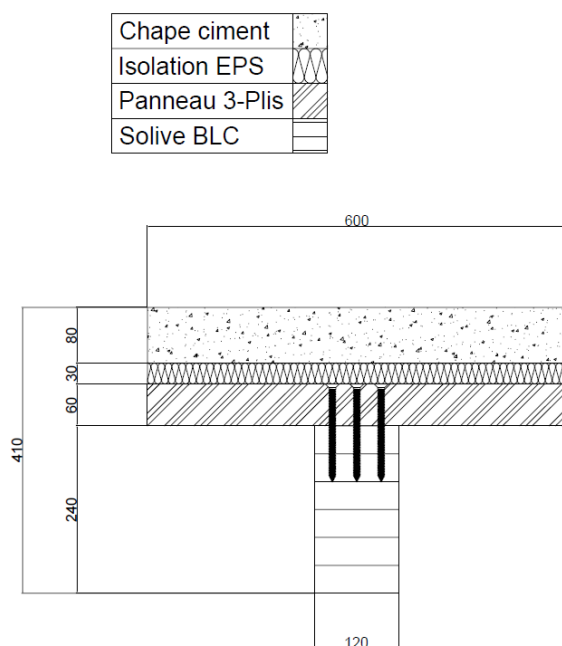


FIGURE 15 – Bois solives

C'est la solution traditionnelle pour un plancher en bois. La connection est faite par vis à bois. C'est un système léger qui nécessite un dispositif d'isolation acoustique important. Il n'est donc pas adapté à une utilisation pour un immeuble de bureaux malgré ses très bonnes performances écologiques et économiques.

### 3.4.8 Dalle en CLT (Bois lamellé-croisé) :

C'est une solution de dalle pleine en bois.

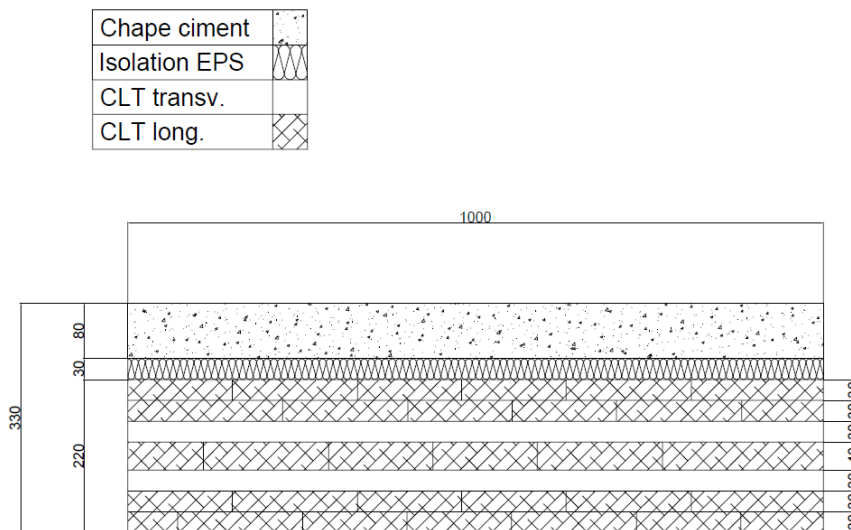


FIGURE 16 – CLT

C'est une solution facile à mettre en place sur un chantier et plus résistante en cas d'incendie mais plus massive qu'un système avec une poutraison secondaire.

TS3, une entreprise basée à Thoune a récemment breveté une méthode constructive permettant de joindre des panneaux bout-à-bout de manière à achever un comportement semi isotrope des panneaux CLT sur une grande surface. On s'affranchit donc complètement de toute forme de poutraison au prix d'une plus grande densité de porteurs et d'une épaisseur de bois légèrement supérieure.

3.5 Comparaison

3.5 Comparaison

Une fois toutes ces variantes optimisées (voir annexe A), il a été possible de les comparer entre elles et également à la solution en béton armé.

La distribution des émissions de CO<sub>2</sub> entre les différentes variantes est affichée à la figure 18.

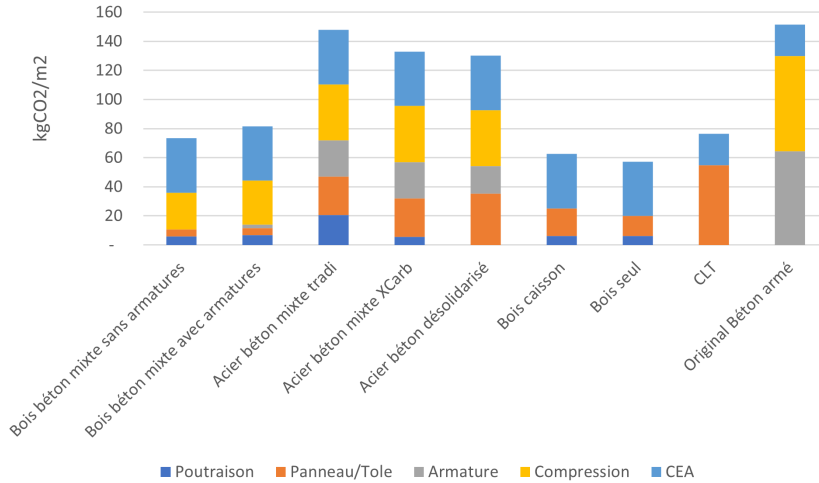


FIGURE 17 – Émissions de CO<sub>2</sub> par m<sup>2</sup> par variante

Premièrement, il est aisé de remarquer que le but de la conception est atteint pour chaque variante car les émissions de CO<sub>2</sub> sont inférieures à celle du béton armé. Cependant on observe une très grande disparité des émissions : sans surprise, les solutions en bois sont les plus économes. Toutefois, certaines d’entre elles ne satisfont pas certains critères acoustiques ou de protection incendie sans une intervention coûteuse (de type faux plafond intégral en plâtre).

La distribution des coûts entre les différentes variantes est affichée à la figure 18.

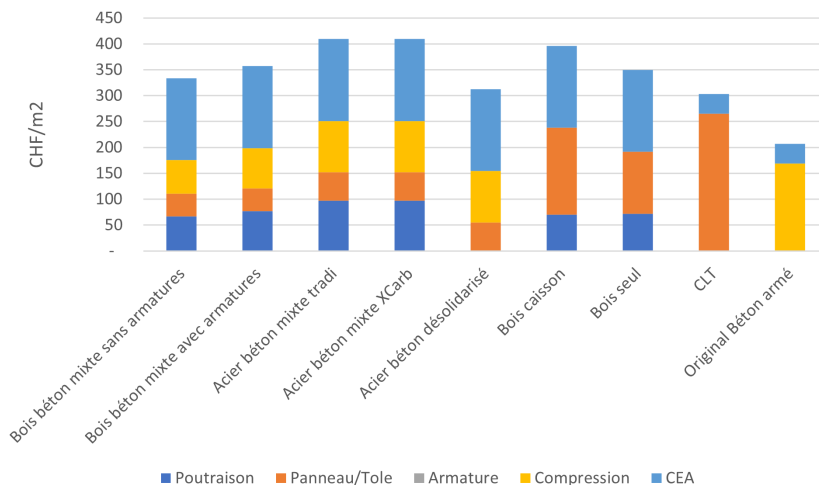


FIGURE 18 – Coûts par m<sup>2</sup> par variante



Si les solutions proposées sont toutes plus efficaces d'un point de vue écologique, l'aspect financier est beaucoup plus mitigé : toutes les variantes sont plus chères que la variante originale. On remarque également que plus les émissions sont basses, plus le prix est élevé. La corrélation entre les émissions et le prix est même de -0.44.

### 3.6 Choix

Le choix des variantes à poursuivre s'est fait sur la base des critères suivants :

1. Émissions de CO<sub>2</sub> : les variantes doivent être performantes d'un point de vue environnemental.
2. Coûts : les coûts peuvent augmenter mais doivent se justifier par une baisse conséquente des émissions de CO<sub>2</sub>.
3. La faisabilité technique : les variantes ne doivent pas avoir une complexité technique qui pourrait impliquer des surcoûts en phase chantier ou une faible adaptabilité à une trame complexe.

Les deux premiers critères sont quantitatifs : les valeurs trouvées peuvent être comparées directement et objectivement. Le graphe 19 superpose les données précédemment exposées et le graphe 20 les met en relation.

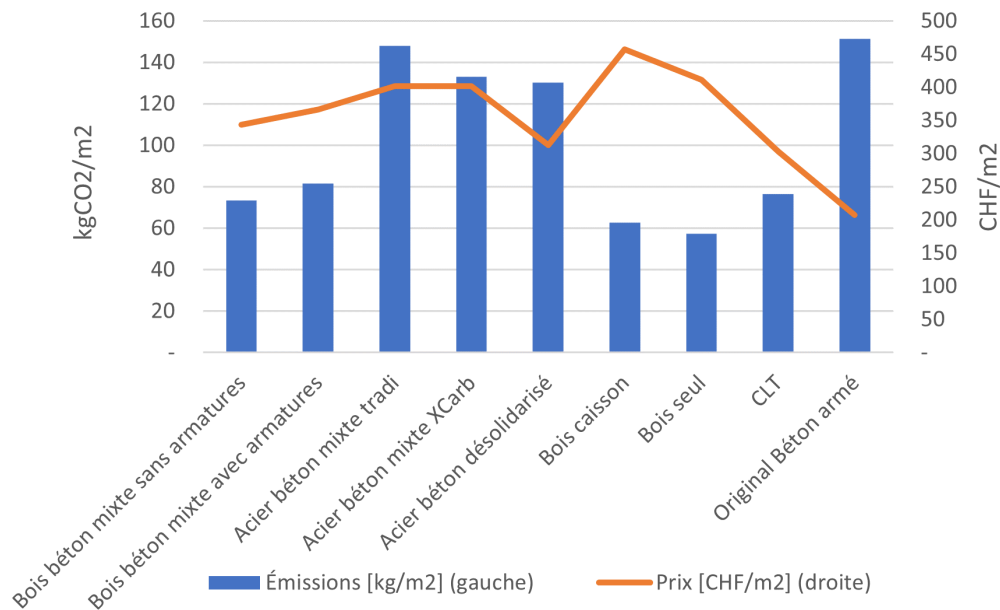


FIGURE 19 – Comparaison émissions/prix

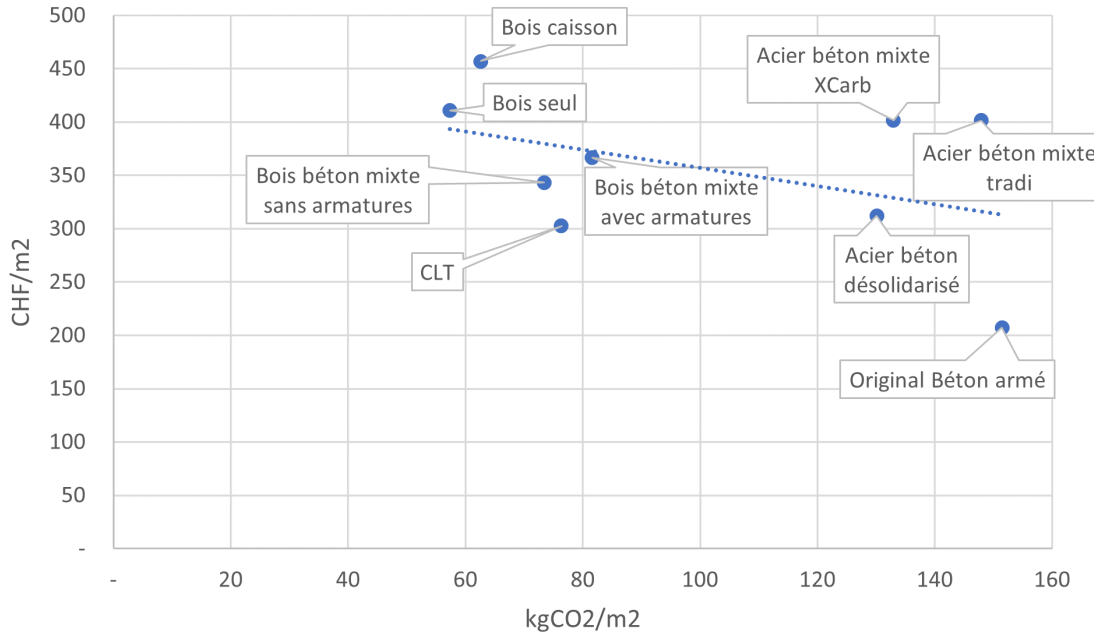


FIGURE 20 – Comparaison directe émissions/coûts

Ce dernier graphe présente la tendance. On remarque une grande disparité de résultats entre les différentes variantes étudiées. Certaines d'entre elles sont plus performantes que la tendance alors que d'autres le sont moins. Pour une importance égale accordée au prix et aux émissions, toute variante au dessous de la droite est viable. (Si on accordait plus d'importance à limiter les émissions que le prix, ce qui se fait en pratique, la pente de la droite d'interpolation serait plus importante).

On maintient donc les variantes suivantes (Dans l'ordre décroissant d'efficacité) :

1. **CLT** : très bons résultats sur les émissions de CO<sub>2</sub> : réduction de 55% des émissions pour une augmentation du prix de 46%.
2. **Acier-béton désolidarisé** : Influence réduite sur les deux aspects, utile si on veut absolument limiter les prix : réduction de 23% des émissions pour une augmentation du prix de 38%.
3. **Bois-béton mixte** : les deux variantes ont des résultats similaires bien que moins performants que le CLT : réduction de 52% (respectivement 45%) des émissions pour une augmentation du prix de 66% (respectivement 60%).

Pour le troisième critère, les réflexions suivantes ont été faites pour les différentes variantes :

- **CLT** : La disposition des panneaux est contraignante et nécessite un calepinage précis et de nombreuses découpes potentiellement complexes. Ces découpes peuvent être réalisées en atelier et la pose sur chantier peut être rapide si les éléments individuels ne sont pas trop lourds. Cependant la pose sur sommiers métalliques implique soit : la soudure d'un plat à l'aile inférieure du sommier pour faciliter la pose (solution chère en atelier mais rapide sur chantier), la

nécessité de glisser les panneaux entre les ailes des profilés (ne demande pas d'intervention en atelier mais nécessite un planning très rigoureux du montage : perte de temps sur chantier).

- **Acier-béton mixte** : Procédé constructif habituel : montage de la charpente, puis pose des tôles, disposition de l'armature et coulage du béton. C'est un procédé commun et bien rodé, donc efficient. Cependant, les différents panneaux auront des formes complexes, ce qui impliquera des découpes inhabituelles et des écrasements de nervures en biais qui pourraient s'avérer coûteux.
- **Bois-béton mixte** : Éléments individuels légers. Facilité de levage et de manutention. Mais grand nombre d'éléments (poutres, panneaux, armature, connecteurs). Il y aurait une possibilité de préfabriquer certains éléments mais la géométrie du bâtiment limite cette utilisation. Le nombre de connexions à réaliser pose un gros problème de coûts et de planning.

Au vu de ces critères, les variantes qui ont été analysées à un niveau de détail plus élevé sont les suivantes :

- **La variante en CLT** : Elle est la variante bois la meilleure marché, et de par sa nature, elle est également très performante d'un point de vue des émissions de CO<sub>2</sub>. Sa mise en place se fait par pose de panneaux pouvant être lourds mais une bonne conception en limite les dimensions de manière à faciliter la manutention.

Cette variante peut être déclinée en deux sous-variantes :

- Une variante avec un système porteur en poteaux-poutres-dalle, appelée **CLT orthotrope**. Pour cette variante, les panneaux portent dans une direction principale vers des sommiers métalliques retransmettant les efforts vers les porteurs verticaux.
- Une variante avec un système porteur en poteaux-dalle **appelée CLT isotrope**. Ce système est possible grâce à la technologie de la société TS3 basée à Thouné qui permet de coller des panneaux en CLT l'un à l'autre bout-à-bout sans perte de rigidité. On peut ainsi concevoir un plancher en bois sans sommiers avec un comportement se rapprochant de la solution en béton armé.
- **La variante en Acier-béton mixte** : C'est une solution moins ambitieuse que les autres d'un point de vue des émissions de gaz à effet de serre, mais c'est celle qui contrôle le mieux les coûts. Son processus de pose est bien rodé et optimisé pour les structures régulières et peut être adapté à des structures plus complexes tout en contrôlant les coûts.

## 4 Conception des variantes : Étude d'un étage type

Le niveau de détail suivant est la conception d'un étage type. Cette étape permettra de confronter l'approximation de la trame régulière à la réalité géométrique du bâtiment. Cette réalité vient avec les contraintes suivantes :

1. La trame ne peut pas être régulière : la géométrie du bâtiment étant complexe, la répartition des porteurs le sera également.
2. Afin de supporter le poids des étages supérieurs au dessus des renforcements dans la façade, il est nécessaire de disposer un renforcement dans la zone sud-est du bâtiment (dans la variante de base, c'est une poutre Vierendeel en acier).
3. Pour les variantes dont le système porteur présente des retombées en plafond, il est nécessaire de disposer ces retombées de manière à laisser le champ libre à la circulation des techniques.

Le choix de l'étage type s'est porté sur le niveau R+4 (plan à la figure 21) car c'est un étage qui présente à lui seul toutes les spécificités des étages du bâtiment.

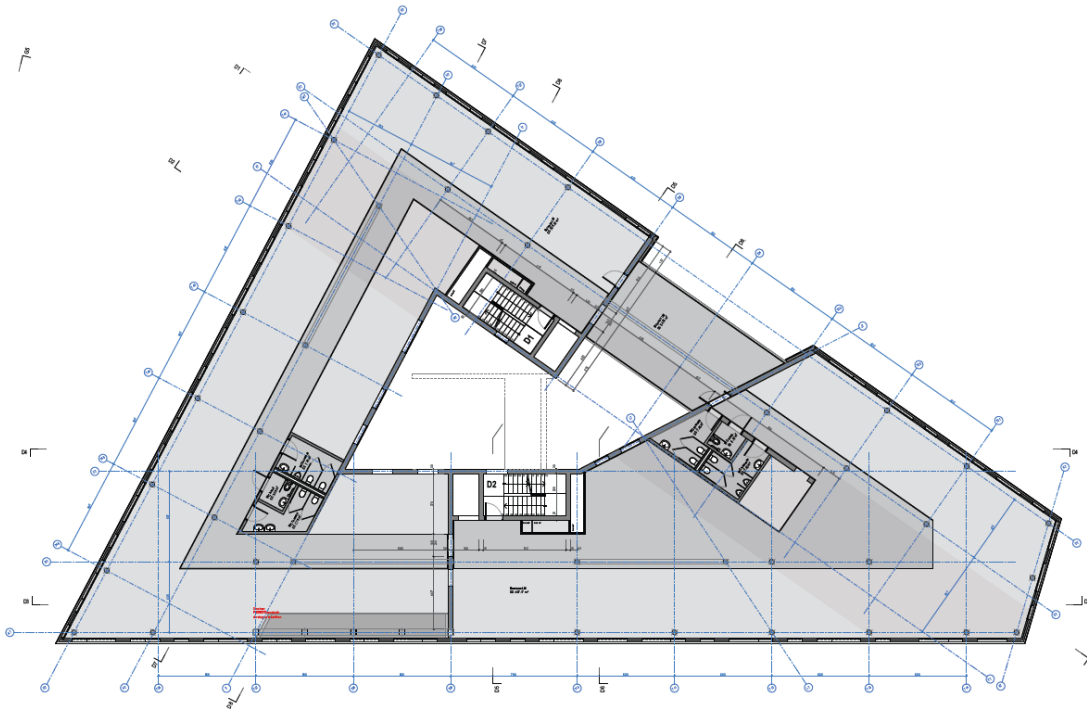


FIGURE 21 – Plan de l'étage type de la variante béton armé

## 4.1 Hypothèses

Par rapport au niveau de détail précédent les hypothèses prises en compte sont les suivantes :

1. Le dimensionnement se base sur le plan de l'étage R+4 (voir figure 21)
2. Les critères de calcul considérés sont :
  - La résistance structurale
  - La résistance en situation incendie
  - Les déformations
  - La vibration
  - Certains détails type de connexion
  - Les éléments de renforts au dessus des trous en façade (équivalent de la poutre Vierendeel)
  - L'isolation acoustique
  - Le système de régulation de la température.
3. Les critères d'optimisation sont les suivants, basés sur le métré de chaque solution :
  - Le prix par  $m^2$  : Les prix unitaires ont été définis suite à une discussion avec le service de valorisation gros oeuvre.
  - Les émissions de  $CO_2$  par  $m^2$  : Les facteurs d'émissions sont tirés de la KBOB.
  - La disposition des porteurs verticaux (doit garantir la libre circulation des techniques et des personnes, zones en gris foncé sur le plan à la figure 21)
4. A ce stade, on omet les aspects suivants :
  - Les considérations sismiques (mis à part la masse d'étage mais le calcul ne prend pas en compte les gains y relatifs)
  - Les gains liés aux fondations (pour la même raison que le point précédent)
  - L'isolation des compartiments coupe-feu
  - La zone de passerelle sur la droite du plan à la figure 21

## 4.2 Variante CLT orthotrope

Cette variante présente le processus actuel de fabrication de plancher en CLT (note de calcul CF annexe C). Les panneaux en CLT ont une inertie très préférentielle dans une direction par rapport à l'autre (orthotropie). La direction de transmission des efforts est donc imposée par le calepinage des panneaux. Les efforts sont ensuite transmis à des porteurs longitudinaux (poutres ou murs); ceux-ci peuvent être en acier, en bois ou en béton. Dans le cas de cette variante, les porteurs en acier ont été choisis de manière à faciliter l'assemblage avec les panneaux.

Cependant, comme tout plancher léger, les contraintes en matière d'isolation acoustique imposent de lester le plancher en CLT avec du gravier ou du sable, un matériau lourd, peu cher et ayant une empreinte carbone très faible.

De plus, une dalle en bois ne permet pas la disposition d'une dalle active (système de refroidissement en face inférieure de la dalle), qui était le système choisi pour la variante béton. Il faut donc considérer un surcoût et une dépense de CO<sub>2</sub> supplémentaire liés à l'installation d'un système de régulation de la température sous la forme d'îlots de faux plafonds rayonnants (voir figure 22).



FIGURE 22 – Exemple de faux plafond rayonnant

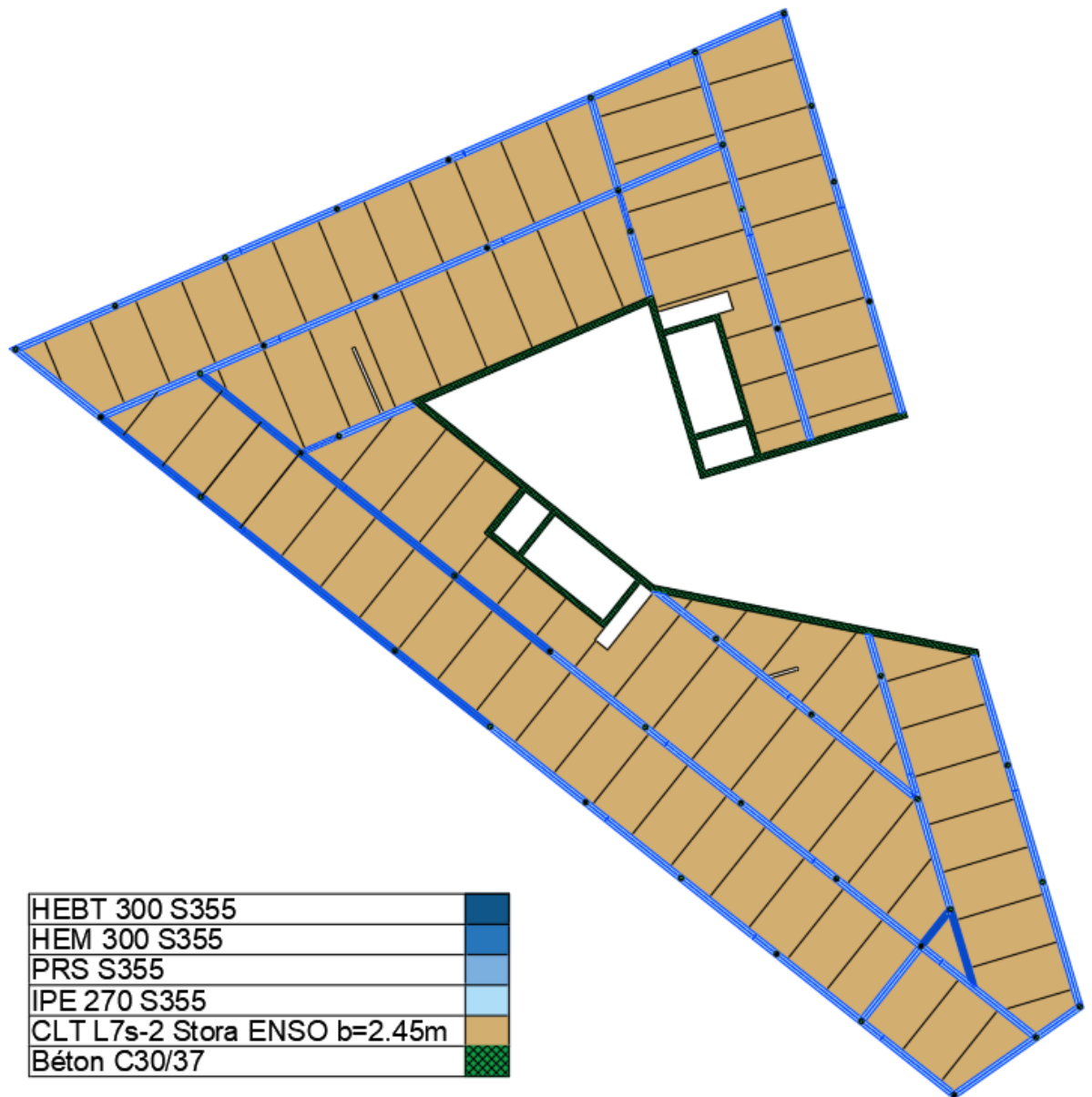


FIGURE 23 – Plan : CLT orthotrope

4.2 Variante CLT orthotrope

La combinaison de toutes ces informations permet le dimensionnement de la coupe type suivante :

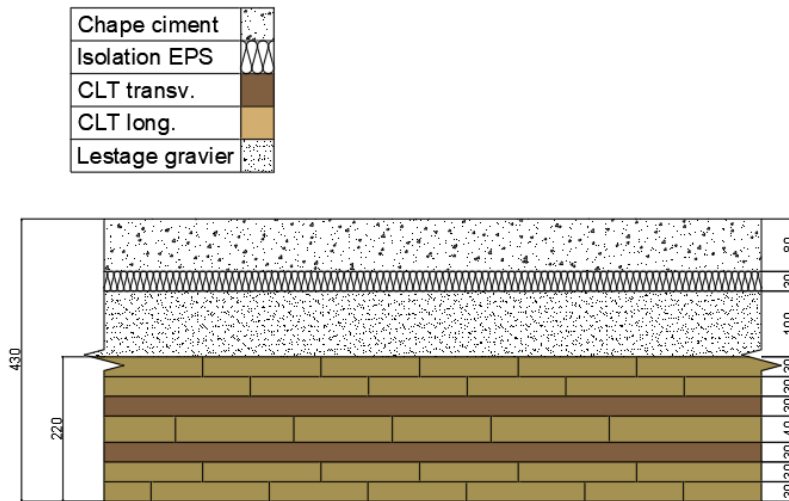


FIGURE 24 – Coupe type : CLT orthotrope

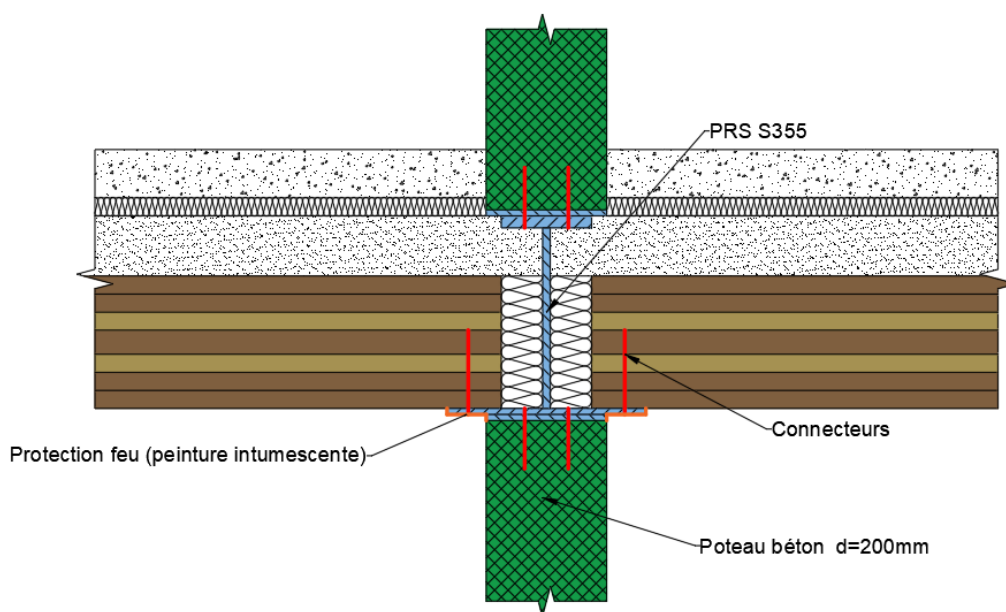


FIGURE 25 – Connexion poteau-dalle : CLT orthotrope



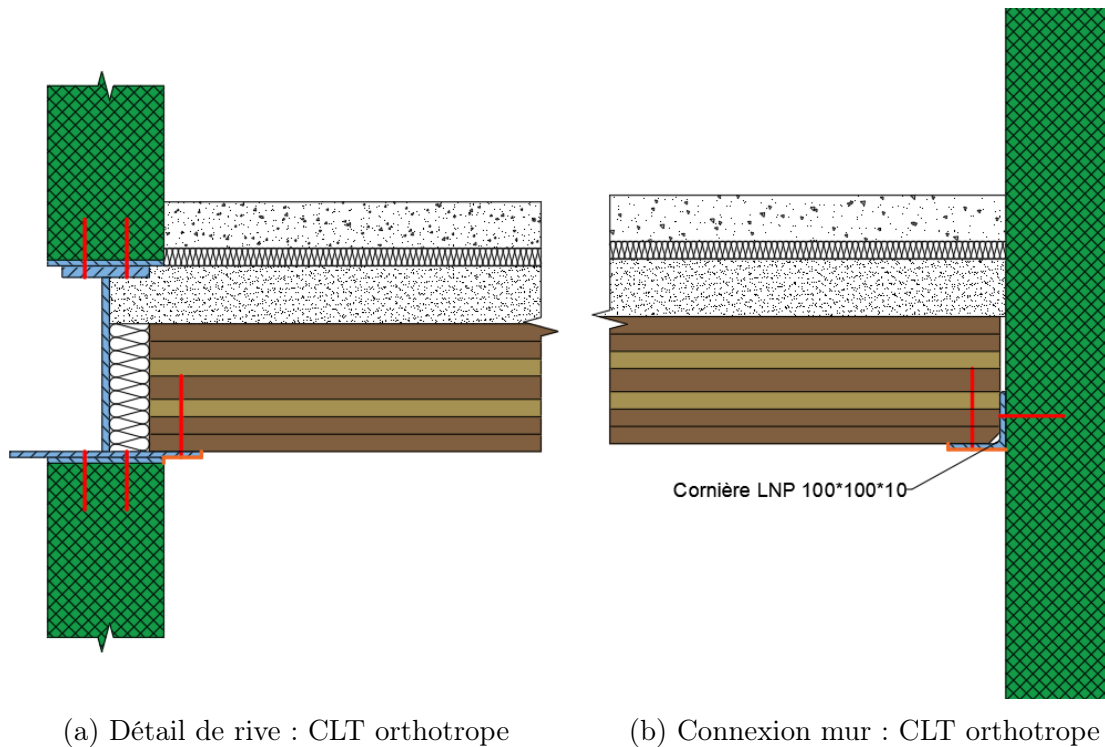


FIGURE 26 – Détails : CLT orthotrope

#### 4.2.1 Méthode constructive

Une fois la construction des fondations en béton achevée les étapes de constructions de la structure porteuse sont les suivantes :

1. On dispose les porteurs verticaux pour le premier étage (assemblage des piliers préfabriqués et coulage des murs).
2. On dispose la charpente métallique pour le premier étage (assemblages mécaniques avec les poteaux et les murs).
3. On dispose les panneaux en CLT pour le premier étage sur les ailes inférieures des profilés en acier (assemblages par vis par en dessous).
4. On dispose une planche en Kerto à la jonction entre chaque panneau afin d'éviter le pianotage.
5. On dispose les plaques de plâtre servant à la protection incendie des profilés en aciers.
6. On recommence avec le deuxième étage et ainsi de suite.

(Note de calcul cf annexe B)

### 4.3 CLT isotrope

Cette variante se base sur la technologie TS3[1] [8] développée par l'entreprise du même nom. Cette technologie consiste à coller des panneaux de CLT bout-à-bout de manière à former une dalle quasiment isotrope sans avoir à passer par des sommiers. Pour garantir cette isotropie, il a fallu développer un panneau en CLT dont l'épaisseur et l'orientation des différentes couches lui confèrent des inerties très proches dans le sens des fibres des plis extérieurs et dans le sens perpendiculaire aux plis extérieurs.

Cette solution a l'avantage de ne pas avoir de retombée en plafond ou en façade, ce qui permet un accrochage de la façade aussi simple que pour la variante en béton.

Tout comme la variante précédente, ce système porteur présente les mêmes inconvénients liés à l'isolation acoustique et à la régulation de la température. Les mêmes dispositions sont prises pour pallier à ce problème, à savoir le lestage par couche de gravier ou sable et l'installation d'îlots de faux plafond rayonnants.

(Note de calcul cf annexe C)



FIGURE 27 – Exemple de plafond technologie TS3 : Brunnen 2021



FIGURE 28 – Plan d'étage : CLT isotrope

4.3 CLT isotrope

La coupe type de cette solution est la suivante :

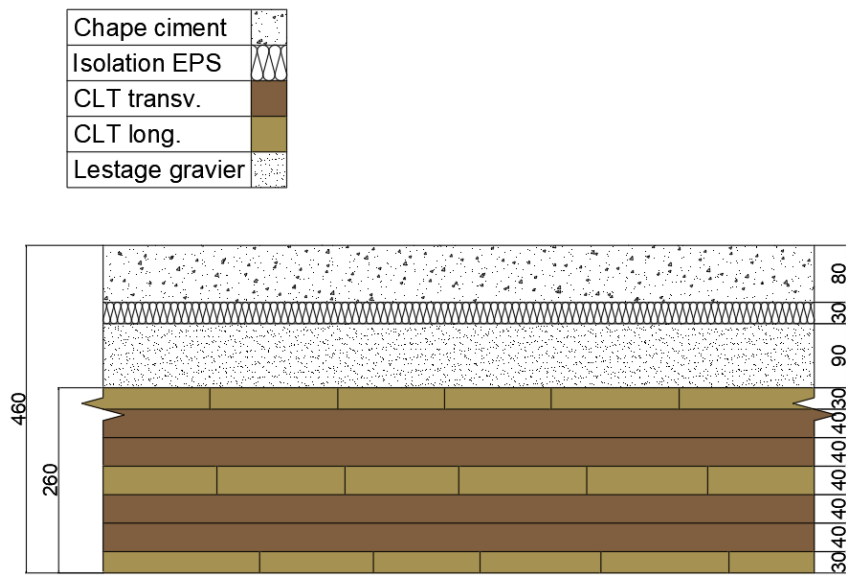


FIGURE 29 – Coupe type : CLT isotrope

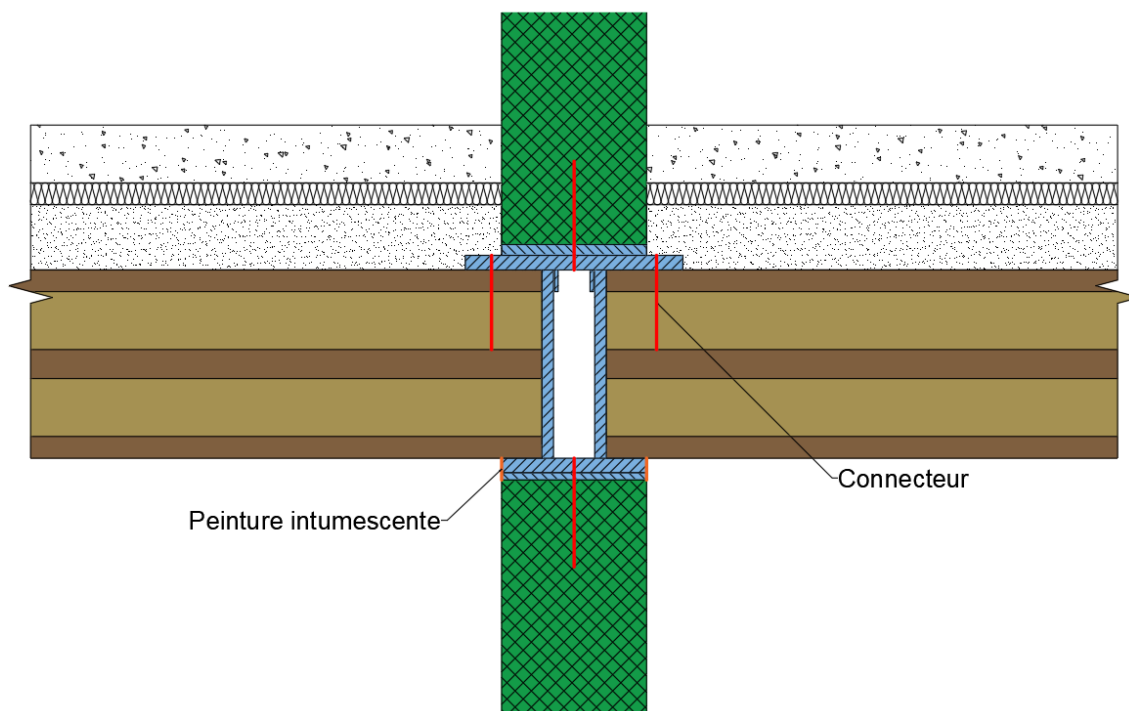


FIGURE 30 – Connexion poteau-dalle : CLT isotrope

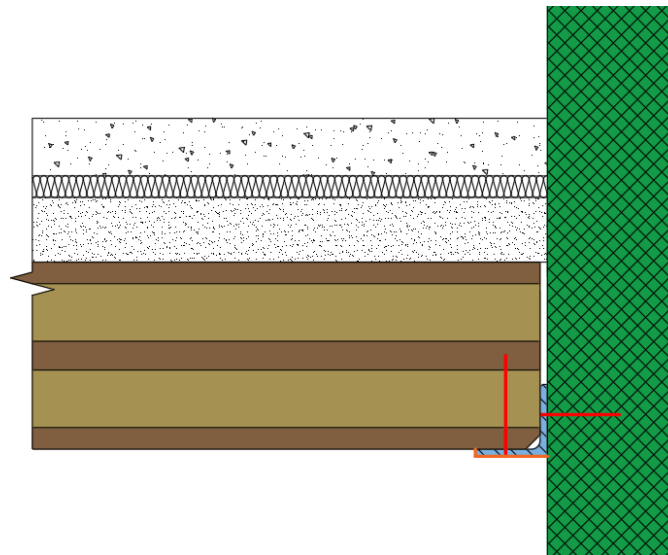


FIGURE 31 – Connexion mur-dalle : CLT isotrope

#### 4.3.1 Méthode constructive

De nouveau cette variante se concentre sur la partie hors-sol. C'est-à-dire à partir de la dalle du R+1. Les étapes de construction sont les suivantes :

1. Les panneaux en CLT sont assemblés par le fournisseur (Schilliger, StroaEnso, Piveteau Bois...), puis pré-traités par un preneur de licence TS3 (ce processus tient du secret professionnel).
2. Sur chantier on monte les piliers et les murs et on dispose des cornières qui viendront connecter les panneaux aux murs. On dispose également les pièces métalliques composant les têtes de poteaux dans l'attente des panneaux CLT.
3. On dispose des étais.
4. Les panneaux sont posés sur les têtes de poteaux, les cornières et les étais.
5. Les joints sont scellés.
6. On recommence au point 2 pour l'étage suivant.
7. Une fois les joints ayant pris, on des-étaie.



#### 4.4 Variante acier-béton mixte

Cette solution consiste en la solution usuelle de plancher collaborant sur sommiers métalliques, mais appliquée à une géométrie irrégulière. Il a été décidé de ne pas utiliser de poutraison secondaire, le comportement mixte de la dalle n'étant pas nécessaire (selon la méthode de la connexion partielle). Les éléments ne sont donc connectés que pour des raisons constructives et d'étanchéité.

C'est la solution la plus usuelle, les entreprises sont habituées à travailler avec ces matériaux. Le montage peut se faire rapidement.

Cette variante a l'avantage d'être assez lourde par elle même pour ne pas nécessiter de lestage. De plus l'acier de la tôle est un très bon conducteur thermique, ce qui permet l'utilisation d'une dalle active. Ainsi, on n'a pas besoin de considérer de surcoût ni de surcharge liés à l'un ou l'autre de ces systèmes.

(Note de calcul cf annexe D)



FIGURE 32 – Exemple de plancher mixte usuel

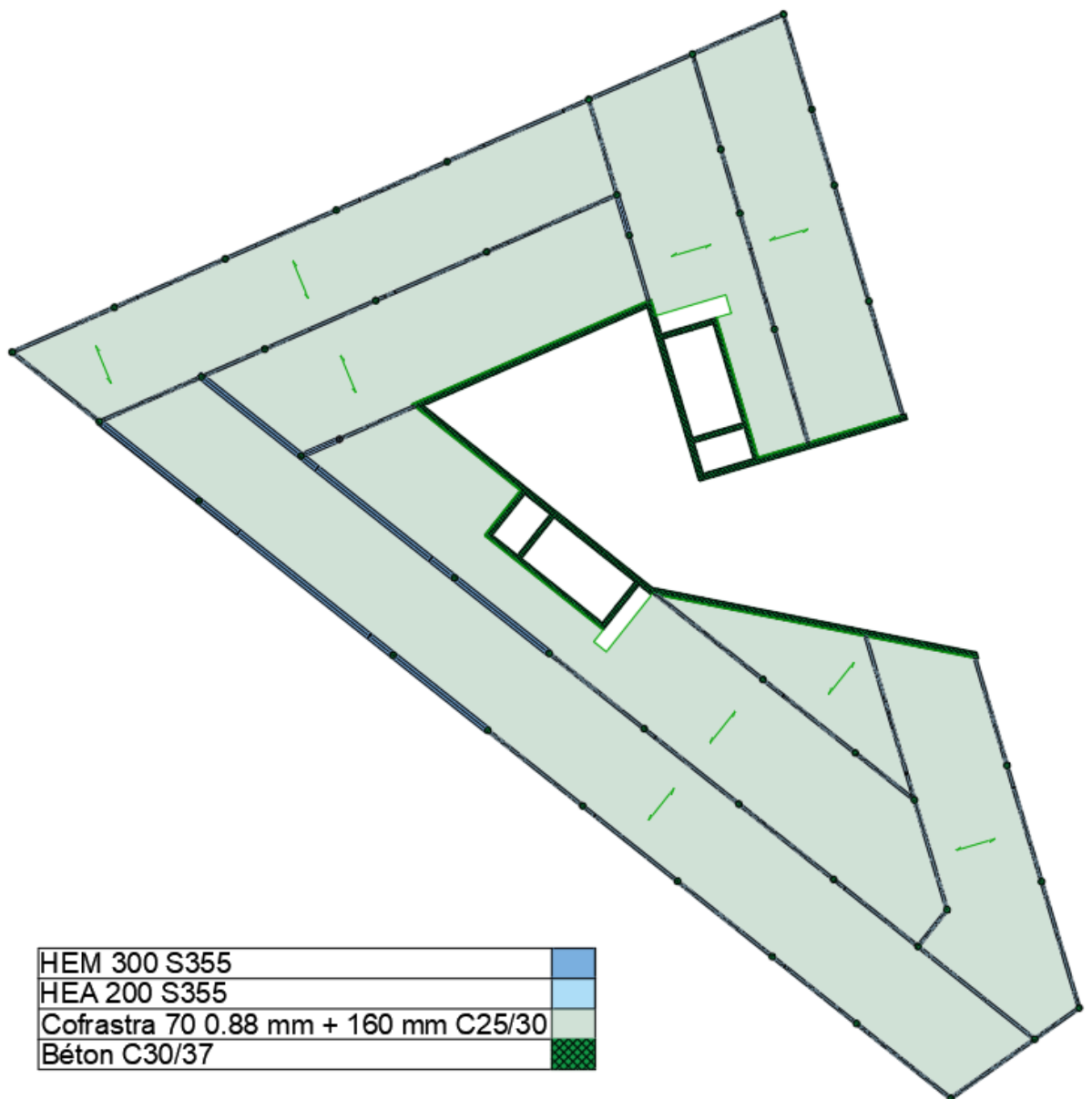


FIGURE 33 – Plan : ABM

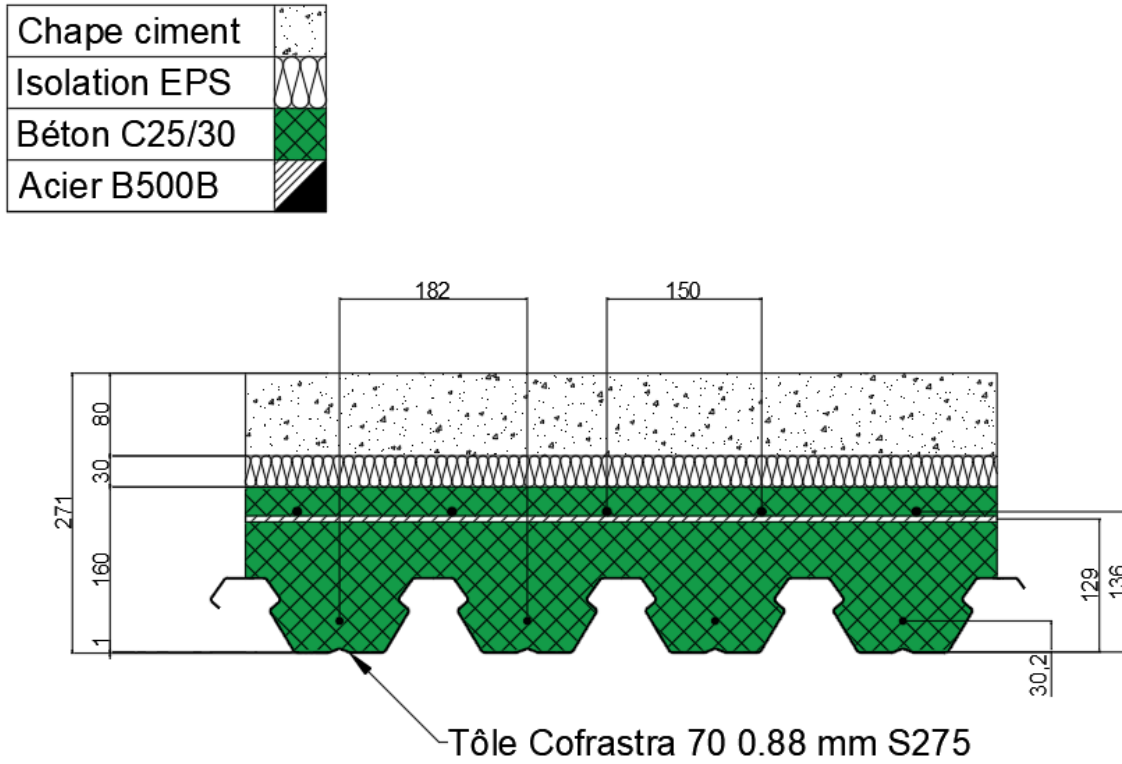


FIGURE 34 – Coupe type : ABM

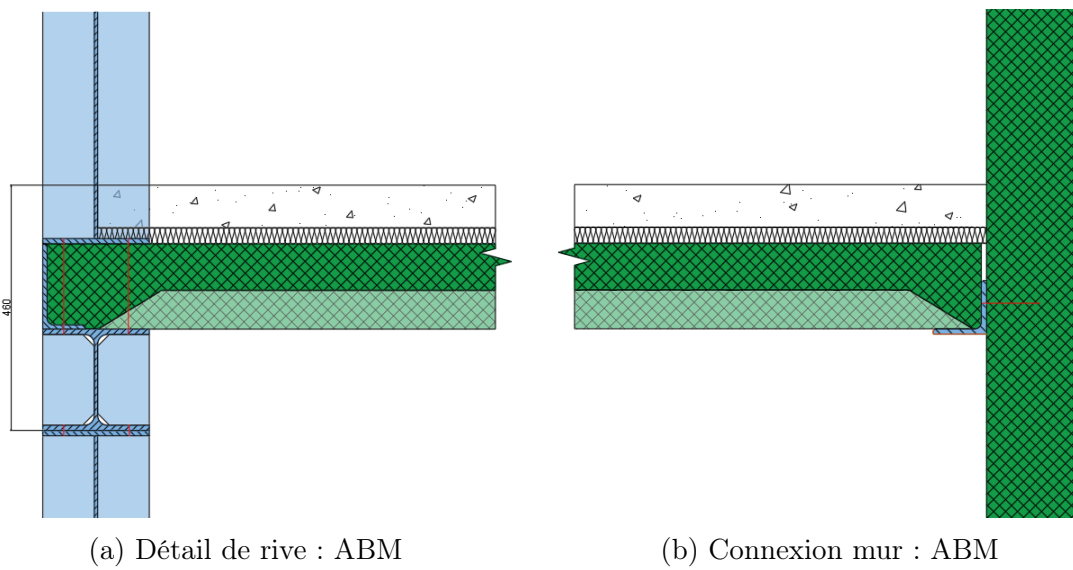


FIGURE 35 – Détails : ABM



#### 4.4.1 Méthode constructive

De nouveau cette variante se concentre sur la partie hors-sol, donc à partir de la dalle du R+1. Les étapes de construction sont les suivantes :

1. On monte les piliers et les murs.
2. On dispose des cornières qui viendront connecter les tôles aux murs. On dispose également la charpente métallique entre les porteurs verticaux.
3. On dispose des étais.
4. Les tôles sont posées sur la charpente, les cornières et les étais, on vérifie l'étanchéité du coffrage.
5. On dispose l'armature en dessus des tôles.
6. On coule le béton.
7. On recommence au point 2 pour l'étage suivant.
8. On des-étaie une fois que la résistance dalles des étages inférieurs permet de reprendre les charges des dalles en cours de construction.

## 5 Comparaison entre les variantes

Maintenant que les variantes ont été conçues, modélisées, dimensionnées et métrées, il est possible d'en comparer directement les performances.

### 5.1 Comparaison CO<sub>2</sub>

La première comparaison objective est la projection des émissions de CO<sub>2</sub> générées par les variantes (CF table1).

Émissions par variante [kgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]				
Composition	CLT orthotrope	CLT isotrope	ABM	"Béton CEM II"
Chape ciment	19,2	19,2	19,2	19,2
Isolant EPS	3,4	3,4	3,4	3,4
Dalle	48,4	57,3	86,5	100,7
Sommiers	24,1	3,9	19,5	0,0
Protection incendie	1,7	0,3	5,8	0,0
Poteaux	5,2	6,2	4,7	5,2
Murs	24,9	24,9	24,9	31,7
Régulation température	10,9	10,9	2,0	2,0
Lestage	3,6	3,2	0,0	0,0
Total	141,4	129,3	166,0	162,2
Relatif	0,87	0,80	1,02	

TABLE 1 – Émissions par variantes

Et sous forme de graphique :

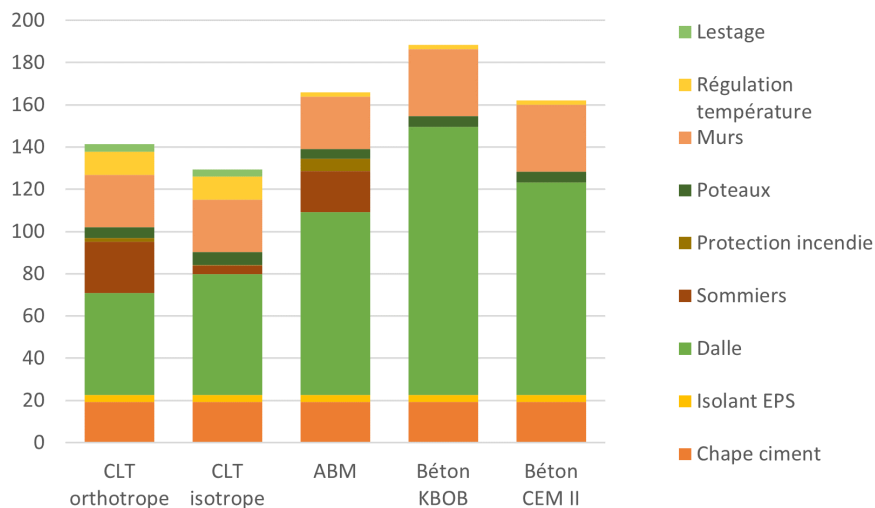


FIGURE 36 – Comparaison des émissions de CO<sub>2</sub>

La variante en CLT isotrope est la meilleure. Ce résultat confirme ceux obtenus lors de l'analyse d'une trame régulière. Les différences observées sont dues à l'ajout dans la comparaison des porteurs verticaux (piliers et murs) et des sommiers métalliques supplémentaires nécessaires à satisfaire la géométrie complexe du plan

d'étage. Ont également été pris en compte : les émissions supplémentaires liées aux dispositifs de régulation de température et de lestage. Bien que les variantes en CLT restent des alternatives viables au béton armé, d'un point de vue émissions de CO<sub>2</sub>, les dispositifs de lestage et de CVSE péjorent fortement les émissions des variantes CLT.

## 5.2 Comparaison coûts

La seconde comparaison objective est la projection des coûts. Ici les prix unitaires sont donnés en fourniture et pose, sensés représenter au mieux les frais de chantier finaux.

Coûts par variante [CHF/m <sup>2</sup> ]				
Composition	CLT orthotrope	CLT isotrope	ABM	Béton
Chape ciment	38	38	38	38
Isolant EPS				
Dalle	221,8	328,0	92,7	149,5
Sommiers	111,1	18,5	92,6	0,0
Protection incendie	12,3	2,1	42,2	0,0
Poteaux	29,9	35,6	22,1	35,6
Murs	41,0	41,0	41,0	52,2
Régulation température	61,5	61,5	30,0	30,0
Lestage	5,0	4,5	0,0	0,0
Total	520,6	529,2	358,6	305,3
Relatif	1,71	1,73	1,17	

TABLE 2 – Coûts par variantes

Et sous forme de graphique :

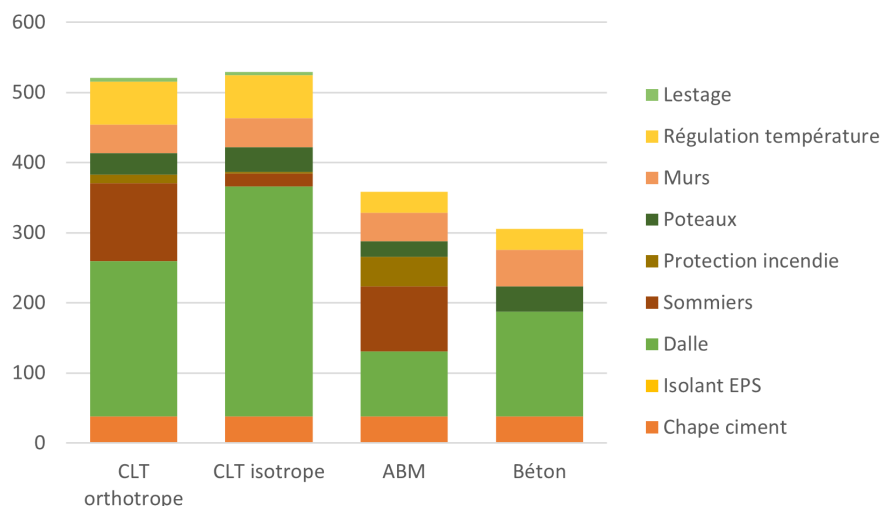


FIGURE 37 – Comparaison des coûts

Sans surprise, toutes les variantes sont plus chères que celle en béton armé. On remarque également une part non variable des coûts et des émissions liées aux

CEA (chape et isolation). Les solutions CLT devant être lestées sont aussi celles dont le système de régulation de température est le plus onéreux. Cela impacte très négativement la compétitivité de ces solutions.

### 5.3 Synthèse de la comparaison

En superposant ces graphiques on peut essayer de séparer les différentes variantes.

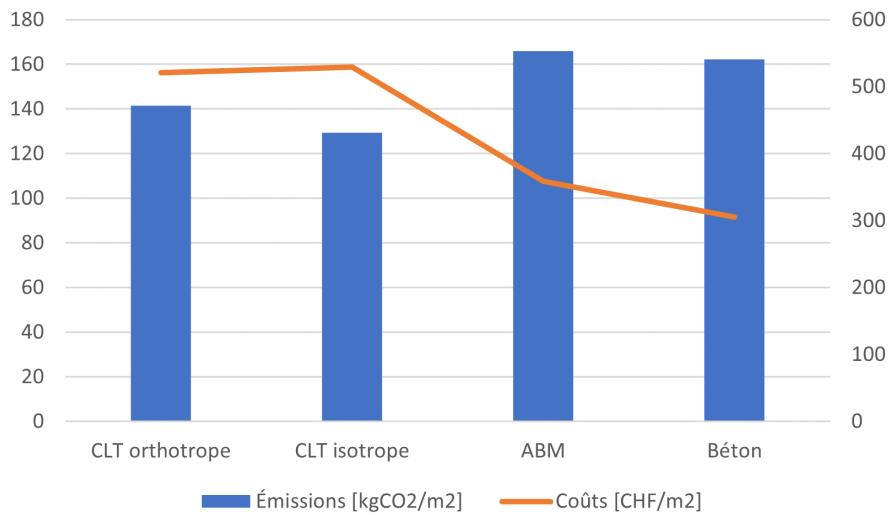


FIGURE 38 – Comparaison émissions/prix

On remarque que, comme précédemment, les émissions de CO<sub>2</sub> sont corrélées négativement avec le prix.

En mettant ces deux paramètres en relation on obtient le graphe suivant :

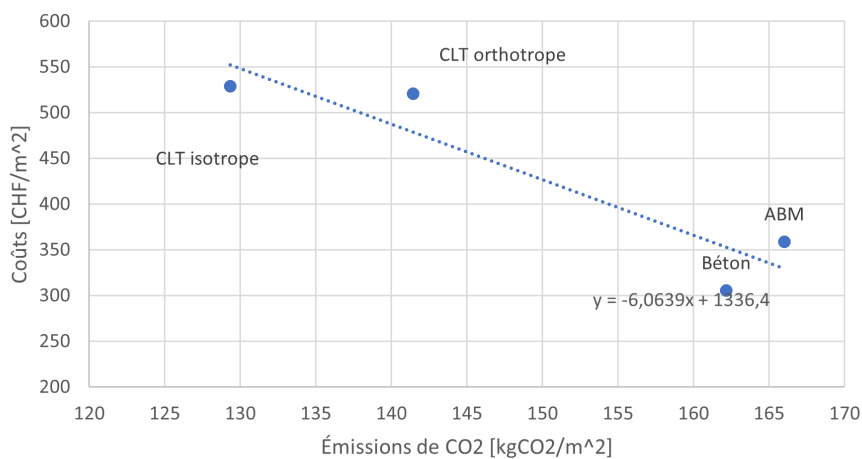


FIGURE 39 – Relation émissions/prix

Cette fois aussi une tendance semble se profiler mais les différences observées entre variantes ne sont pas aussi marquées que lors de la comparaison précédente.

Une méthode d'analyse plus complète est donc nécessaire afin de sélectionner la meilleure variante.

## 5.4 Processus analytique

La comparaison de ces trois variantes ne peut pas se faire sur des critères d'émissions et de prix uniquement (même si ceux-ci sont primordiaux). Il a été décidé de développer une liste de critères et de noter chacun de ces critères d'une manière similaire à celle utilisée dans les appels d'offre.

Ce processus se formalise dans un tableau multicritères. Les conclusions tirées de la comparaison des émissions, des méthodes constructives et des coûts permettront de mettre une note à chacune des variantes pour les critères concernés.

Les notes vont de 0 à 100. Afin de calibrer la comparaison, une note de 50 est assignée à chaque critère pour la solution en béton armé, les autres notes sont assignées en évaluant la performance de chaque variante, pour chaque critère, relativement à la performance de la solution en béton armé.

Les critères n'ayant pas tous la même importance, des facteurs de pondération sont calculés en effectuant une analyse multicritères hiérarchique.

### 5.4.1 Critères considérés

Les critères considérés pour cette analyse sont les suivants :

#### 1. Critères techniques

- Possibilité de préfabrication : il serait bénéfique de pouvoir assembler des éléments préfabriqués plutôt que de tout faire sur site.
- Facilité d'accrochage de la façade : les variantes ne permettent pas nécessairement d'accrocher la façade avec autant d'aisance que la solution en béton, il faut en prendre compte.
- Répercussion sur les CVSE : Devra-t-on prendre des dispositions particulières pour les CVSE ? Leur circulation pourrait être entravée par des retombées de sommiers et donc requérir des ajustements supplémentaires.
- Descente de charge : évaluation du poids de la structure et impact sur les dimensions de la fondation.

#### 2. Critères sociaux

- Finitions : propreté des finitions, peinture intumescence, flocage, plaque de plâtre irrégulières.
- Apparence CVSE : possibilité d'avoir des CVSE circulant organiquement au plafond et éventuellement des gaines de ventilation en textile.
- Surface utile : la position des porteurs peut avoir un impact sur la surface utile, les sommiers en façade également.
- Bois apparent : on considère le bois apparent comme étant plus chaleureux et donc bénéfique.

## 3. Critères environnementaux

- Tonne d'acier : plus la note est haute plus les émissions de CO<sub>2</sub> associées sont basses.
- Volume de béton : plus la note est haute plus les émissions de CO<sub>2</sub> associées sont basses.
- Volume de bois : plus la note est haute plus les émissions de CO<sub>2</sub> associées sont basses.
- Surface de plâtre : plus la note est haute plus les émissions de CO<sub>2</sub> associées sont basses.
- Surface de façade : plus la note est haute plus les émissions de CO<sub>2</sub> associées sont basses.
- Besoin de maintenance : prends en compte les émissions de CO<sub>2</sub> engendrées par les travaux. de maintenance propre à chaque typologie.
- Déconstructabilité : possibilité de réemploi des matériaux en fin de cycle de vie.

## 4. Critères budgétaires

- Fourniture : prix d'achat et de livraison des matériaux.
- Frais de chantier : coûts liés aux équipements de chantier, y compris sécurité. Très liés aux mode constructif de la variante.
- Main d'oeuvre : Salaire des ouvriers et autre personnel travaillant sur le chantier. Dépendant de la cadence de montage.
- Maintenance : coûts des opérations de maintenance propres à chaque variante.
- Exploitation : prend en compte la possibilité qu'une variante engendre des frais d'exploitation supplémentaires.

**5.4.2 Analyse multicritères hiérarchique**

Le principe de cette méthode d'analyse est de comparer chaque critère avec tous les autres dans une matrice [14].

	Technique	Social	Environnement	Budget
Technique	1	2	1/7	1/5
Social	1/2	1	1/9	1/7
Environnement	7	9	1	1
Budget	5	7	1	1

TABLE 3 – Exemple de matrice de comparaison

Chaque élément de la matrice compare l'importance du critère de la i-ème ligne avec le critère de le j-ème colonne et montre une importance relative selon le tableau ci-dessous (table 4) :

Pondération des comparaisons par paires		
Intensité de l'importance	Définition	Explication
1	Importance égale	Les deux éléments contribuent de manière égale à l'objectif
3	Importance modérée	Un élément est légèrement favorable vis-à-vis de l'autre
5	Importance marquée	Un élément est fortement favorable vis-à-vis de l'autre
7	Importance très marquée	Un élément est très fortement favorisé vis-à-vis de l'autre
9	Importance absolue	Un élément doit absolument primer sur l'autre

TABLE 4 – Explication des importances

Ensuite les poids sont déterminés de la manière suivante :

Soit  $A_{n \times n}$  la matrice de comparaison et  $A_{i,j}$  ses composants

1. On normalise la matrice en divisant chaque composant par la somme de sa colonne :

$$A_{n \times n}^* = \frac{A_{i,j}}{\sum_{i=1}^n A_{i,j}} \quad (2)$$

2. Les poids sont égaux à la moyenne par ligne des composants de la matrice  $A^*$

$$w_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n A_{i,j}^* \quad (3)$$

Donc par exemple la table 3

$$A_{4 \times 4} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1/7 & 1/5 \\ 1/2 & 1 & 1/9 & 1/7 \\ 7 & 9 & 1 & 1 \\ 5 & 7 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\Rightarrow A_{4 \times 4}^* = \begin{pmatrix} 0,07 & 0,12 & 0,06 & 0,09 \\ 0,04 & 0,06 & 0,06 & 0,06 \\ 0,52 & 0,41 & 0,44 & 0,43 \\ 0,37 & 0,41 & 0,44 & 0,43 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\Rightarrow w_i = \begin{pmatrix} 0,08 \\ 0,05 \\ 0,45 \\ 0,41 \end{pmatrix} \quad (6)$$

En répétant ce processus pour tous les critères, on obtient l'arbre décisionnel suivant :

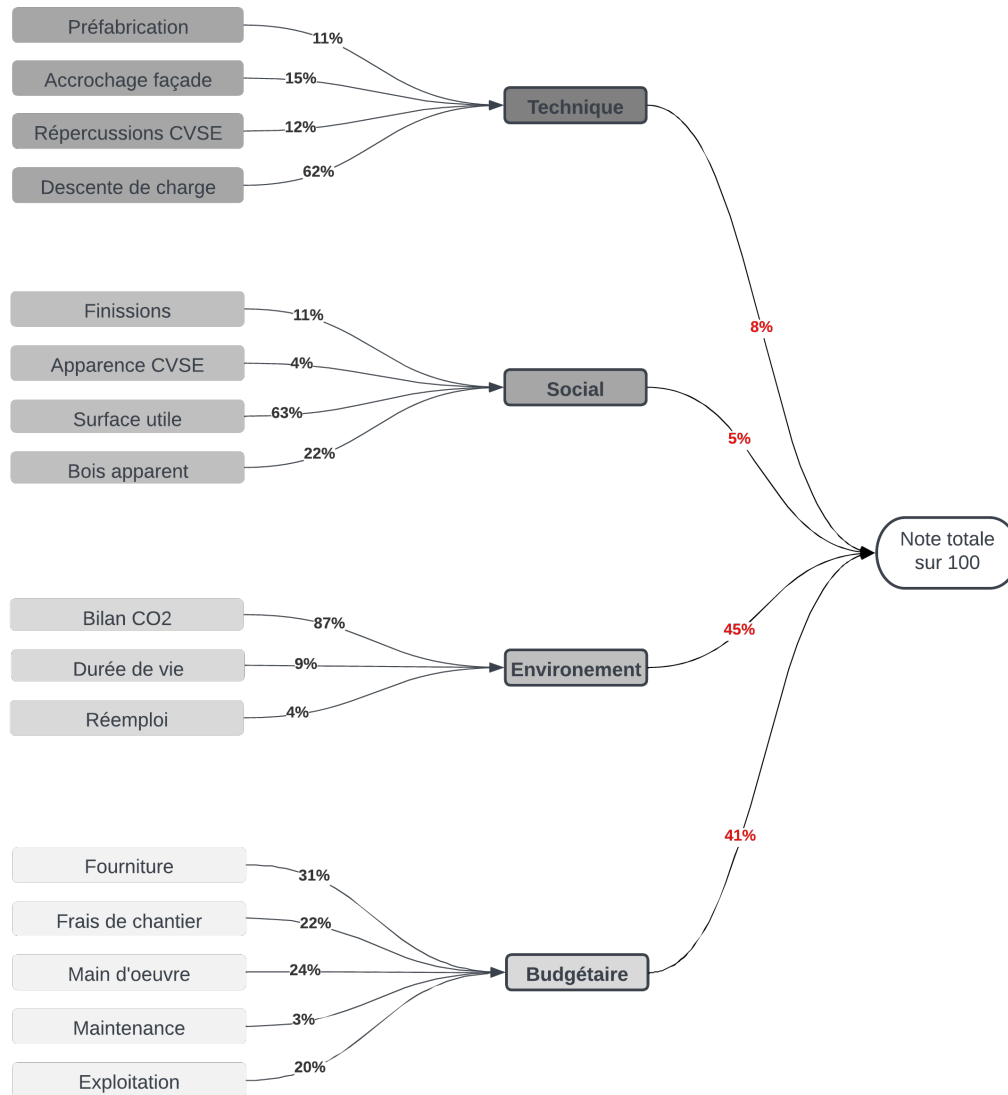


FIGURE 40 – Arbre décisionnel : critères analyse hiérarchique

Les pondérations obtenues par l'analyse hiérarchique sont basées sur l'appréciation d'une personne de l'importance des critères par rapport aux autres. Afin de minimiser ce biais, les importances des critères ont été discutées avec trois personnes de différents services. Cela permet d'obtenir une moyenne des différentes appréciations.

### 5.4.3 Critères appel d'offre

Dans la réalité, l'importance des critères techniques, sociaux, environnementaux et budgétaires sont déterminés pour chaque projet par le maître d'ouvrage. À titre de comparaison, les notes de ces rubriques ont également été soumises aux pondérations d'un appel d'offre auquel Losinger avait répondu.

Ces pondérations sont les suivantes :

- Concept architectural : 20%



- Technique : 20%
- Social : 10%
- Environnement : 20%
- Budget : 30%

Le concept architectural ne faisant pas partie de cette étude, la pondération associée a été diluée dans l'aspect social et les pondérations restantes ont été ajustées afin d'avoir leur somme égale à 100%, ce qui donne les pondérations ajustées suivantes :

- Technique : 22%
- Social : 22%
- Environnement : 22%
- Budget : 33%

L'arbre décisionnel associé à cette pondération est le suivant :

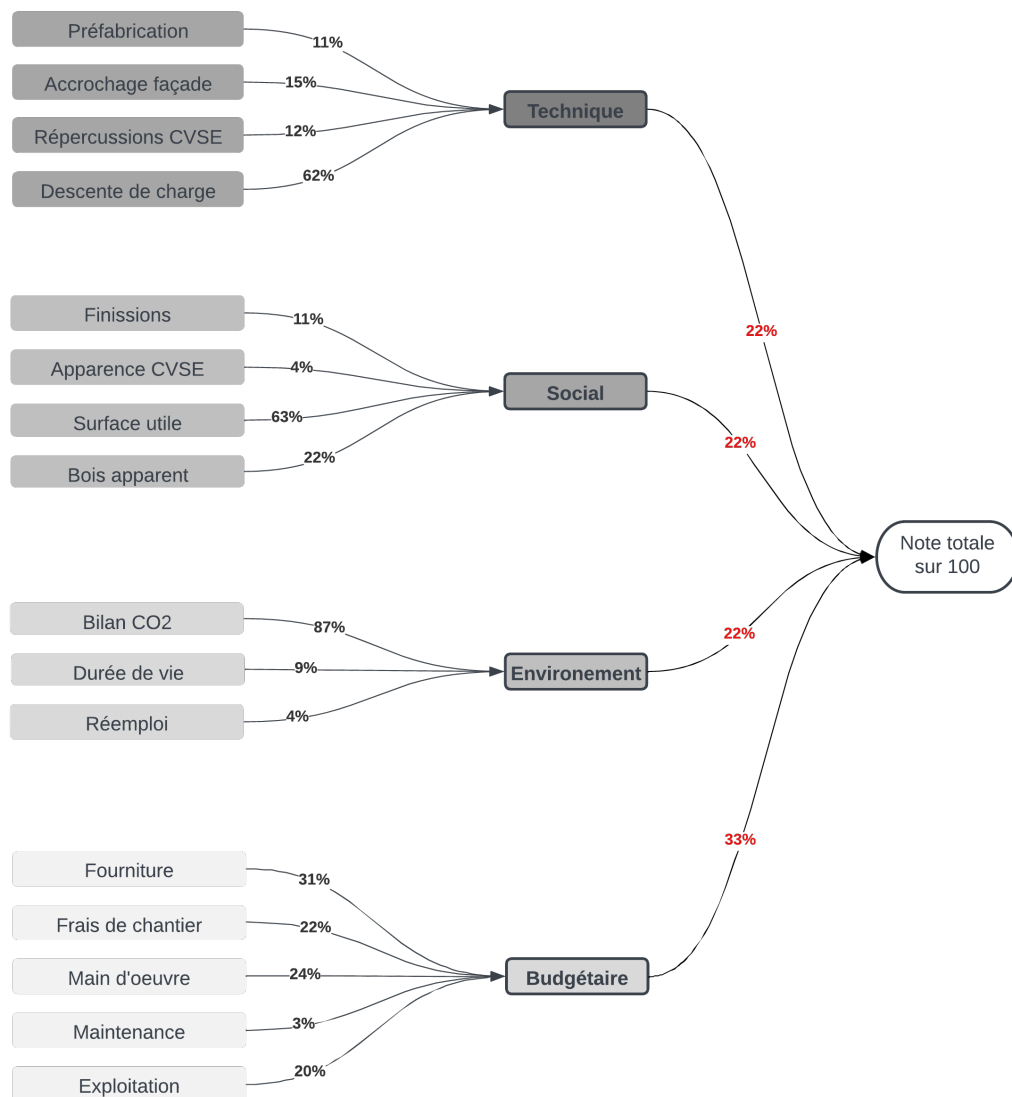


FIGURE 41 – Arbre décisionnel : critères appel d'offre

## 5.5 Conclusion et choix

Le tableau multi-critère a été rempli selon les considérations énoncées au chapitre 5.4. À des fins de comparaison, les notes sont calibrées sur la variante en béton armée. Toutes les notes sont donc le reflet d'une amélioration ou d'une régression relative par rapport à la solution en béton armé.

Les notes de chaque critère et pour chaque variante sont résumées dans le tableau 42 :

Tableau multi-critères	Notes variantes sur 100			Base
	CLT orthotrope	CLT isotrope	Acier-béton mixte	Béton In-situ
<b>Technique</b>	56	65	56	50
Modes & détails constructifs	47	72	38	50
Préfabrication	70	90	50	50
Facilité d'accrochage de la façade	30	60	30	50
Conception	59	63	62	50
Répercussion sur les CVSE	30	50	20	50
Descente de charge	65	65	70	50
<b>Social</b>	54	62	47	50
Apparence	46	50	43	50
Finitions (faux plafond)	45	50	40	50
Gainés textiles	50	50	50	50
Confort	60	70	50	50
Surface utile	48	40	48	50
Bois apparent	60	70	50	50
<b>Environnement</b>	56	57	48	50
Bilan CO2	56	58	49	50
Tonnes d'acier	40	50	36	50
Volume de béton	100	100	74	50
Volume de bois	27	10	50	50
Surface de placo	42	50	34	50
Surface de façade	47	41	42	50
Durée de vie	40	48	30	50
Besoin de maintenance	40	48	30	50
Possibilité de réemploi des matériaux	80	60	60	50
Déconstructibilité	80	60	60	50
<b>Budgétaire</b>	34	33	44	50
Coûts initiaux	29	28	43	50
Fourniture	25	25	40	50
Frais de chantier	24	20	38	50
Main d'œuvre	40	40	50	50
Coûts de maintenance	50	50	50	50
Maintenance	50	50	50	50
Exploitation	50	50	50	50

FIGURE 42 – Tableau multi-critères

En appliquant les deux pondérations (Analyse hiérarchique et Appel d'offre), les notes finales sont respectivement :

Tableau multi-critères	Pondération	Notes variantes sur 100			Base
		CLT orthotrope	CLT isotrope	Acier-béton mixte	Béton CEM II
<b>Technique</b>	<b>8%</b>	53	74	56	50
<b>Social</b>	<b>5%</b>	54	68	47	50
<b>Environnement</b>	<b>45%</b>	59	64	50	50
<b>Budgétaire</b>	<b>41%</b>	34	33	44	50
Note totale sur 100		47	48	47	50

FIGURE 43 – Notes : critères analyse hiérarchique

Tableau multi-critères	Pondération	Notes variantes sur 100			Base
		CLT orthotrope	CLT isotrope	Acier-béton mixte	Béton In-situ
Technique	22%	58	61	56	50
Social	22%	54	62	47	50
Environnement	22%	56	57	48	50
Budgétaire	33%	34	33	44	50
Note totale sur 100		49	51	48	50

FIGURE 44 – Notes : critères appel d'offre

Les résultats de cette analyse sont les suivants :

1. Aucune des variantes étudiées n'est fondamentalement meilleure que la variante de base en béton armée.
2. Les gains en CO<sub>2</sub> sont modérés, pour certaines applications (murs, dalles actives), le béton reste le matériau le plus efficace.
3. La variante la plus efficace dans ce cas semble être la dalle en CLT collé bout-à-bout (fonctionnement isotrope).

Les résultats de cette analyse ne sont pas significatifs. Les performances espérées des variantes à structure porteuse "bas carbone" sont lourdement péjorées par des exigences de confort tels qu'une isolation acoustique et un système de régulation de la température très performants.

De la même manière, la géométrie complexe du bâtiment induit une surconsommation de matériaux, principalement sur les sommiers métalliques et sur la position de certains porteurs verticaux. De plus, cette géométrie ne permet pas d'utiliser de système de plancher en bois massif dont les performances CO<sub>2</sub> sont les meilleures.

Au final, vu les écarts types très faible des notes (1.47% et 1.35%), toutes les variantes semblent être un choix valide pour la modélisation complète du bâtiment. Il a donc été décidé de poursuivre l'étude de la variante **CLT isotrope** pour les raisons suivantes :

1. Malgré son coût très élevé, c'est la variante avec le meilleur bilan carbone projeté.
2. C'est une solution novatrice pour laquelle Losinger-Marazzi a un certain intérêt.
3. Par intérêt personnel.

Le récapitulatif des différentes réflexions, pistes et choix est explicité à la figure 45.

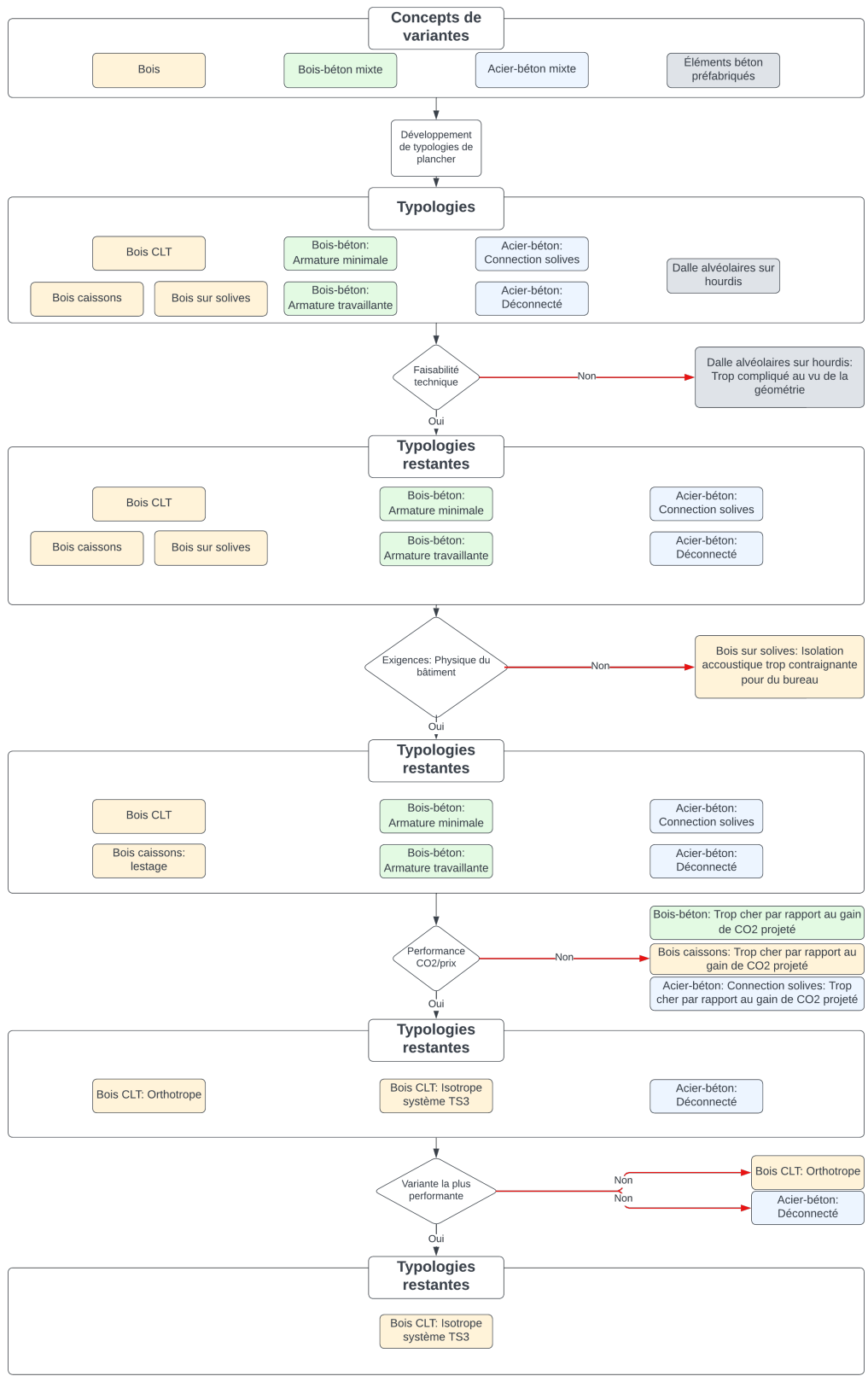


FIGURE 45 – Schéma du processus

## Troisième partie

# Approfondissement de la variante CLT isotrope

La seconde partie de ce travail de master se focalise sur une variante spécifique du bâtiment de bureau, mettant en avant la conception et le dimensionnement durable en utilisant des planchers en bois. Après avoir examiné diverses options dans la première partie, nous avons identifié cette variante comme une solution prometteuse en termes de durabilité, d'efficacité énergétique et de performance environnementale.

Cette partie de l'étude se concentre sur l'application généralisée de cette variante de plancher bois sur l'ensemble du bâtiment, en explorant ses avantages potentiels, ses défis et les mesures spécifiques à prendre pour garantir une mise en œuvre réussie. En adoptant une approche holistique, nous visons à démontrer comment l'utilisation du bois comme matériau de construction principal peut contribuer à une conception architecturale durable, répondant aux enjeux environnementaux actuels tout en créant un environnement de travail agréable et sain.

## 6 Dimensionnement

Avant toute analyse, il est absolument nécessaire que le concept étudié satisfasse à toutes les exigences statiques, sans quoi, toute conclusion serait irrecevable. Ce chapitre se concentre donc sur l'explication du concept statique de base, la note de calcul détaillée se trouve à l'annexe E.

Pour ce niveau de détail, on considère en plus de tout le reste :

- Les actions sismiques :  
La diminution de la masse d'étage induit une diminution des efforts sismiques.
- La descente de charge :  
Le poids propre des étages est amoindri et donc les efforts dans les fondations sont également réduits et par conséquent, leurs dimensions.

### 6.1 Concept de reprise des efforts sismiques

Un tremblement de terre induit des déplacements et des accélérations dans les 3 dimensions mais étant donné la très bonne résistance des bâtiments aux charges verticales, les faiblesses structurales sont en général dues aux action horizontales.

La variante en béton armé originale présente un concept de reprise des efforts sismiques très dense (voire figure 46a). Une multitude de murs en béton armé assurent la transmission vers le sol des efforts horizontaux. Ce concept très trapu et très rigide impose une période fondamentale très faible ainsi qu'une capacité de déformation extrêmement faible ( $q=1.5$ ). Ce type de système fonctionne mais est très gourmand en béton et en armature. De plus il ne paraît pas justifié étant donné la localisation du bâtiment : zone sismique Z1b et classe de sol E, ce qui n'induit pas d'efforts très importants. Les murs avaient une épaisseur de 25 à 30 cm avec un ratio

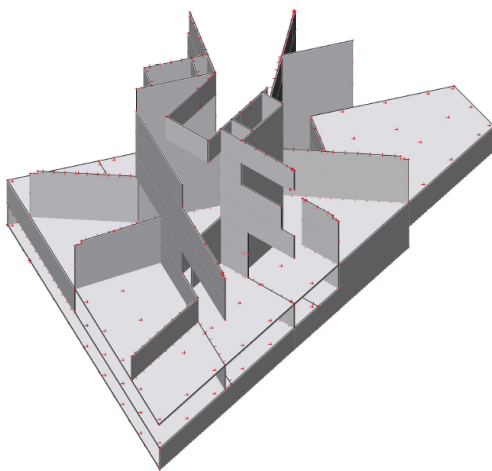
d'armature de 14 à 160 kg/m<sup>2</sup>.

Le concept initial paraît déjà très robuste, mais si on ajoute à cela la réduction de 35% de masse d'étage un meilleure utilisation des matériaux est possible. On choisit alors de limiter les murs sismiques aux cages d'escaliers et d'ascenseurs (les voies de fuites devant impérativement être coupe-feu et dans un matériau ininflammable). Afin de limiter les déformations différentielles entre les deux noyaux, il a été décidé de les joindre au dernier étage afin de former un **cadre rigide** dans la direction faible des noyaux.

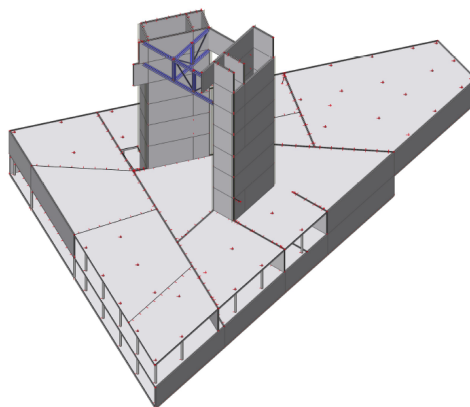
Les autres cloisons sont initialement conçues en béton armé mais on pourrait aussi les imaginer en briques de terre crue (de type Terrabloc<sup>TM</sup>) pour un meilleur rendement CO2.

Cette option, bien que prometteuse, impliquerait des dispositions et des ajustements dus à la plus faible résistance à la compression des briques (9MPa) et à son impossibilité d'avoir un fonctionnement voile. Les efforts devraient donc être transmis aux porteurs par un sommier.

Une étude plus approfondie étant nécessaire avant de pouvoir implémenter ce concept, celui-ci va rester au rang de piste d'amélioration.



(a) Murs béton variante initiale



(b) Murs sismiques variante finale

FIGURE 46 – Concepts de reprise des efforts sismiques

Les murs sismiques ainsi conçus ont été dimensionnés itérativement afin d'approcher au mieux l'état de fissuration du béton et sa rigidité.

Mur	nombre	longueur [m]	largeur [m]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	ratio armature [kg/m <sup>3</sup> ]	taux d'armature
long	4	7,245	0,22	3196	1861	7847	97,1	1,24%
court	6	2,875	0,22	1036	484	1119	81,2	1,03%

On atteint donc une rigidité aux alentours de 50% de la rigidité initiale et admet un coefficient de comportement de 2.

Au final, sur les murs sismiques, on économise 12 à 25% du volume de béton et 40% de l'armature. Ce résultat est à tempérer par le remplacement des murs non sismiques par des cloisons en béton, en plâtre ou en maçonnerie (béton avec armature minimale dans ce cas).

## 6.2 Concept de descente de charge

La descente de charge est impactée au global par la réduction de la masse des planchers. La première influence sur la conception est la réduction des sections des piliers. Ceux-ci ont toutefois une dimension minimale de 20 cm de diamètre pour des raisons de sécurité à l'incendie, ce qui limite les gains possibles, excepté pour le dernier étage qui est dépourvu d'exigences en matière de résistance au feu.

Dans le concept initial, le sol est très hétérogène. Afin d'éliminer de potentiels tassements différentiels, il a été décidé de faire reposer l'extrémité sud-est de la structure sur des pieux de 60 cm de diamètre et de 12 m de profondeur.

La masse d'étage est réduite de 35% ce qui a une répercussion sur les efforts transmis aux fondations. Dans le cas d'étude, cela équivaut à une réduction de 25% de la résultante des réactions. Cette différence a l'avantage de réduire les sollicitations sur les fondations, donc leurs dimensions et finalement leurs émissions de gaz à effet de serre et leur coût :

- **Pieux** : Inchangés
- **Radier** : Épaisseur réduite de 42 cm à 36 cm (issu d'une règle de calcul tenant compte de l'interaction sol structure - c'est-à-dire au prorata des rigidités)
- **Surprofondeurs** : Dimensionnées à la flexion et au poinçonnement

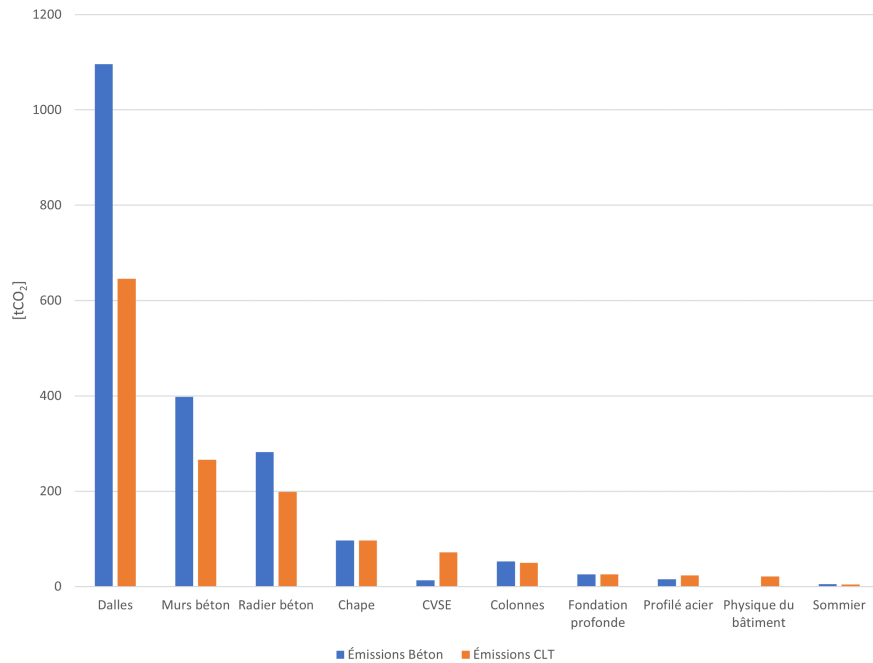
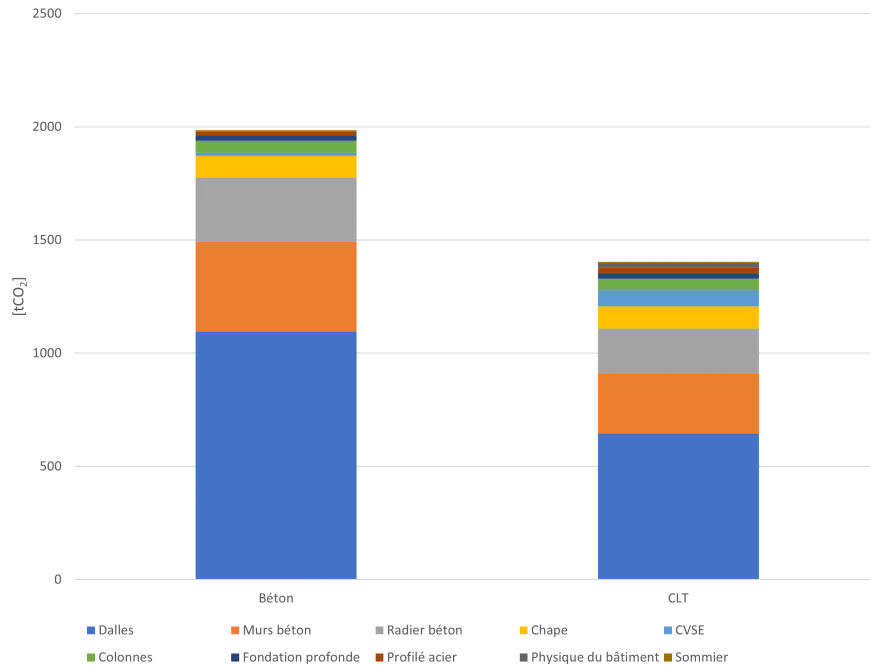
## 7 Performances de la variante CLT

Une fois le dimensionnement fait, l'étape suivante a été le métré de tous les éléments constituant l'ouvrage. Pour ce faire, SCIA dispose d'un outil permettant de mesurer tous les volumes, toutes les surfaces, toutes les longueurs et toutes les masses des éléments de construction constituant le bâtiment. À ces éléments ont également été ajoutés :

- l'armature des éléments en béton armé,
- les éléments d'assemblage (cornières, appareils d'appuis sur les colonnes),
- les éléments de revêtement (chape, isolation et lestage)
- les fondations (surprofondeurs et pieux)
- les éléments de CVSE (faux plafonds rayonnants/dalles actives)

Sur la base de ces quantités, on a pu dériver les émissions de CO<sub>2</sub> et le prix de chacun de ces éléments, et les trier selon différents critères afin de les comparer à la solution construite.



7.1 Performances CO<sub>2</sub>FIGURE 47 – Émissions de CO<sub>2</sub> par élément de constructionFIGURE 48 – Émissions de CO<sub>2</sub> par élément de construction et totales

Le premier constat qui ressort de cette analyse est que tous les éléments les plus gourmands en CO<sub>2</sub> le sont moins dans la variante en CLT par rapport à la variante en béton. Deuxièmement, les gains liés à la réduction de la masse d'étage (-10% des émissions totales) permettent de rattraper un peu les pertes liées aux

exigences acoustiques et thermiques. Au total, cette solution permettrait de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 29.3%

## 7.2 Performances coûts

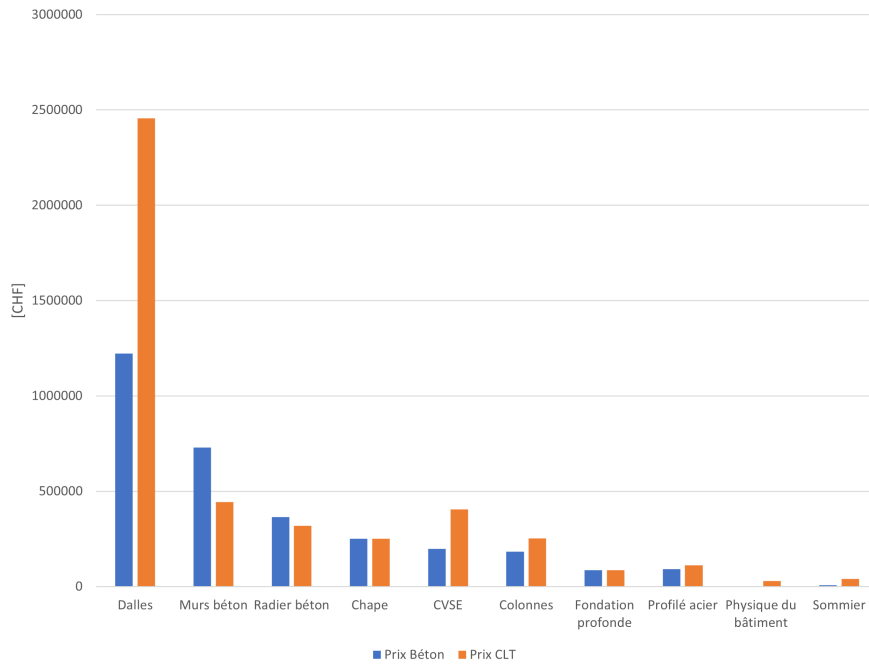


FIGURE 49 – Prix par élément de construction

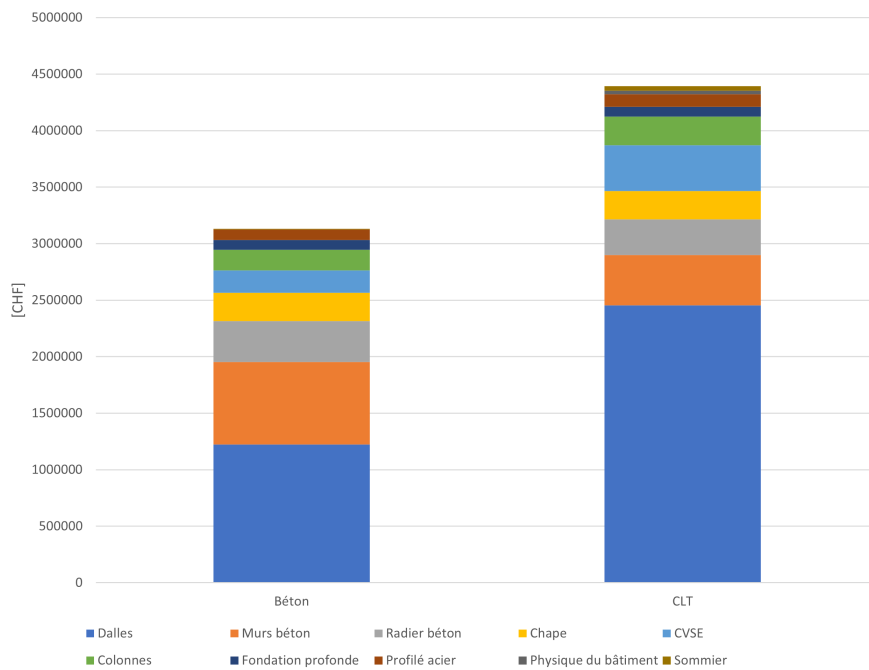


FIGURE 50 – Prix par élément de construction et totaux

Pour ce qui est des coûts, la variation la plus impactante, et de loin, est le passage de dalles en béton à des dalles en CLT. À volume équivalent, le bois coûte près du double du béton. La différence de poids des dalles a quand même une répercussion sur le prix des murs et du radier. En revanche, pour des questions de calepinage et de résistance, il a été nécessaire de réduire les distances entre les porteurs et d'augmenter leur nombre.

L'autre augmentation importante du prix a été le remplacement de la dalle active par des îlots de faux plafonds rayonnants, ces derniers coûtant en moyenne le double de la première.

Au total, l'augmentation des coûts pour une variante en CLT par rapport à une variante en béton serait de 40.2%. Cela implique que pour chaque pourcent de de CO<sub>2</sub> économisé, les coûts augmentent de 1.37%.



## 8 Analyse de sensibilité

Durant ce projet, les propositions de variantes et les dimensions de celles-ci se sont souvent heurtées à des exigences diverses provenant de considérations de sécurité et de confort. Parmi ces exigences, celles qui ont eu l'impact le plus contraignant sur le dimensionnement et donc sur les émissions de CO<sub>2</sub> ont été :

1. Les exigences acoustiques :

Il est nécessaire d'assurer l'absorption et/ou l'amortissement d'une valeur imposée de décibels en fonction de l'utilisation des locaux (cf chapitre 2.2). Pour se faire, le moyen le plus économe en CO<sub>2</sub> et le moins cher est d'alourdir artificiellement le plancher à l'aide d'une couche de sable ou de gravier. Ce surplus de charge permanente impacte le dimensionnement de tous les éléments du bâtiment et impose une utilisation plus intensive des matériaux et donc une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>.

2. La charge utile :

En effet, la charge utile, telle qu'elle est définie dans les normes, consiste en une charge équivalente à 300kg/m<sup>2</sup> sur l'ensemble de la surface utile. Cette charge est ensuite multipliée par un facteur de 1.5 afin de pallier à toute incertitude quant à un éventuel surpassement de cette valeur. Cependant, cette valeur est supérieure aux valeurs caractéristiques mesurées (plutôt aux alentours de 200kg/m<sup>2</sup>, maximum 250kg/m<sup>2</sup>) et elle ne dimensionne pas que le système porteur mais également la chape. L'épaisseur de celle-ci impose une double pénalité au bilan CO<sub>2</sub> car plus la charge utile est élevée, plus la chape doit être épaisse, donc plus elle consomme de ciment et plus elle dégage de CO<sub>2</sub>. De plus plus elle est épaisse plus elle est lourde et plus elle impose des dimensions importantes au système porteur et ainsi augmente ses émissions de CO<sub>2</sub>.

Cependant cette valeur de 300kg/m<sup>2</sup> est sensée approximer le poids des personnes, du mobilier et du cloisonnement et elle paraît excessive si on considère que les documents papiers (éléments les plus lourds du cas de charge bureau) ont tendance à disparaître. En prenant ces considérations en compte, et aussi pour l'exercice, on a voulu estimer les gains envisageables pour le cas théorique d'une charge utile de 200 kg/m<sup>2</sup>.

Cette section va donc considérer dans un premier temps les différences liées à ces facteurs indépendamment l'un de l'autre puis les combiner afin de voir si il y a une interaction entre ces actions.

### 8.1 Exigences acoustiques

Dans le scénario où les exigences acoustiques ne rentreraient pas en compte, l'influence directe sur le plancher serait la suppression de la couche de 9 cm de lestage. Par rapport à la solution avec toutes les contraintes, on gagne sur trois aspects différents :

1. Diminution des émissions liées au gravier :

$$-0.09 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 0.018 [kgCO_2/kg] = -3.24 [kgCO_2/m^2]$$

2. Diminution des coûts liés au gravier :

$$-0.09 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 0.025 [CHF/kg] = -4.5 [CHF/m^2]$$

3. Diminution de la surcharge permanente :

$$-0.09 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 9.81 [m/s^2] = -1.77 [kN/m^2]$$

Cette dernière a des répercussions sur les dimensions des porteurs, principalement les panneaux en CLT qui perdent 2 cm d'épaisseur sur toute la surface des étages. On peut également réduire le taux d'armature des murs sismiques, la masse entraînée étant réduite.

## 8.2 Charge utile

Si on atténue la charge utile d'un tiers, l'influence directe est que la chape n'a plus besoin de faire 8 cm d'épaisseur mais 6 cm. Cependant pour des raisons acoustiques on doit compenser la perte de la masse de la chape par une augmentation de la couche de gravier de 2 cm. Les gains sont les suivants :

1. Diminution des émissions liées à la chape :

$$-0.02 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 0.092 [kgCO_2/kg] + 0.02 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 0.018 [kgCO_2/kg] = -2.96 [kgCO_2/m^2]$$

2. Diminution des coûts liés à la chape :

$$-2 [CHF/m^2] + 0.02 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 0.025 [CHR/kg] = -1 [CHF/m^2]$$

3. Diminution de la charge utile :

$$-2 [kN/m^2]$$

Cette dernière a des répercussions sur les dimensions des porteurs, principalement les panneaux en CLT qui perdent 1 cm d'épaisseur sur toute la surface des étages. On peut également réduire le taux d'armature des murs sismiques, la masse entraînée étant réduite.

## 8.3 Charge utile et exigences acoustiques

On a remarqué que la diminutions de la charge utile s'accompagnait d'une compensation liée aux exigences en matière d'acoustique. Si on combine ces deux variations, à savoir la suppression du lestage et la diminution de la charge utile, on gagne donc :

1. Diminution des émissions liées à la chape et au gravier :

$$-0.02 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 0.092 [kgCO_2/kg] - 0.09 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 0.018 [kgCO_2/kg] = -6.92 [kgCO_2/m^2]$$

2. Diminution des coûts liés à la chape :

$$-2 [CHF/m^2] - 0.09 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 0.025 [CHR/kg] = -6.5 [CHF/m^2]$$

3. Diminution de la charge utile :

$$-2 [kN/m^2]$$

4. diminution de la surcharge permanente :

$$-0.09 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 9.81 [m/s^2] - 0.02 [m] \cdot 2000 [kg/m^3] \cdot 9.81 [m/s^2] = -2.16 [kN/m^2]$$

La répercussion sur l'épaisseur des panneaux est la plus importante : -6 cm. On arrive également à réduire le taux d'armature dans les murs sismiques mais on est limité par l'armature minimale. On réduit également légèrement les dimensions et le ferrailage des surprofondeurs.

## 8.4 Compilation des résultats

En se basant sur ces hypothèses et en recalculant :

- Les épaisseur des dalles,
- Les taux d'armature dans les murs sismiques,
- Les surprofondeurs,

Les économies de CO<sub>2</sub> et d'argent à l'échelle du bâtiment sont les suivantes :

Élément	Émissions cas de base [tCO <sub>2</sub> ]	Part des émissions	CU réduite	Sans Lestage	CU réduite/ sans lestage
Dalles bois	373,7	27%	359,4 -4%	345,0 -8%	287,8 -23%
Dalles béton	271,8	19%	271,8 0%	271,8 0%	271,8 0%
Murs béton	266,1	19%	259,2 -3%	259,2 -3%	259,2 -3%
Radier béton	198,2	14%	186,7 -6%	188,9 -5%	186,0 -6%
Chape	97,0	7%	72,7 -25%	97,0 0%	72,7 -25%
CVSE	71,8	5%	71,8 0%	71,8 0%	71,8 0%
Pilier béton	49,8	4%	26,1 -48%	49,8 0%	49,8 0%
Fondation profonde	25,4	2%	25,4 0%	25,4 0%	25,4 0%
Profilé acier	23,1	2%	49,8 116%	0,0 -100%	0,0 -100%
Physique du bâtiment	21,3	2%	23,1 8%	23,1 8%	23,1 8%
Sommier bois	4,5	0%	4,5 0%	4,5 0%	4,5 0%
Total général	1402,8	100%	1350,5 -4%	1336,5 -5%	1252,0 -11%

FIGURE 51 – Variation des émissions de CO<sub>2</sub>

Élément	Prix cas de base [CHF]	Part du prix	CU réduite	Sans Lestage	CU réduite/ sans lestage
Dalles bois	2160204	49%	2094606 -3%	2028970 -6%	1766426 -18%
Dalles béton	294621	7%	405135 38%	405135 38%	405135 38%
Murs béton	443411	10%	436218 -2%	436218 -2%	436218 -2%
Radier béton	317987	7%	303123 -5%	312521 -2%	309391 -3%
Chape	250327	6%	252120 1%	252120 1%	252120 1%
CVSE	405135	9%	405135 0%	405135 0%	405135 0%
Pilier béton	252120	6%	294621 17%	294621 17%	294621 17%
Fondations profondes	86400	2%	109422 27%	109422 27%	109422 27%
Profilé acier	112375	3%	250327 123%	250327 123%	237152 111%
Physique du bâtiment	29644	1%	39703 34%	0 -100%	0 -100%
Sommier bois	39703	1%	86400 118%	86400 118%	86400 118%
Total général	4391928	100%	4307907 -2%	4215438 -4%	3936588 -10%

FIGURE 52 – Variation des coûts

Premièrement, on remarque que les gains les plus significatifs se font au niveau des dalles. La réduction de leur volume entraîne une réduction linéaire des émissions de CO<sub>2</sub> pouvant aller jusqu'à 11% de la masse de dioxyde de carbone émis, soit environ 150 tonnes.

Pour les coûts, la diminution engendrée par cette réduction de volume n'est pas linéaire (diminution du prix des dalles de 28% pour une réduction de volume de 23%) dû aux frais fixes de chantier et à certains phénomènes de seuil dans le calcul des coûts. Cependant, étant donné la prépondérance des dalles en bois dans le prix total de l'ouvrage, il serait également possible d'atteindre une réduction des coûts de 10% ou d'environ 450'000 CHF.

Il est également intéressant de remarquer que les gains attribués à l'une ou l'autre proposition ne sont pas que cumulatifs mais interagissent les uns avec les autres. Il serait donc plus intéressant de combiner plusieurs actions de faible envergure que de tout miser sur un aspect.



## 9 Conclusion

Ce travail de Master a exploré les enjeux de la conception afin de dimensionner un système de plancher le plus efficace possible d'un point de vue émissions de gaz à effet de serre tout en gardant un œil sur les prix.

Cela a commencé par s'informer sur les différentes exigences et impératifs de la structure porteuse, mais aussi des corps annexes (CVSE, acoustique, revêtements) qui ont un impact très important sur le dimensionnement.

Ensuite une étude de variantes a été menée. On a remarqué que les modèles structuraux les plus économes en matériaux et également en émissions de CO<sub>2</sub> s'adaptent très mal à la géométrie complexe du bâtiment objet d'étude. De plus, les exigences des corps annexes évoqués précédemment éliminent un grand nombre de solutions structurellement viables et contraignent les solutions restantes à des épaisseurs minimales (épaisseur de la chape) et à une masse minimale (exigences acoustiques), et ainsi à une charge permanente beaucoup plus importante.

Cette étude de variantes n'a pas abouti à un résultat significatif. Cela démontre qu'une méthode ou des préconisations générales ne sont pas la bonne marche à suivre pour un problème aussi multifactoriel que celui-ci. On en conclut donc que la réflexion doit être menée pour chaque projet, et surtout, en intégrant tous les acteurs dès le début.

Suite au choix de la variante présentant les meilleures perspectives environnementales, on a pu quantifier les gains indirects engendrés par un système de plancher léger. Si l'analyse de variantes se concentrait sur le remplacement du système de plancher et donc de l'influence directe sur les émissions de CO<sub>2</sub>, la partie suivante s'est concentrée sur l'implémentation de ce système de plancher sur l'ensemble des étages du bâtiment et ainsi sur l'impact indirect de ce changement sur les émissions de gaz à effet de serre.

L'analyse de ces résultats a démontré que malgré la péjoration des émissions liées aux exigences techniques, il était possible de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> au prix d'une forte augmentation des coûts projetés : Sur ce projet, chaque point de pourcentage de CO<sub>2</sub> économisé implique une augmentation de 1.37% du coût.

Maintenant, si les estimations des coûts sont assez fiables (les entreprises ont un important retour sur expérience et des professionnels dédiés à cette tâche), les calculs d'émissions de CO<sub>2</sub> sont plus généraux et tendent à manquer de précision et de transparence quant aux analyses cycle de vie des matériaux de construction.

### 9.1 Critique KBOB

Plus cette étude avançait, plus la dépendance des résultats sur les facteurs d'émissions fournis par la KBOB s'est faite ressentir. La plupart des conclusions tirées de cette étude en sont indissociables et une variation future de certaines valeurs pourraient les impacter de manière importante.

Et justement, le consensus d'un point de vue européen tend à se baser sur des analyses cycle de vie beaucoup plus poussées en prenant en compte les spécificités de chaque fournisseur. De plus, ces valeurs calculées plus finement exposent un problème récurrent de la KBOB : Les analyses cycle de vie ne sont pas réalisées sous le même format que leurs équivalents européens, ce qui rend toute comparaison périlleuse, les hypothèses de la KBOB n'étant pas précisément listées. Au niveau européen, ARUP avait publié, fin 2021, une étude des bilans écologiques des différents fournisseurs de CLT et de BLC. Leur conclusion était que le facteur d'émissions moyen des principaux producteurs européens de CLT est de 0.25 [kgCO<sub>2</sub>] contre 0.471 [kgCO<sub>2</sub>] dans la KBOB, soit 1.9 fois plus élevé.

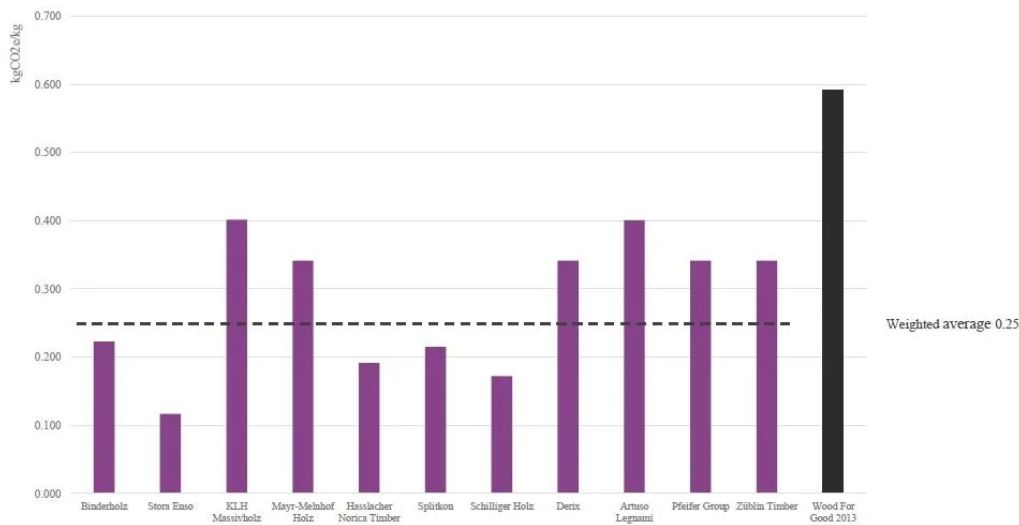


FIGURE 53 – Facteurs d'émissions du CLT par fournisseur (ACV phase A1-A3) (ARUP 2021)

Cette importante différence provient d'un changement important du mixe énergétique européen ces 30 dernières années. Sur le graphe figure 54, produit par l'agence internationale de l'énergie, il est clair que la quantité d'énergie provenant de source fossile (principalement du charbon et du pétrole) à largement diminué au profit de biocarburants et d'énergie solaire et éolienne.

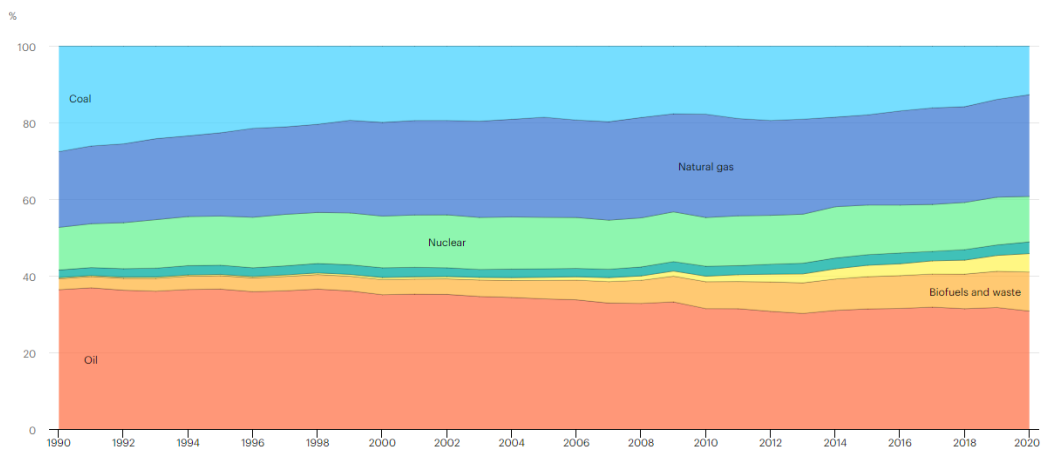


FIGURE 54 – Mixe énergétique européen (International Energy Agency)

Les facteurs d'émissions de la KBOB pour d'autres matériaux semblent souffrir du même problème. Un même profilé en acier émet en Suisse environ 70% de CO<sub>2</sub> de plus qu'en France. La seule différence est la valeur normative des analyses cycle de vie des fabricants, là où, en Suisse, une table unique et dont les données manquent de transparence régit les bilans écologiques de la construction.

Il serait donc grand temps de basculer sur un système similaire au système européen, où les facteurs d'émissions sont à la charge des fournisseurs et vérifiés par un organe de contrôle. Cela permettrait une meilleure précision dans les calculs et des analyses de variantes considérablement plus fiables.

## 9.2 Études complémentaires

Cette étude a soulevé de nombreuses problématiques. Si certaines d'entre elles ont été résolues (notamment celle des systèmes de planchers en géométrie complexe), d'autres ont été mentionnées et mériteraient une analyse plus approfondie.

On pourrait concevoir des futurs projets ou études portant sur les sujets suivants :

- Une étude sur les systèmes de cloisonnement :  
Une conclusion de cette étude a été la mise en évidence du surplus de murs sismiques. La réduction des dimensions de ceux-ci permet un gain de CO<sub>2</sub>, mais il y aurait également la possibilité de remplacer la composition de ceux qui n'ont pas la vocation de reprendre les efforts horizontaux.  
Quelques propositions pour cette étude seraient :
  - Des murs en maçonnerie (traditionnelle, briques d'adobe, briques en terre crue (Terrabloc<sup>TM</sup>))
  - Des murs en bois (ossature, CLT)
- Une comparaison de cette étude avec une étude de variante portant sur un bâtiment très régulier, de manière à pouvoir quantifier l'influence de la complexité géométrique sur la surconsommation de matériaux, le surplus d'émissions de CO<sub>2</sub> et les surcoûts.
- Une étude de fond sur les facteurs d'émissions de la KBOB :  
Comme dit précédemment, ces facteurs sont une approximation assez grossière ne permettant pas la fiabilité des comparaisons de variantes au stade de conception, ce qui rend la sélection de la variante optimale difficile.  
Il serait intéressant, pour un projet donné, de faire une étude de variantes en comparant les valeurs KBOB et les valeurs fournisseurs (prenant en compte la provenance des matériaux, les processus de fabrication et le transport sur chantier). Cela permettrait d'affiner grandement le choix et de montrer les limites d'une valeur généralisée.

## Références

- [1] Timber Structures 3.0. *TS3 Pour des projets d'envergure en bois. Fiche technique pour les ingénieurs*. Timber Structures 3.0, 2022.
- [2] AFNOR. *Eurocode 0 - Bases de calcul des structures*. 2011.
- [3] AFNOR. *Eurocode 1 : Actions sur les structures*. 2008.
- [4] AFNOR. *Eurocode 2 : calcul des structures en béton*. 2007.
- [5] AFNOR. *Eurocode 3 - Calcul des structures en acier*. 2007.
- [6] AFNOR. *Eurocode 4 - Calcul des structures mixtes acier-béton*. 2007.
- [7] AFNOR. *Eurocode 5 : conception et calcul des structures en bois*. 2007.
- [8] CSD INGENIEURE AG. *Zusammenfassung des Berichtes zur Treibhausgasbilanzierung des Holzdeckensystems aus Brettsperrholz der Firma Timber Structures 3.0 AG (TS3)*. 2021.
- [9] ASSOCIATION DES ÉTABLISSEMENTS CANTONAUX D'ASSURANCE INCENDIE - AEAI. *Norme de protection incendie*. 2015.
- [10] Commission des AVIS TECHNIQUES. *Cahier des Prescriptions Techniques*. 2014.
- [11] PIVETEAU BOIS. *HEXAPLI*. 2018.
- [12] Stora Enso CLT. *Stora Enso CLT*. 2019.
- [13] François FREY. *Traité de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Mécanique des structures*. T. 2. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011.
- [14] Cairn INFO. *L'analyse multicritère pour la gestion intégrée des cours d'eau : un nouveau cadre méthodologique à définir*. 2018. URL : <https://www.cairn.info/revue-sciences-eaux-et-territoires-2018-2-page-54.htm> (visité le 23/11/2018).
- [15] Martial rey JULIUS NATTERER Jean-Luc Sandoz. *Traité de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Construction en bois*. T. 13. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004.
- [16] LIGNUM. *Tables pour la construction en bois 1*. Lignum, 2021.
- [17] Alain Nussbaumer MANFRED A. HIRT Rolf Bez. *Traité de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Construction métallique*. T. 10. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011.
- [18] Michel Crisinel MANFRED A. HIRT. *Traité de génie civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Charpentes métalliques*. T. 11. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2011.
- [19] Arcelor MITTAL. *COFRAPLUS 60*. 2015.
- [20] Arcelor MITTAL. *COFRASTRA 40*. 2019.
- [21] Arcelor MITTAL. *COFRASTRA 70*. 2019.
- [22] Denis Pflug PIERRE-ANDRÉ DUPRAZ Markus Mooser. *Dimensionnement des structures en bois. Aide au calcul basé sur la norme SIA 265*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2010.

- 
- [23] SIA. *SIA 260 : Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses*. 2013.
- [24] SIA. *SIA 261 Actions sur les structures porteuses*. 2020.
- [25] SIA. *SIA 262 : Construction en béton*. 2013.
- [26] SIA. *SIA 263 : Construction en acier*. 2013.
- [27] SIA. *SIA 264 : Construction mixte acier-béton*. 2014.
- [28] SIA. *SIA 265 : Construction en bois*. 2021.
- [29] SIA. *SIA 267 : Géotechnique*. 2013.
- [30] SIA. *SIA 272 : Etanchéité et drainage d'ouvrages enterrés et souterrains*. 2009.
- [31] SIA. *SIA 400 : Titre actuel, valable dès 01.10.2000 Élaboration des dossiers de plans dans le domaine du bâtiment*. 2000.
- [32] STEELWORKS. *C4/06 - Tables de dimensionnement*. Stahlbau Zentrum Schweiz, 2019.
- [33] STEELWORKS. *C5/18 - Tables de construction*. Stahlbau Zentrum Schweiz, 2018.
- [34] THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS. *How to calculate embodied carbon*. 2022.

## 10 Annexes/Notes de calculs

### A Prédimensionnement trame régulière

Toutes les trames ont été calculées selon les hypothèses suivantes :

- Dimensions :  $5.35 \times 6 [m]$
- Charge utile :  $3 [kN/m^2]$
- Surcharge permanente :  $2 [kN/m^2]$

**Contraintes**

	Med	35,0 kNm
	Ved	26,1 kN
Béton	sup	-5,3 N/mm <sup>2</sup>
	inf	1,9 N/mm <sup>2</sup>
Bois	sup	1,2 N/mm <sup>2</sup>
	m	3,8 N/mm <sup>2</sup>
Cisaillement	inf	6,4 N/mm <sup>2</sup>
	max	0,6 N/mm <sup>2</sup>
	connecteurs	0,6 N/mm <sup>2</sup>

**Cas incendie**

R	60 minutes
d_ef	49 mm (d_red = 7 mm)
beta_n	0,7 mm/minute
h_fi	151 mm
b_fi	102 mm

**Rigidité flexionnelle de la section mixte**

E1	32075 N/mm <sup>2</sup>
E2	11500 N/mm <sup>2</sup>
I_y,ef	5,54E+08 mm <sup>4</sup>
a1	8,6 mm
a2	138,9 mm
h_	147,5 mm <sup>4</sup>
gamma	0,989

**Contraintes**

	Med_incendie	11,7 kNm
	Ved_incendie	8,7 kN
Béton	sup	-3,4 N/mm <sup>2</sup>
	inf	2,4 N/mm <sup>2</sup>
Bois	sup	1,3 N/mm <sup>2</sup>
	m	2,9 N/mm <sup>2</sup>
Cisaillement	inf	4,5 N/mm <sup>2</sup>
	max	0,4 N/mm <sup>2</sup>
	connecteurs	0,3 N/mm <sup>2</sup>

**Résistance transversale des panneaux à l'état frais**

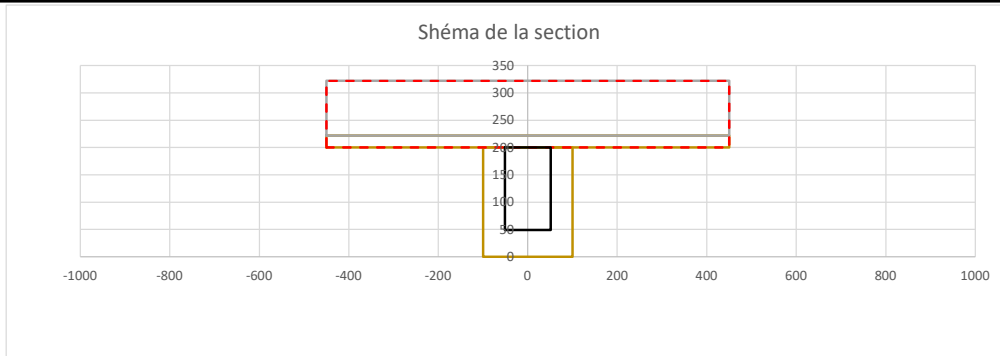
qd	4,81 kN/m/m'	3,15	
Med	0,5 kNm/m'	w_el	2,73
sigma_m	6,0 N/mm <sup>2</sup>	w_lim	2,6
f_m	40 N/mm <sup>2</sup>		

**Charges**

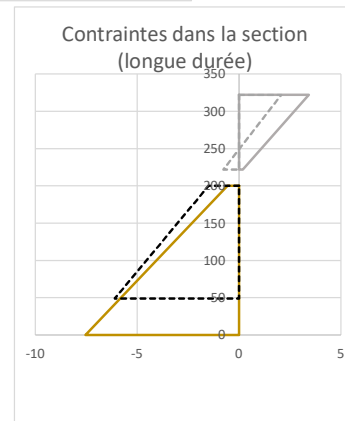
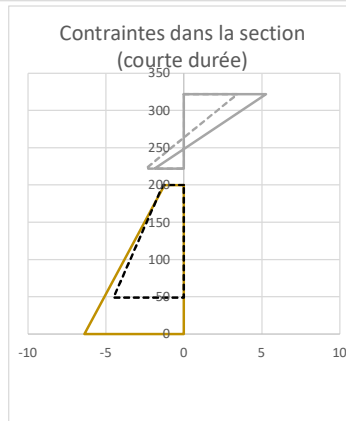
Poids propre	g'_k1	2,44 kN/m'			
	Référence produit	Poids volumique	Épaisseur	Poids surfacique [kN/m <sup>2</sup> ]	
Chape					
Isolation					
Faux plafonds					
Protection incendie					
Revêtement sol					
Total				2	
Charge utile	Batiment cat			3	
Fluage	Classe d'humidité 1	phi	1		
	Bois ressuyé ou humide lors de la mise en ouvre				
	psi0	0,7			
	psi1	0,5			
	psi2	0,3			
	qd [kN/m']	w/lim [mm]	w [mm]		
ELU		9,8 -			
ELS	Fragile	6,9	10,7	6,42	833,6182013
	Ductile	15,7	15,3	14,53	368,3031076
	Confort	3,0	15,3	2,80	1912,883673
	Aspect	15,4	17,8	14,22	376,2266369
ELS_Virendeel	Golbal	15,7	14,9	14,53	368,3031076

Récap:				Cas:				Déterminant	Réserve	
				Normal		Incendie				
	Matériau	Position	$\sigma/t_{adm}$	Courte durée	Longue durée	Courte durée	Longue durée			
ELU	Contraintes [N/mm <sup>2</sup> ]	Béton	Face supérieur	16,7	-5,27	-3,42	-3,43	-2,07	-5,27	68,4%
			Face inférieur	2,48	1,89	-0,18	2,43	0,77	2,43	1,7%
		Bois	Face supérieur	16	1,24	0,57	1,33	1,50	1,50	90,7%
			Centre	12,8	3,80	4,05	2,92	3,80	4,05	68,3%
	Cisaillement	Tau_max	1,8	0,59	0,61	0,36	0,46	0,61	66,1%	
		Interface	0,64	0,57	0,61	0,33	0,43	0,61	5,3%	
ELS	Fleches [mm]	Global	Type d'ELS	$w_{adm}$ [mm]	$w$ [mm]					
			Fragile	10,7		6,4				40,0%
			Ductile	15,3		14,5				5,0%
			Confort	15,3		2,8				81,7%
			Aspect	17,8		14,2				20,3%
			Virendeel	14,9		14,53				2,5%

Réserve minim	1,7%
Réserve moyer	41,9%
Aire de section	44444,44444



E béton longue durée	
E1	10692 N/mm <sup>2</sup>
E2	11500 N/mm <sup>2</sup>
$I_{y,ef}$	1,003E+09 mm <sup>4</sup>
a1	55,8 mm
a2	116,2 mm
$h_{\gamma}$	172,0 mm <sup>4</sup>
gamma	0,996
K	23333,33333 kN/mm
espacement s	250 mm



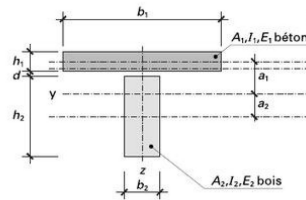


Contraintes	Béton	Med	34,96 kNm
		Ved	26,14 kN
	Bois	sup	-3,4 N/mm <sup>2</sup>
		inf	-0,2 N/mm <sup>2</sup>
	Cisaillement	sup	0,6 N/mm <sup>2</sup>
		m	4,1 N/mm <sup>2</sup>
inf	7,5 N/mm <sup>2</sup>		
max	0,6 N/mm <sup>2</sup>		
connecteurs	0,6 N/mm <sup>2</sup>		

Cas incendie	R	60
	d_ef	49 mm
	beta_n	0,7 mm/minute
	h_fi	151 mm
	b_fi	102 mm

Rigidité flexionnelle de la section mixte		
E1	10692 N/mm <sup>2</sup>	
E2	11500 N/mm <sup>2</sup>	

L_y,ef	3,82E+08 mm <sup>4</sup>
a1	23,0 mm
a2	124,5 mm
h_	147,5 mm <sup>4</sup>
gamma	0,996



Contraintes	Béton	Med_incendie	11,7 kNm
		Ved_incendie	8,7 kN
	Bois	sup	-2,1 N/mm <sup>2</sup>
		inf	0,8 N/mm <sup>2</sup>
	Cisaillement	sup	1,5 N/mm <sup>2</sup>
		m	3,8 N/mm <sup>2</sup>
inf	6,1 N/mm <sup>2</sup>		
max	0,5 N/mm <sup>2</sup>		
connecteurs	0,4 N/mm <sup>2</sup>		

Prise en compte de 0,6Ed et 1,8 Rd

mm  
mm

Fluage béton: phi\_non fissuré 3,76

phi\_mixte 1,99

## Prédim plancher bois-béton mixte

Paramètres au choix de l'utilisateur
Paramètres optimisables par macro

### Dimensions:

Choix de la poutre:	b*h_poutre	160*240	mm*mm
	b2 [mm]	160	
	h2 [mm]	240	
	A2 [mm <sup>2</sup> ]	38400	
	I <sub>y</sub> [mm <sup>4</sup> ]	1,84E+08	
Épaisseur panneau 3 plis:	d	22	mm
Épaisseur de béton:	h1	120	mm
Enrobage	e	20	mm
Espacement:	s	750	mm
Longueur:	l	6500	mm
Largeur participante béton	l <sub>0</sub>	5350	mm (poutre simple)
	b <sub>1</sub>	275	mm
	b <sub>2</sub>	275	mm
	b <sub>eff1</sub>	590	mm
	b <sub>eff2</sub>	590	mm
	b <sub>eff</sub>	750	mm

### Choix des matériaux:

	Dénomination	E [N/mm <sup>2</sup> ]
Qualité bois:	GL24h	11500
Qualité béton:	C25/30	32075
Modules d'élasticité béton	E <sub>c</sub> courte durée	32075 N/mm <sup>2</sup>
	E <sub>c</sub> longue durée	10692 N/mm <sup>2</sup>
Armature	B500B	
	f <sub>sd</sub>	435 N/mm <sup>2</sup>
	d	6 mm
	As	28,3 mm <sup>2</sup>
	s <sub>armature</sub>	150 mm
	X <sub>pl</sub>	49,5 mm

### Connecteurs: Profix PHBV

Kser	35000	N/mm
lef	430	mm
s <sub>connecteurs</sub>	300	mm
Rd	32	kN/attache
tau <sub>Rd</sub>	0,67	N/mm <sup>2</sup>

### Rigidité flexionnelle de la section mixte

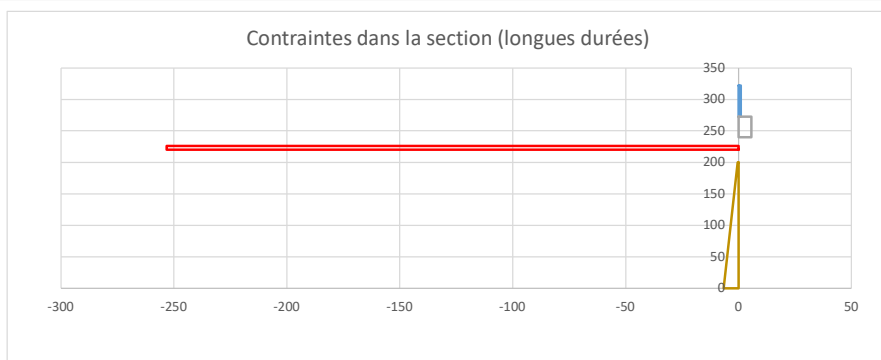
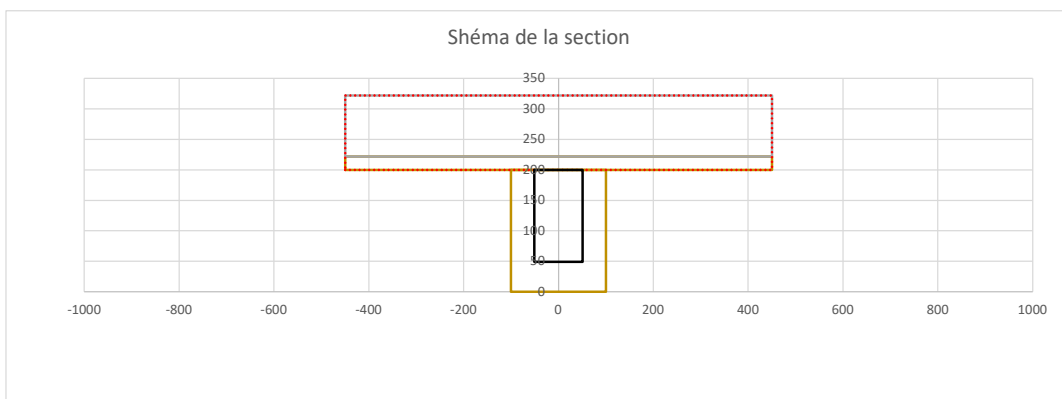
E béton longue durée	E1	10692	N/mm <sup>2</sup>
	E2	11500	N/mm <sup>2</sup>
	I <sub>y,ef</sub>	1,357E+09	mm <sup>4</sup>
	a1	63,7	mm
	a2	138,3	mm
	h <sub>0</sub>	202,0	mm <sup>4</sup>
	gamma	0,996	
	K	23333,3	kN/mm

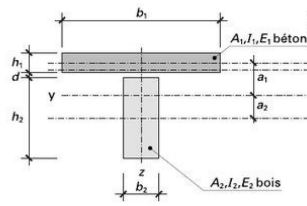
### Contraintes

	Med	34,96	kNm
	Ved	26,14	kN
Béton	sup	-3,0	N/mm <sup>2</sup>
	inf	-0,1	N/mm <sup>2</sup>
	compression	-0,9	N/mm <sup>2</sup>
	compressionN	-5,6	N/mm <sup>3</sup>
	armature	253,2	N/mm <sup>2</sup>
Bois	sup	0,5	N/mm <sup>2</sup>
	m	3,6	N/mm <sup>2</sup>
	inf	6,7	N/mm <sup>2</sup>
Cisaillement	max	0,6	N/mm <sup>2</sup>
	connecteurs	0,5	N/mm <sup>2</sup>

Cas incendie	R	30		
	d_ef	28 mm		
	beta_n	0,7 mm/minute		
	h_fi	212 mm		
	b_fi	104 mm		
	Rigidité flexionnelle de la section mixte			
	E1	10692 N/mm <sup>2</sup>		
	E2	11500 N/mm <sup>2</sup>		
L_y,ef	7,99E+08 mm <sup>4</sup>			
a1	39,3 mm			
a2	148,7 mm			
h_	188,0 mm <sup>4</sup>			
gamma	0,996			
Contraintes	Béton	Med_incendie	11,7 kNm	Prise en comp
		Ved_incendie	8,7 kN	
		sup	-1,3 N/mm <sup>2</sup>	
		inf	0,3 N/mm <sup>2</sup>	
		compression	-0,5 N/mm <sup>2</sup>	
		compressionN	-2,0 N/mm <sup>3</sup>	
	Bois	armature	143,3 N/mm <sup>2</sup>	
		sup	0,6 N/mm <sup>2</sup>	
		m	2,2 N/mm <sup>2</sup>	
	Cisaillement	inf	3,7 N/mm <sup>2</sup>	
		max	0,4 N/mm <sup>2</sup>	
		connecteurs	0,3 N/mm <sup>2</sup>	
Résistance transversale des panneaux à l'état frais				
Charges	qd	2,45 kN/m/m'		
	Med	0,2 kNm/m'		
	sigma_m	3,1 N/mm <sup>2</sup>		
	Poids propre	g'_k1	2,44 kN/m'	
	Référence produit    Poids volumique    Épaisseur    Poids surfacique [kN/m <sup>2</sup> ]			
	Chape			
	Isolation			
	Faux plafonds			
Protection incendie				
Revêtement sol				
Total			2	
Charge utile	Batiment cat			3
Fluage	Classe d'humidité 2	phi	2	
	Bois ressuyé ou humide lors de la mise en ouvre			
	psi0	0,7		
	psi1	0,5		
	psi2	0,3		
	qd [kN/m']	w/lim [mm]	w [mm]	
ELU		9,8	-	
ELS	Fragile	6,9	10,7	4,74
	Ductile	19,7	15,3	13,46
	Confort	3,7	15,3	2,50
	Aspect	19,4	17,8	13,28
ELS_Virendeel	Golbal	19,7	13,8	13,46

Récap:				Cas:					
				Normal	Incendie				
ELU	Contraintes [N/mm <sup>2</sup> ]	Matériau	Position	$\sigma/t_{adm}$	Longue durée	Longue durée	Déterminant	Réserve	
			Béton	Compression M	16,7	-0,93	-0,52	-0,93	94,4%
				Compression N	16,7	-5,61	-1,96	-5,61	66,3%
		Armature		435,0	253,20	143,34	253,20	41,8%	
		Bois	Face supérieure	16	0,47	0,62	0,62	96,1%	
			Centre	12,8	3,56	2,17	3,56	72,2%	
			Face inférieure	16	6,65	3,71	6,65	58,4%	
		Cisaillement	Tau_max	1,8	0,64	0,35	0,64	64,3%	
			Interface	0,67	0,53	0,34	0,53	20,1%	
		ELS	Fleches [mm]	Global	Type d'ELS	$w_{adm}$ [mm]	$w$ [mm]		
Fragile	10,7				4,7			55,7%	
Ductile	15,3				13,5			12,0%	
Confort	15,3				2,5			83,6%	
Aspect	17,8				13,3			25,5%	
Virendeel	13,8				13,46			2,2%	
Réserve minim								2,2%	
Réserve moyer					53,3%				
							Aire de section	51200	





te de 0,6Ed et 1,8 Rd

Fluage béton:	phi_non fissuré	3,76	phi_semi fissuré	4,12	phi_mixte	2,78
	phi_fissuré	7,74				
	rho	0,005				
	d	97 mm				



Contraintes	Med	16,9 kNm		
	Ved	12,7 kN		
	Piece	Position	sigma_Ed	f_d
	1 sup	2,84	25	11% OK!
	m	1,87	10	19% OK!
	inf	0,90	25	4% OK!
	2 sup	5,90	24	25% OK!
	m	0,00	12,8	0% OK!
	inf	-5,90	24	25% OK!
	3 sup	-0,90	25	4% OK!
	m	-1,87	6	31% OK!
	inf	-2,84	25	11% OK!
	Cisaillement	1,13	1,8	63% OK!
	joint sup	0,25	1,8	14% OK!
joint inf	0,25	1,8	14% OK!	

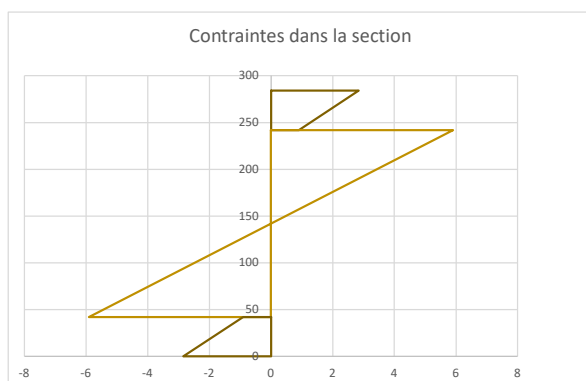
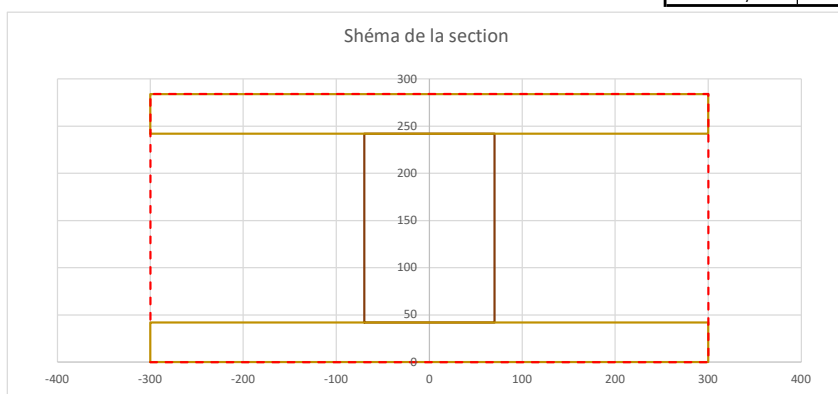
Charges	Poids propre Structure	g'_k1	0,31 kN/m'		
	Chape				
	Isolation				
	Faux plafonds				
	Protection incendie				
	Revêtement sol				
	Total		2		
	Charge utile	Batiment cat	3		
	Fluage	Classe d'humidite	1		
		Bois ressuyé ou humide lors de la mise en oeuvre			
		psi0	0,7		
		psi1	0,5		
		psi2	0,3		
		qd [kN/m']	w/lim [mm]	w [mm]	
ELU		4,7	-	15,30	
ELS	Fragile	3,3	10,7	10,69	100%
	Ductile	4,7	15,3	15,18	99%
	Confort	1,7	15,3	5,43	36%
	Aspect	4,8	17,8	15,56	87%
ELS_Virendeel	Golbal	4,7	19,6	15,18	77%

Variantes possibles											
section	100*240	120*200	120*200	120*200	120*200	120*200	120*240	160*200	140*200	140*200	140*200
sP	200	200	500	500	500	500		900	600	600	600
sC	100	80	60	80	100	120		60	400	380	400
h_panneau	40	40	40	40	40	40		40	40	42	42
N_rangée	1	1	2	2	2	2		2	3	3	3
	0,703989338	0,6503301	0,6128202	0,59775661	0,58391948	0,57108613		0,564000798	0,56225449	0,55832205	0,55452653

Résistance transversale des panneaux à l'état frais			
	qd	7,43 kN/m/m'	4,27
	Med	0,3 kNm/m'	w_el 3,70 mm
	sigma_m	1,1 N/mm^2	w_lim 1,7 mm

Appuis	Effort	
Ved	12,7 kN	
b_min	36,2 mm	

Récap:		Matériau	Position	$\sigma/\tau_{adm}$	$\sigma/\tau_{Ed}$	Réserve
ELU	Contraintes [N/mm <sup>2</sup> ]	3-plis supérieur	Face supérieure	25	2,84	88,6%
			Centre	10	1,87	81,3%
			Face inférieure	25	0,90	96,4%
		Poutre centrale	Face supérieure	24	5,90	75,4%
			Centre	12,8	0,00	100,0%
			Face inférieure	24	-5,90	75,4%
		3-plis inférieur	Face supérieure	25	-0,90	96,4%
			Centre	6	-1,87	68,8%
			Face inférieure	25	-2,84	88,6%
		Cisaillement	Tau_max	1,8	1,13	37,0%
			Interface sup	0,25	0,25	0,7%
			Interface inf	0,25	0,25	0,7%
		ELS	Flechtes [mm]	Global	Type d'ELS	w_adm [mm]
Fragile	10,7				10,7	0,1%
Ductile	15,3				15,2	0,7%
Confort	15,3				5,4	64,5%
Aspect	17,8				15,6	12,7%
Virendeel	19,6				15,2	22,6%
			Réserve minimale		0,1%	
			Réserve moyenne		55,5%	







## Prédim plancher bois

### Dimensions:

Choix de la poutre: 120\*240 mm\*mm  
 b2 [mm] h2 [mm] A2 [mm^2] I\_y [mm^4]  
 120 240 28800 1,38E+08

Épaisseur pan h\_panneau 60 mm

Espacement: s 600 mm

Longueur: l 5350 mm 25 minutes

### Largeur participante béton

l\_0 5350 mm (poutre simple)  
 b\_1 240 mm  
 b\_2 240 mm  
 b\_eff1 583 mm  
 b\_eff2 583 mm  
 b\_eff 600 mm

### Choix des matériaux: Dénomination E [N/mm^2]

Qualité bois: GL24h 11500

### Résistances matériaux

Bois f\_m,d 16 N/mm^2  
 f\_td 12,8 N/mm^2  
 f\_vd 1,8 N/mm^2  
 Panneau f\_m,d 28 N/mm^2  
 f\_cd 10 N/mm^2

### Connection vis

N\_rangées 2  
 N\_rangées,mε 2  
 d 10 mm  
 d1 6,7 mm  
 l 180 mm  
 s 60 mm  
 sConnecteurs 140 mm  
 si 70 mm  
 tau\_Rd 0,30 N/mm^2  
 Rd 2,1 kN  
 k\_red 0,61 Vertical  
 ntot 38  
 tmin 40 mm  
 smin 90 mm  
 d\_ef 7,3 mm  
 K\_ser 1774,9 N/mm  
 K 2,4 kN/mm

### Rigidité flexionnelle de la section mixte

E1 9800 N/mm^2  
 E2 11500 N/mm^2  
 I\_y,ef 2,831E+08 mm^4  
 a1 144,6 mm  
 a2 27,4 mm  
 h\_ 172,0 mm^4  
 gamma 0,178

Contraintes		kNm			
	Med		16,7 kN		
	Ved		12,5 N/mm <sup>2</sup>		
Panneau	sup		-2,8 N/mm <sup>2</sup>		
	m		-1,3 N/mm <sup>2</sup>		
Bois	inf		0,2 N/mm <sup>2</sup>		
	sup		-5,5 N/mm <sup>2</sup>		
	m		1,6 N/mm <sup>2</sup>		
Cisaillement	inf		8,7	1,8	27% OK!
	joint		0,29	1,8	16% OK!

### Cas incendie

R	60 minutes	(d_red = 7 mm)
d_ef	49 mm	
beta_n	0,7 mm/minute	

h_fi	191 mm
b_fi	22 mm

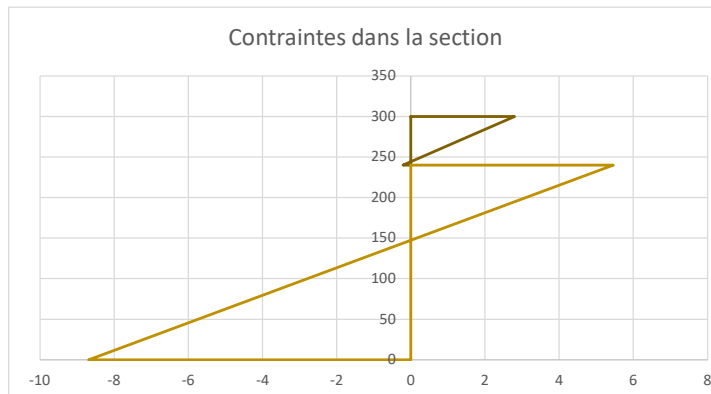
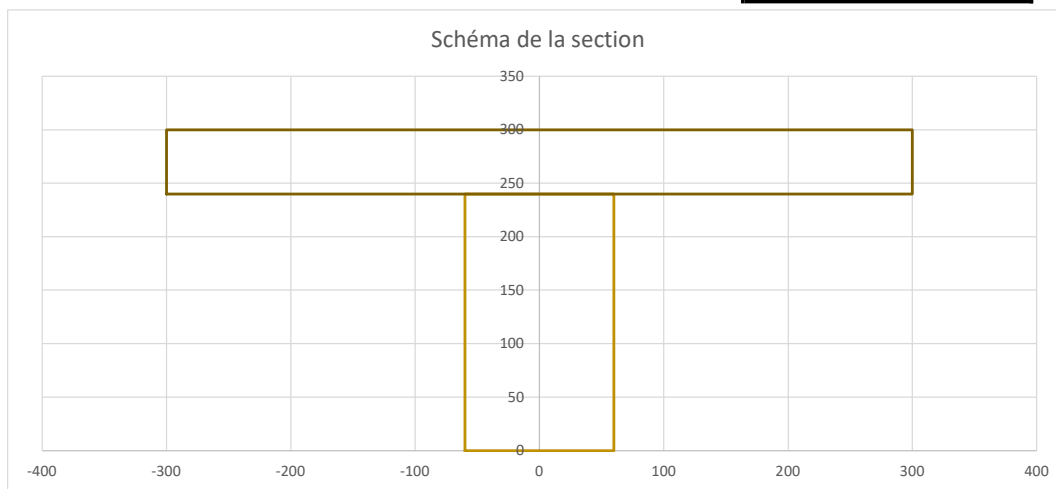
Rigidité flexionnelle de la section mixte

E1	9800 N/mm <sup>2</sup>
E2	11500 N/mm <sup>2</sup>

I_y,ef	5,94E+07 mm <sup>4</sup>
a1	54,6 mm
a2	70,9 mm
h_	125,5 mm <sup>4</sup>
gamma	0,178

Contraintes		kNm			
Béton	Med		5,6 N/mm <sup>2</sup>		
	sup		-3,2 N/mm <sup>2</sup>		
Bois	inf		1,6 N/mm <sup>2</sup>		
	sup		-4,6 N/mm <sup>2</sup>		
Charges	inf		17,9		
	Poids propre	g'_k1	0,25		
		Épaisseur		Poids surfacique [kN/m <sup>2</sup> ]	
		Référence pro Poids volumique			
Chape					
Isolation					
Faux plafonds					
Protection incendie					
Revêtement sol					2
Total					3
Charge utile	Batiment cat		1		
Fluage	Classe d'humid phi				
		Bois ressuyé ou humide lors de la mise en oeuvre			
	psi0		0,7		
	psi1		0,5		
	psi2		0,3	w/lim [mm]	w [mm]
	qd		-		Réserve
ELU			4,7	10,7	100%
ELS	Fragile		3,3	15,3	98%
	Ductile		4,6	15,3	36%
	Confort		1,7	17,8	86%
	Aspect		4,7		

Récap:		Matériau	Position	$\sigma/t_{adm}$	$\sigma/t_{Ed}$	Réserve
ELU	Contraintes [N/mm <sup>2</sup> ]	3-plis supérieur	Face supérieure	28,0	-2,80	90,0%
			Centre	10,0	-1,29	87,1%
			Face inférieure	28,0	0,22	99,2%
		Poutre	Face supérieure	16,0	-5,46	65,9%
			Centre	10,0	1,61	83,9%
			Face inférieure	16,0	8,68	45,7%
		Cisaillement	Tau_max	1,8	0,48	73,4%
Interface	0,3		0,29	3,7%		
ELS	Fleches [mm]	Global	Type d'ELS	w_adm [mm]	w [mm]	
			Fragile	10,7	10,7	0,4%
			Ductile	15,3	15,0	1,7%
			Confort	15,3	5,5	64,0%
			Aspect	17,8	15,4	13,5%
					Réserve minimale	0,4%
					Réserve moyenne	52,4%



Prédim Dalle CLT

Choix Dalle CLT      HEXA 7L 240

Portée      5,35 m

	Épaisseur	Aire	Inertie	Module éla:	Rayon de g	Inertie efficace
Données géométriques	h	A	I	W	i	I_eff
	240	140000	888670000	7406000	79,7	740988750

Composition

40
30
30
40
30
30
40
0
0

PP	1,2 kN/m'
CP	2 kN/m'
CU	3 kN/m'

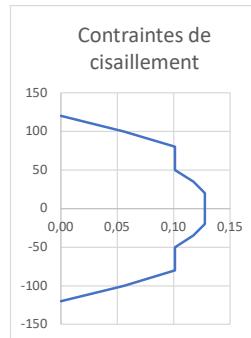
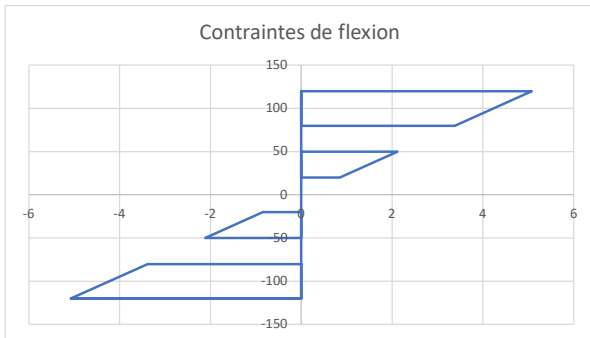
		qd [kN/m']	w/lim [mm]	w [mm]
ELU		8,76		
ELS	Fragile	6,2	10,7	7,38
	Ductile	8,7	15,3	10,45
	Confort	1,8	15,3	2,16
	Aspect	8,1	17,8	9,73

Efforts

MEd	31,3 kNm
Ved	23,4 kN

Fluage      Classe d'humidité 1    phi      1  
 Bois ressuyé ou humide lors de la mise en ouvre

psi0	0,7
psi1	0,5
psi2	0,3



## Prédim plancher acier béton mixte

### Choix matériaux

Acier	S355	
	f <sub>y</sub>	355 N/mm <sup>2</sup>
	f <sub>uD</sub>	510 N/mm <sup>2</sup>
	E <sub>a</sub>	210000 N/mm <sup>2</sup>
	G <sub>a</sub>	81000 N/mm <sup>2</sup>
Béton	C25/30	
	f <sub>ck</sub>	25 N/mm <sup>2</sup>
	f <sub>cd</sub>	16,7 N/mm <sup>2</sup>
	f <sub>ctd</sub>	2,48 N/mm <sup>2</sup>
	E <sub>cm</sub>	32075 N/mm <sup>2</sup>
	E <sub>c∞</sub>	10692 N/mm <sup>2</sup>
	E <sub>cs</sub>	16038 N/mm <sup>2</sup>
	n <sub>el,short</sub>	6,55 -
	n <sub>el,long</sub>	19,64 -
	n <sub>pl</sub>	23,87 -
	n <sub>pls</sub>	1,05 -
Armature	B500B	
	d	10,00 mm
	A	78,54 mm <sup>2</sup>
	s	150,00 mm
	enrobage	20,00 mm

### Dimensions

#### Choix du profilé

HEB240

#### Caractéristiques géométrique de la section

	Poids	A	Av	Aw	I <sub>y</sub>	W <sub>ely</sub>	W <sub>y</sub>
	kg/m	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>
	83,2	10598,6	3322,6	2230,0	1,13E+08	938275,4	1009803,1
Épaisseur de béton							
h <sub>béton</sub>		160 mm					
Épaisseur efficace de béton							
h <sub>c,eff</sub>		109 mm					
Épaisseur moyenne de béton							
h <sub>c,moy</sub>		153 mm					
Longueur de la poutre							
l		5350 mm					
Espacement entre les poutres							
s		3000 mm					
Espacement entre la tole et le profilé							
e		51 mm					
Hauteur totale du plancher							
h		400 mm					

### Classe de section

epsilon		0,814		
	Élancement		Stade de construction	Stade définitif
Aile		5,5	Cas détermina	Classe de section
Âme		16,4	Flexion	Cas déterminant
				Classe de section
				1
				1

### Déversement

Empêché si:	Raidisseurs sur appuis	
	Connection par gougeons à têtes	
	Épaisseur de la dalle >= 100mm	
	Hauteur de la poutre <=	650 mm

### Largeur participante

Largeur participante béton	
l <sub>0</sub>	5350 mm
b <sub>1</sub>	1380 mm
b <sub>2</sub>	1380 mm
b <sub>eff1</sub>	811 mm
b <sub>eff2</sub>	811 mm
b <sub>eff</sub>	1862 mm

Charges	Poids propre	g_k1'	9,0 kN/m'
	Surcharge	g_k2'	6 kN/m'
	Charge utile	q_k1'	9 kN/m'

Efforts

Caractéristiques Mécaniques Mixte

Calcul: Plastique  
TGC 11 tableaux 10,22/10,23

	Courte durée		Longue durée	
Si Elastique	Position de l'axe neutre	Dans le profilé métallique	Position de l'axe neutre	Dans le profilé métallique
	zb	288,0 mm	zb	231,3 mm
	Inertie	5,33E+08 mm <sup>4</sup>	Inertie	3,61E+08 mm <sup>4</sup>
Si Plastique			Position de l'axe neutre	Dans l'aile supérieure
			zb	235,6 mm
			W_pl,b	2164453,8 mm <sup>3</sup>

Charges

Stade de construction			
	poids du profilé	g'_k1	0,82 kN/m'
	poids du béton frais	g'_k2	11,439 kN/m'
	poids de la tole	g'_k3	0,3 kN/m'
	Charge de construction	q'_k1	3 kN/m'
Stade définitif			
	Poids de la section mixte	g'_k1	12,56 kN/m'
	Surcharge permanente	g'_k2	6 kN/m'
	Charge utile	q'_k1	9 kN/m'
	psi0		0,7
	psi1		0,5
	psi2		0,3
	fluage		

Stade		1	2	3	4		
Description		Profilé seul	+ Béton frais + Charge de construction	Comportement mixte + Charges utiles Courte durée	Longue durée		
ELU	q_d [kN/m']	1,10	20,3	0,0	38,5	SN EN 1993-1-1	
	M_i,Ed [kNm]	3,9	72,8	0,0	137,9		
	σ_Ed,a,i [N/mm <sup>2</sup> ]	4,2	81,8	0,0	63,7		
	σ_Ed,a [N/mm <sup>2</sup> ]	4,2	86,0	0,0	63,7		
	σ_Rd,a [N/mm <sup>2</sup> ]	313,2	338,1	338,1	338,1		
ELS	Aspect	0,82	12,6	87,3	87,3		
	Aptitude au fonctionnement			89,1	89,1		
	Confort			12,9	12,9	w_tot [mm]	w_lim [mm]
	w [mm]		Etats	8,33	12,28	12,28	17,8
				8,50	12,53	12,53	15,3
				1,23	1,81	1,81	15,3
ELS_Virendeel	Goibal	Aspect		8,50	12,53	12,53	12,5
Connecteurs	Calcul Plastique	Connexion partielle possible					

Si calcul élastique	Choix des gougeons	
	diamètre	10 mm
	Ruine par cisaillement de l'acier	
	P1_Rk	32044 N
	Ruine par écrasement du béton	
	P2_Rk	25969 N
	Resistance ultime de calcul	
	P_Rd	20775 N

Effort Rasant		Courte durée	Longue durée
	V_Ed [N]	0,0	0,0
	v_el [N/mm]	0,0	0,0
	F_vEd [N]	0,0	0,0
force par connecteur	f_conn,Ed [N]	0,0	0,0
Espacement des connecteurs			
	s_conn	150 mm	
	v_Rd [N/mm]	1,39	
	F_vRd [N]	370490	

Si calcul plastique	Connexion totale	
	Position de l'axe neutre plastique:	
	Dans l'aile supérieure	
	F_vEd [N]	2875238
	nombre de gougeons nécessaires	
	Nnec	138,4
Connexion partielle		
	M_pla,Rd	356,0635551
	M_plb,Rd	731,7915166
	nombre de gougeons nécessaires	
	Nnec	0,0
force par connecteur	f_conn,Ed [N]	0

Récap	Description	Courte durée	Longue	Déterminant	Admissible	Réserve
ELU	Contrainte ma: $\sigma_{Ed,a}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,0	63,7	63,7	338,1	81,2%
	Connecteurs $F_v$ [N]	0	0	0	20775	100,0%
	Classe de section			1	3	66,7%
ELS		w [mm]		w_tot [mm]	w_lim [mm]	
	Aspect	8,3	12,3	12,3	17,8	31,1%
	Aptitude au fonctionnement	8,5	12,5	12,5	15,3	18,0%
	Confort	1,2	1,8	1,8	15,3	88,1%
	Virendeel	8,50	12,53	12,53	12,5	0,0%
				Réserve minir	0%	
				Réserve moye	53%	

Wply	iy	iz	Welz	Wplz	iz	h	b	tw	tf	r	élanement âme	élanement aile
mm <sup>3</sup>	mm	mm <sup>4</sup>	mm <sup>3</sup>	mm <sup>3</sup>	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
1053145,7	103,1	39226586,6	326888,2	498418,5	60,8	240,0	240,0	10,0	17,0	21,0	16,4	5,5

	235	275	355	460
IPE	600	400	400	270
HE	800	650	650	500



Déversement

L_B	5350,00 mm
C1	2,30 -
C2	0,50 -
C3	1,10 -
k_v	1,00 -
k_φ	1,00 -
I_z	3,92E+07 mm^4
I_ω	4,87E+11 mm^6
K	8,60E+05 mm^4
z_a	-120,00
β	0,00

M\_cr 9,24E+08 Nmm

W\_pl 1053145,73 mm^3

λ_D	0,64 -		
α_D	0,21 profilé laminé α_D	profilé laminé	0,21
Φ_D	0,73 -	profilé soudé	0,49
X_D	0,93 -		

Fluage béton:	phi_non fissuré	3,76	phi_semi fissuré	3,76	phi_mixte	3,11
	phi_fissuré	3,56				
	rho	0,010				
	d	135,00 mm				

Plancher Acier Béton déconnecté

Portée Toles	l	10000 mm
Espacement porteurs	s	5000 mm
Epaisseur béton	h	160 mm
Epaisseur moyenne béton h_moy		153 mm
Choix système statique		Poutre sur 3 appuis
Choix Tole		SuperHolorib 1,00mm
Epaisseur tole		1 mm
Charge utile admissible		10 kN/m <sup>2</sup>
Armature nécessaire		3,93 cm <sup>2</sup> /m
	rho	0,25%
Charge	Utile	3 kN/m <sup>2</sup>
	Surcharge	2 kN/m <sup>2</sup>
	q_d	7,2 kN/m <sup>2</sup>

Réaction d'appuis sur poutres transversales [kN/m']

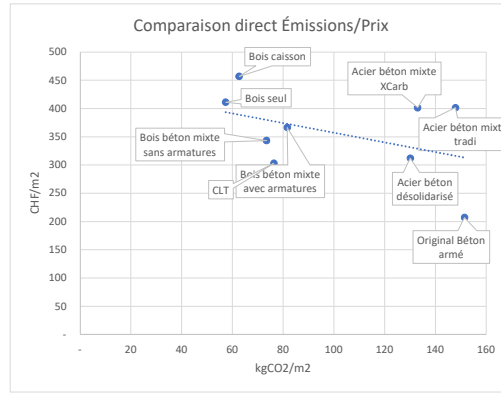
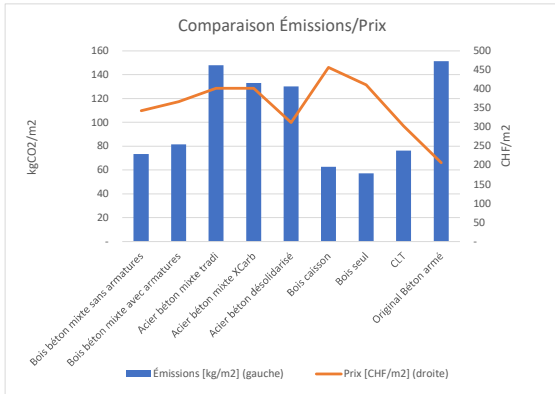
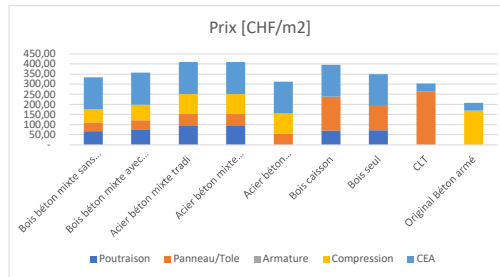
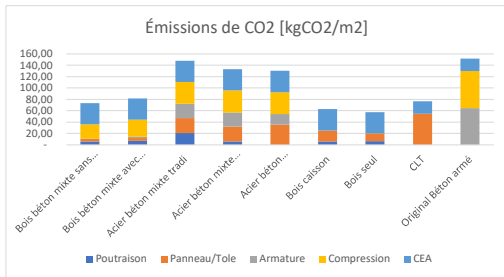
	Appui			
	1	2	3	4
Poutre simple	18	18		
Poutre sur 3 appuis	13,5	45	13,5	
Poutre sur 4 appuis	14,4	39,6	39,6	14,4

Tableau récapitulatif par m<sup>2</sup> de plancher

Critère	Variante								
	Bois béton mixte sans armatures	Bois béton mixte avec armatures	Acier béton mixte tradi	Acier béton mixte XCarb	Acier béton désolidarisé	Bois caisson	Bois seul	CLT	Original Béton armé
<b>Gros oeuvre</b>									
Volume poutres bois [m <sup>3</sup> ]	0,04	0,05	-	-	-	0,05	0,05	-	-
Longueur poutres bois [m']	1,11	1,33	-	-	-	1,67	1,67	-	-
Volume poutres métal [m <sup>3</sup> ]	-	-	0,00	0,00	-	-	-	-	-
Longueur poutres métal [m']	-	-	0,33	0,33	-	-	-	-	-
Volume béton [m <sup>3</sup> ]	0,10	0,12	0,15	0,15	0,15	-	-	-	0,26
Épaisseur de béton [mm]	100,00	120,00	152,52	152,52	153	-	-	-	260,00
Masse d'armature [kg]	-	1,48	16,44	16,44	12,34	-	-	-	42,30
Volume 3-plis [m <sup>3</sup> ]	0,02	0,02	-	-	-	0,08	0,06	0,24	-
Épaisseur de 3-plis [mm]	22,00	22,00	-	-	-	84,00	60,00	240,00	-
Épaisseur de tole [mm]	-	-	0,75	0,75	1,00	-	-	-	-
Nombre de connecteurs	1,78	1,78	1,11	1,11	-	11,11	11,11	-	-
Hauteur de plancher [mm]	322	322	400	400	160	284	300	240	260
Emissions [kgCO <sub>2</sub> ]	36,02	44,20	110,46	95,54	92,67	25,23	19,92	54,82	129,95
Prix [CHF]	185,44	208,58	243,56	243,56	154,33	299,11	253,11	265,00	169,00
<b>Second oeuvre</b>									
Épaisseur d'isolation [mm]	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Épaisseur de chape [mm]	80	80	80	80	80	80	80	80	80
Épaisseur de plâtre [mm]	24	24	24	24	24	24	24	-	-
Emissions [kgCO <sub>2</sub> ]	37,41	37,41	37,41	37,41	37,41	37,41	37,41	21,48	21,48
Prix [CHF]	158,00	158,00	158,00	158,00	158,00	158,00	158,00	38,00	38,00
<b>Total</b>									
Emissions [kgCO <sub>2</sub> ]	73,43	81,60	147,87	132,95	130,07	62,63	57,32	76,30	151,43
Prix [CHF]	343,44	366,58	401,56	401,56	312,33	457,11	411,11	303,00	207,00
Masse [kg]	466,88	519,48	576,32	576,32	578,98	247,81	236,68	276,70	810,30
Poids [kN]	4,58	5,10	5,65	5,65	5,68	2,43	2,32	2,71	7,95
Densité d'émission [kgCO <sub>2</sub> /kg]	0,16	0,16	0,26	0,23	0,22	0,25	0,24	0,28	0,19

Corrélation -0,47

Corrélation -0,44



## B Variante CLT orthotrope

### B.1 Charges

- Charge utile :  $3 \text{ [kN/m}^2\text{]}$  : Cat B, bureaux
- Charge permanente :  $3.64 \text{ [kN/m}^2\text{]}$  : 10 cm de lestage, 3 cm d'isolant EPS et 8 cm de chape ciment.

### B.2 Combinaisons

Deux situations sont analysées

- ELU type 2 :  $E_d = E\{\gamma_g g_{k1}, \gamma_g g_{k2}, \gamma_q q_k\}$   
 $\gamma_g = 1.35, \gamma_q = 1.5$
- ELS quasi permanent :  $E_d = E\{g_{k1}, g_{k2}, \psi_0 q_k\}$   
 $\psi_0 = 0.7$

### B.3 Déformations

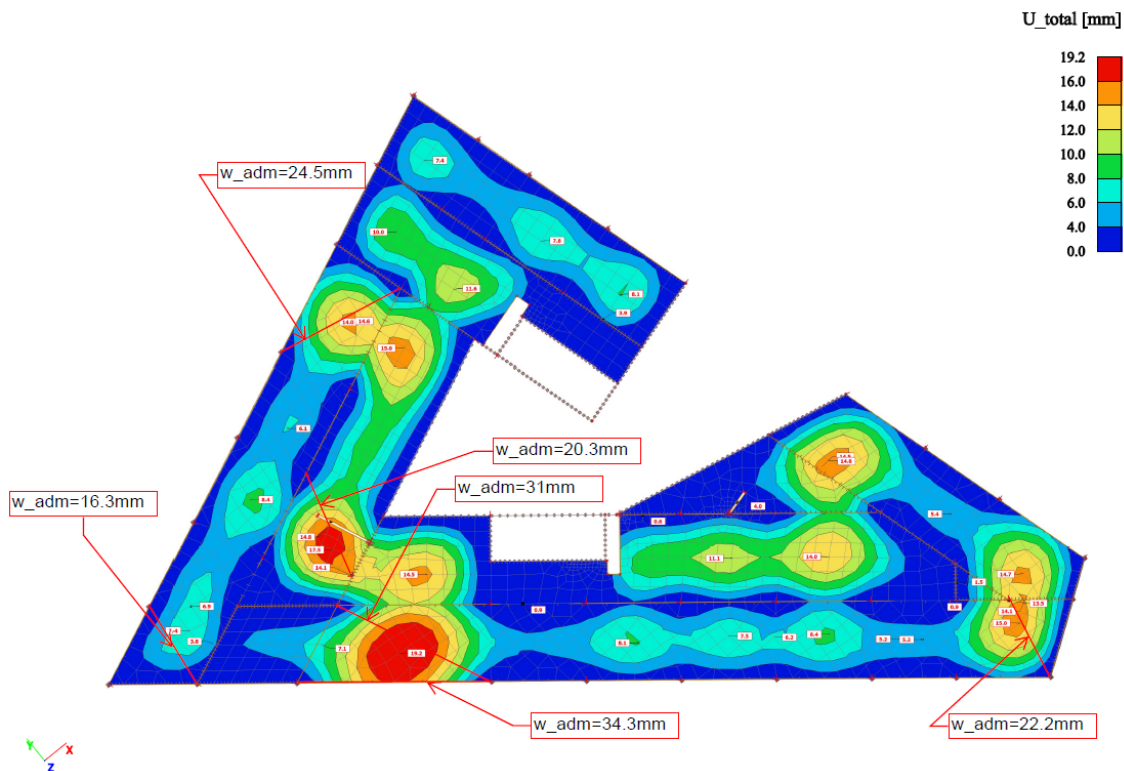


FIGURE 55 – Déformations : CLT orthotrope

Cette solution satisfait le critère de flèche le plus exigeant (1/350 pour un cas de charge, cas de charge fréquent, aptitude au fonctionnement). On remarque que même si on multiplie les déformations par un facteur 2 afin de prendre en compte le fluage (Assomption très conservatrice car le coefficient de fluage doit s'appliquer uniquement sur les éléments en bois et uniquement sur la part quasi-permanente de la charge utile) on ne dépasse pas les valeurs limite (voir figure 58).

## B.4 Efforts

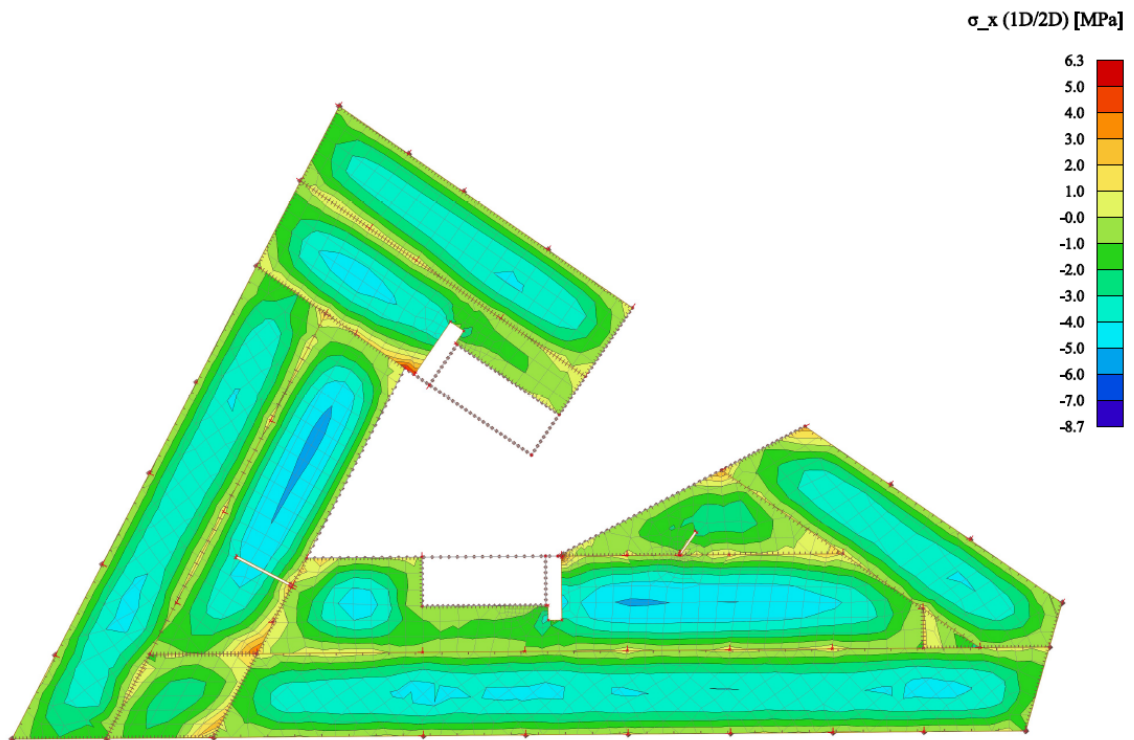


FIGURE 56 – Contraintes de flexion : sens porteur : CLT orthotrope

La contrainte maximale de flexion du C24 (14.1MPa) n'est jamais atteinte.

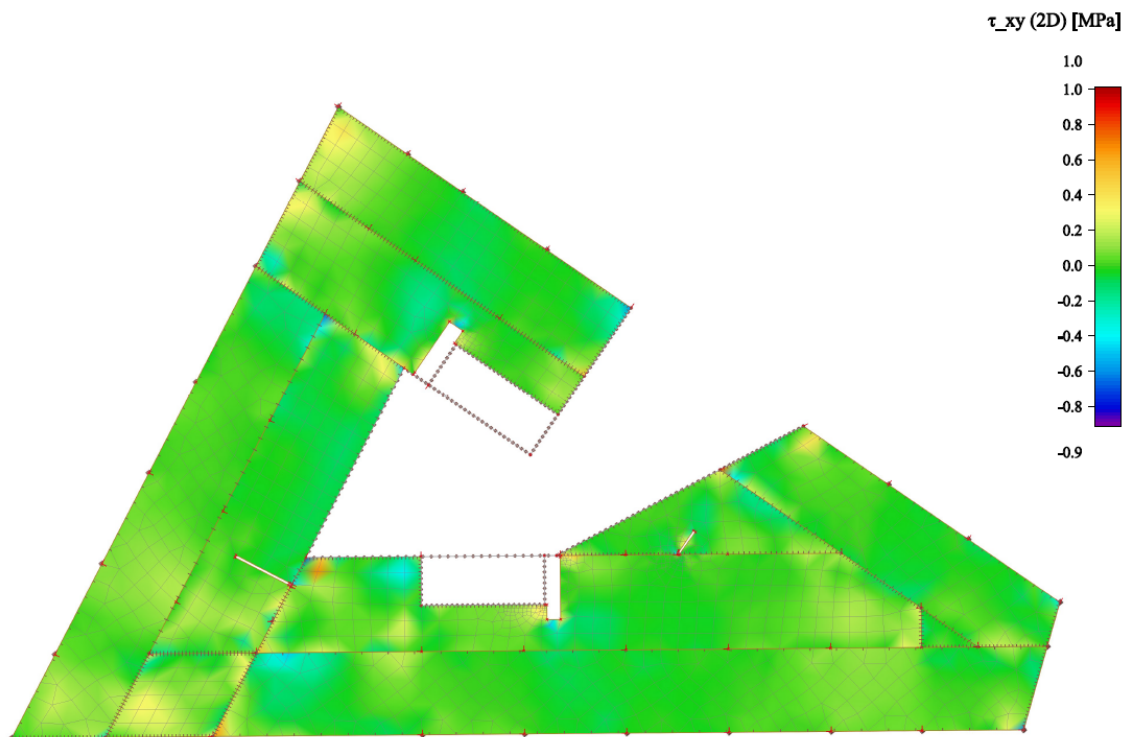


FIGURE 57 – Contrainte cisailante max : CLT orthotrope

La contrainte maximale de cisaillement du C24 (1.5MPa) n'est jamais atteinte.

## C Variante CLT isotrope

### C.1 Charges

- Charge utile :  $3 [kN/m^2]$  : Cat B, bureaux
- Charge permanente :  $3.34 [kN/m^2]$  : 9 cm de lestage, 3 cm d'isolant EPS et 8 cm de chape ciment.

### C.2 Combinaisons

Deux situations sont analysées

- ELU type 2 :  $E_d = E\{\gamma_g g_{k1}, \gamma_g g_{k2}, \gamma_q q_k\}$   
 $\gamma_g = 1.35, \gamma_q = 1.5$
- ELS quasi permanent :  $E_d = E\{g_{k1}, \psi_0 q_k\}$   
 $\psi_0 = 0.7$

### C.3 Déformations

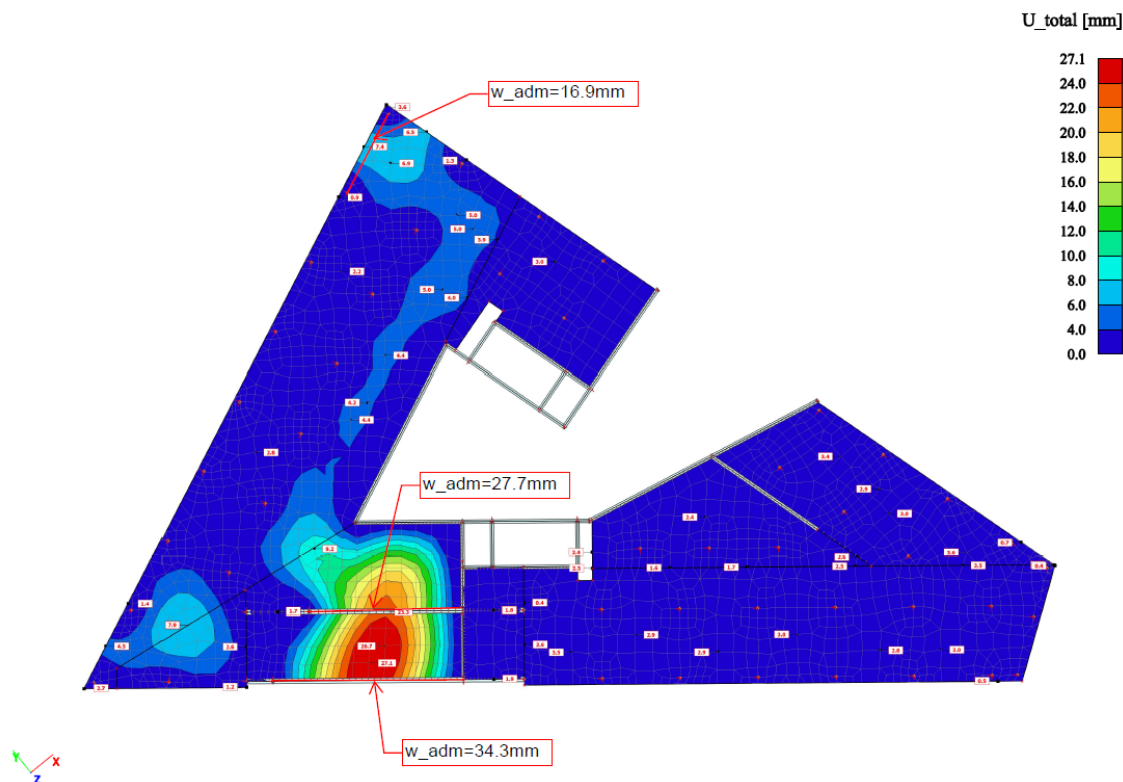


FIGURE 58 – Déformations : CLT orthotrope

Cette solution satisfait le critère de flèche le plus exigeant ( $1/350$  pour un cas de charge, cas de charge fréquent, aptitude au fonctionnement). On remarque que même si on multiplie les déformation par un facteur 2 afin de prendre en compte le fluage (Assomption très conservatrice car le coefficient de fluage doit s'appliquer

uniquement sur les éléments en bois et uniquement sur la part quasi-permanente de la charge utile) on ne dépasse pas les valeurs limite (voir figure 58). Il faut aussi noter que les déformations dans la zone de surplomb sont supportées principalement par des sommiers en acier et ne subissent donc pas le fluage.

#### C.4 Efforts



FIGURE 59 – Contraintes de flexion : sens porteur : CLT isotrope

La contrainte maximale de flexion du C24 (14.1MPa) n'est jamais atteinte.

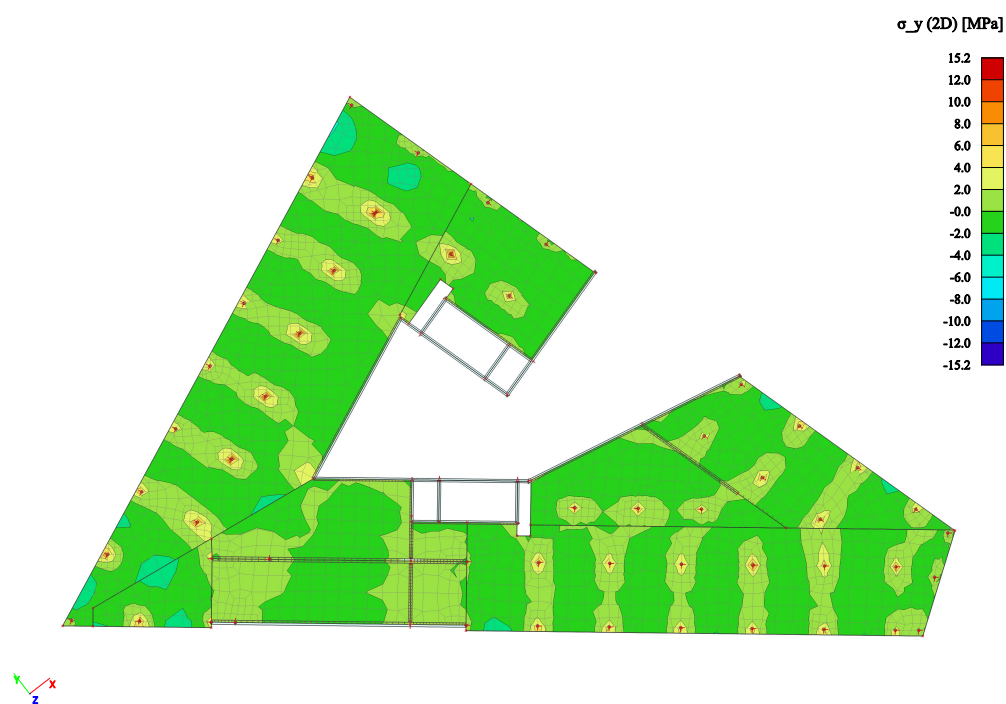


FIGURE 60 – Contraintes de flexion : sens perpendiculaire au sens porteur : CLT isotrope

La contrainte maximale de flexion du C24 (14.1MPa) n'est atteinte que très ponctuellement et est compensée par le dispositif d'appuis.



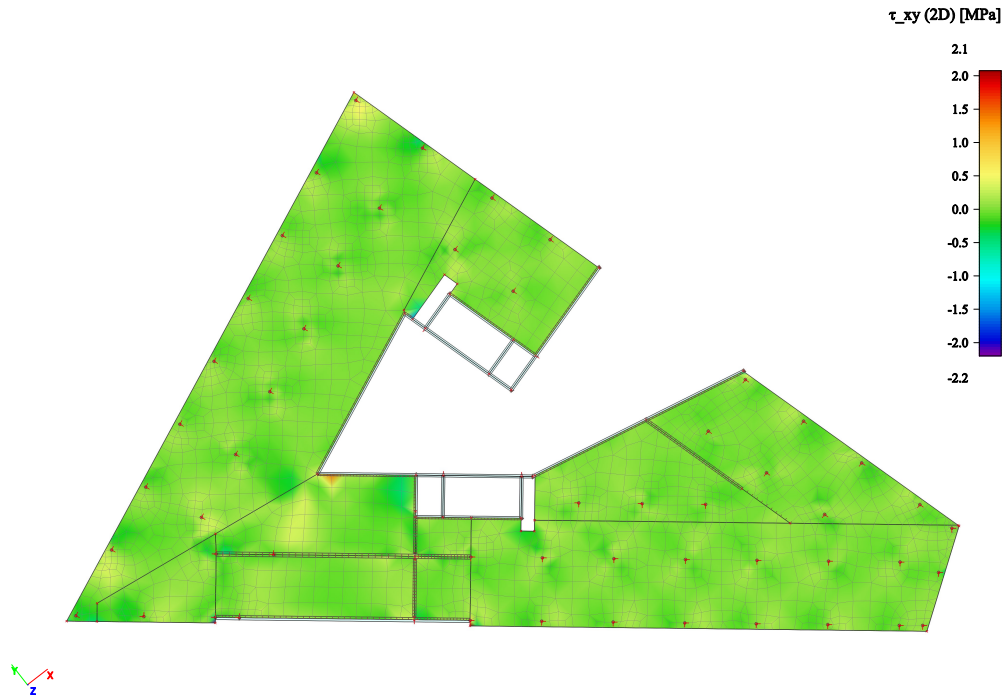


FIGURE 61 – Contrainte cisillante max : CLT isotrope

La contrainte maximale de cisaillement du C24 (1.5MPa) n'est atteinte qu'au droit de certains piliers. Cette zone est très restreinte et, dans la réalité, le panneau est percé à cet endroit pour laisser passer l'appareil d'appui des poteaux.

## D Variante acier-béton mixte

### D.1 Charges

- Charge utile : 3 [kN/m<sup>2</sup>] : Cat B, bureaux
- Charge permanente : 1.54 [kN/m<sup>2</sup>] : 3 cm d'isolant EPS et 8 cm de chape ciment.

### D.2 Combinaisons

Deux situations sont analysées

- ELU type 2 :  $E_d = E\{\gamma_g g_{k1}, \gamma_g g_{k2}, \gamma_q q_k\}$   
 $\gamma_g = 1.35, \gamma_q = 1.5$
- ELS quasi permanent :  $E_d = E\{g_{k1}, g_{k2}, \psi_0 q_k\}$   
 $\psi_0 = 0.7$

### D.3 Déformations

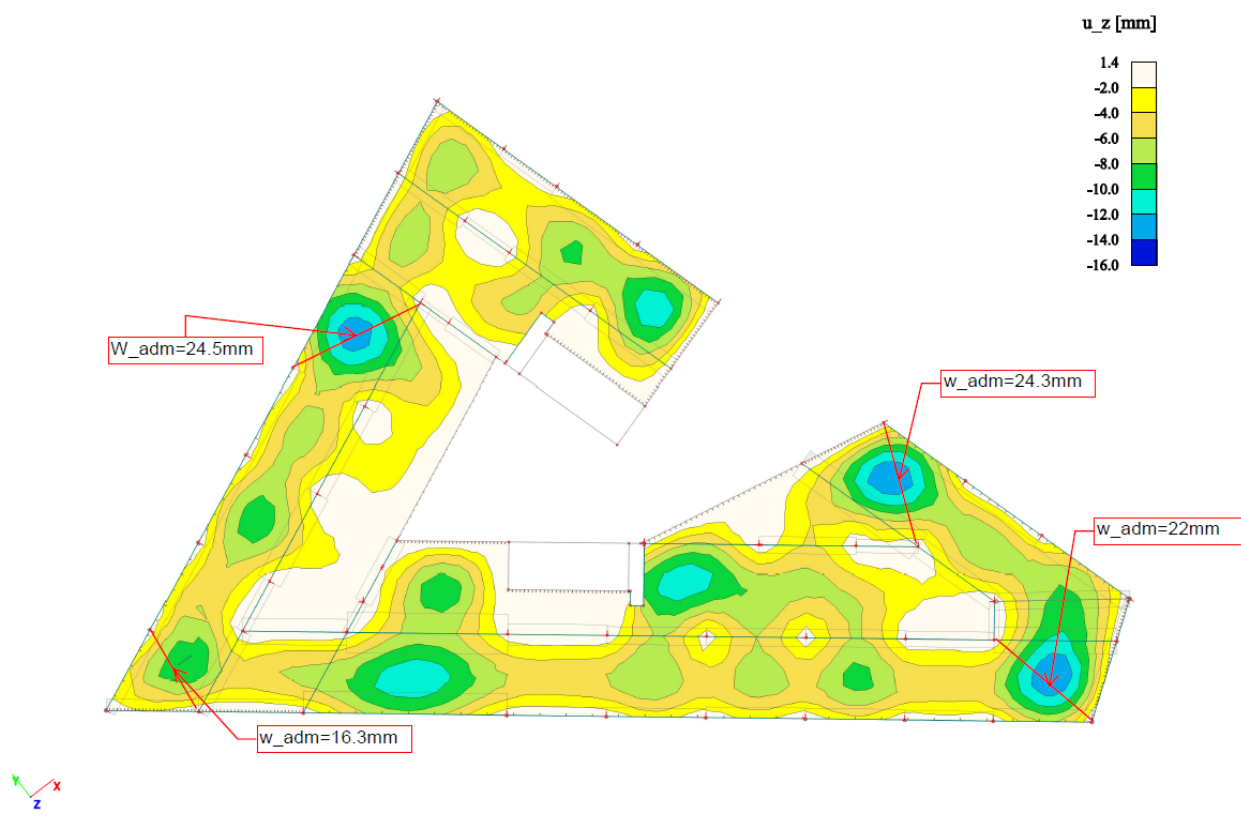


FIGURE 62 – Déformations : Acier-béton mixte

## D.4 Efforts

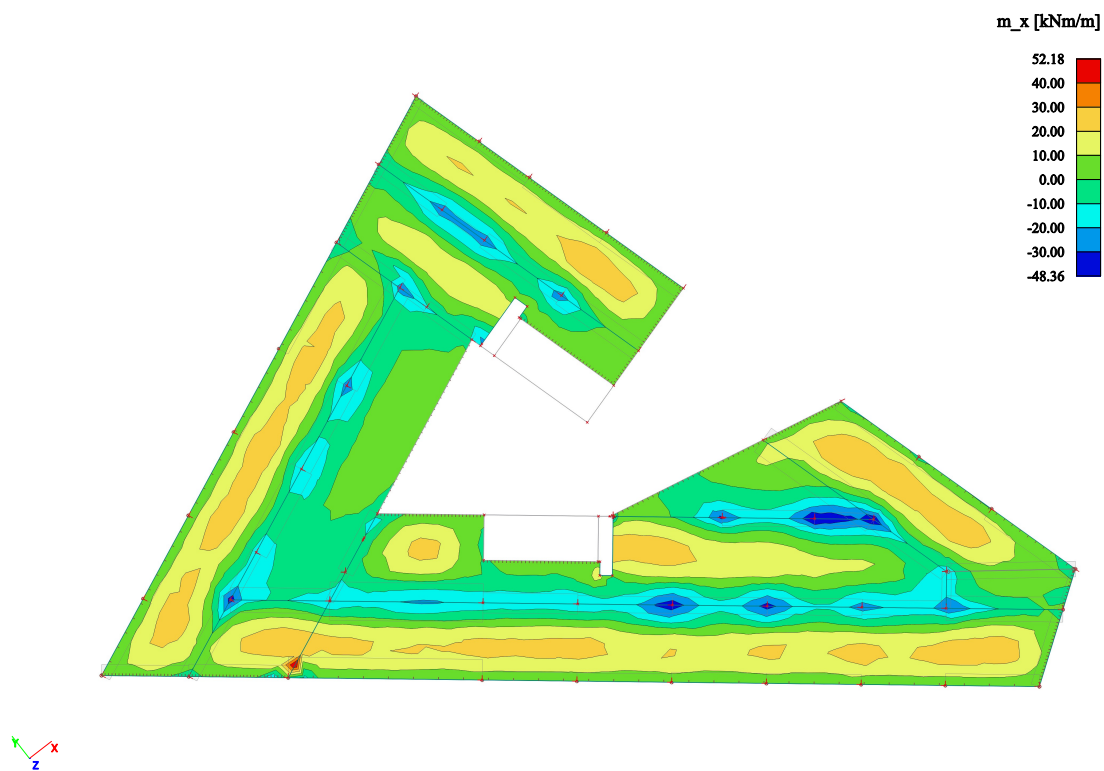


FIGURE 63 – Moment axe fort : Acier-béton mixte

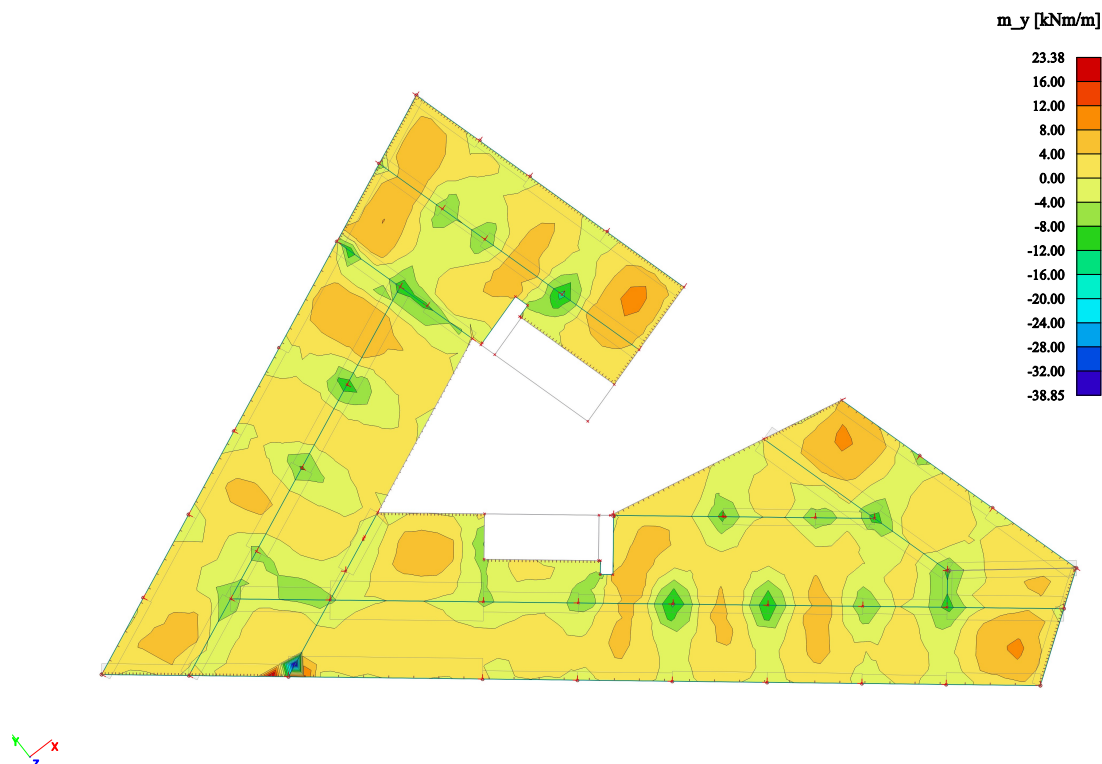


FIGURE 64 – Moment axe faible : Acier-béton mixte

## E Variante finale

### E.1 Charges

— **Charges variables :**

3 [kN/m<sup>2</sup>] : Cat B, bureaux (étages)

0.4 [kN/m<sup>2</sup>] : Cat H, toiture non accessible (toiture)

1 [kN/m<sup>2</sup>] : neige altitude 460m (toiture)

— **Charges permanentes :**

3.34 [kN/m<sup>2</sup>] : 9 cm de lestage, 3 cm d'isolant EPS et 8 cm de chape ciment.

2 [kN/m<sup>2</sup>] : toiture, gravier et panneaux solaires

### E.2 Combinaisons

Deux situations sont analysées

— ELU type 2 :  $E_d = E\{\gamma_g g_{k1}, \gamma_g g_{k2}, \gamma_q q_{k1}, \psi_0 q_{k2}\}$

$\gamma_g = 1.35, \gamma_q = 1.5$

— ELS quasi permanent :  $E_d = E\{g_{k1}, \psi_0 q_{k1}, \psi_2 q_{k2}\}$

$\psi_0 = 0.7$  pour la charge utile,  $\psi_0 = 0.85$  pour la neige

Pour des raisons de lisibilité et étant donné que le dimensionnement n'est pas le focus de cet étude, les vérifications sont présentées pour l'étage R+2

## E.3 Déformations

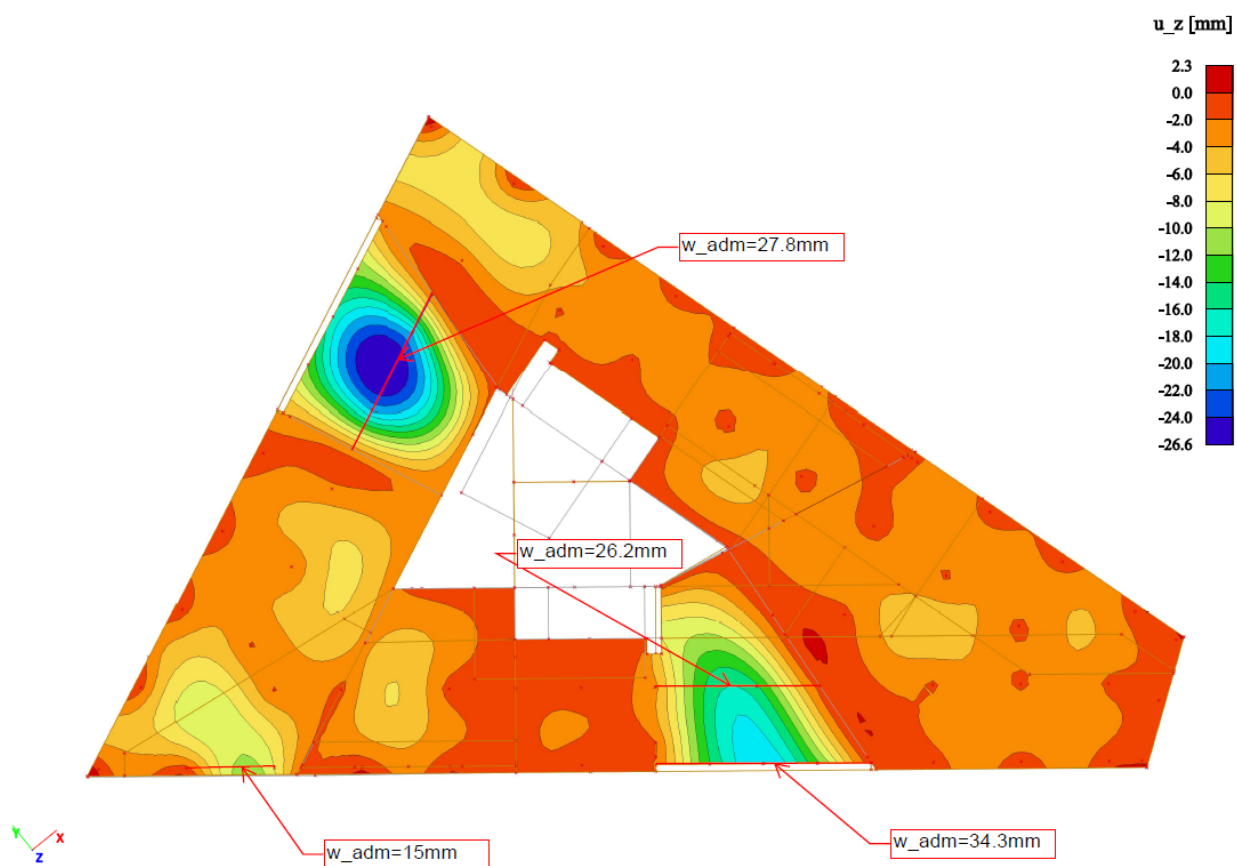


FIGURE 65 – R+2 : Déformations

E.4 Efforts

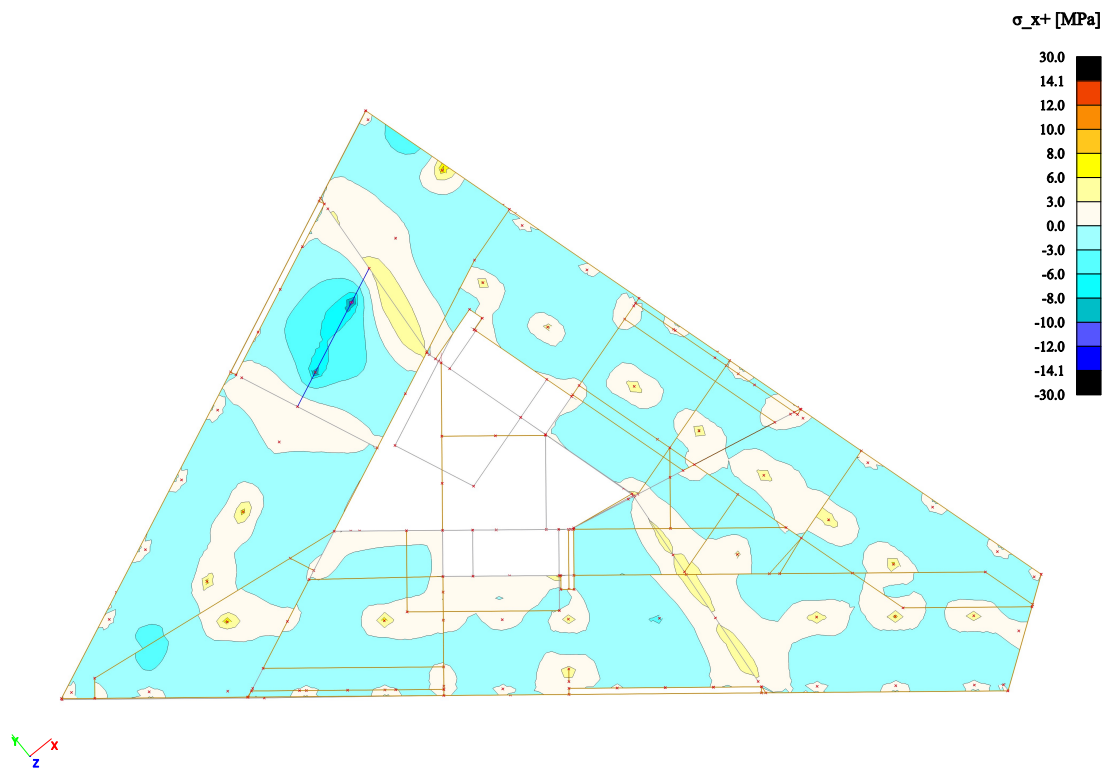
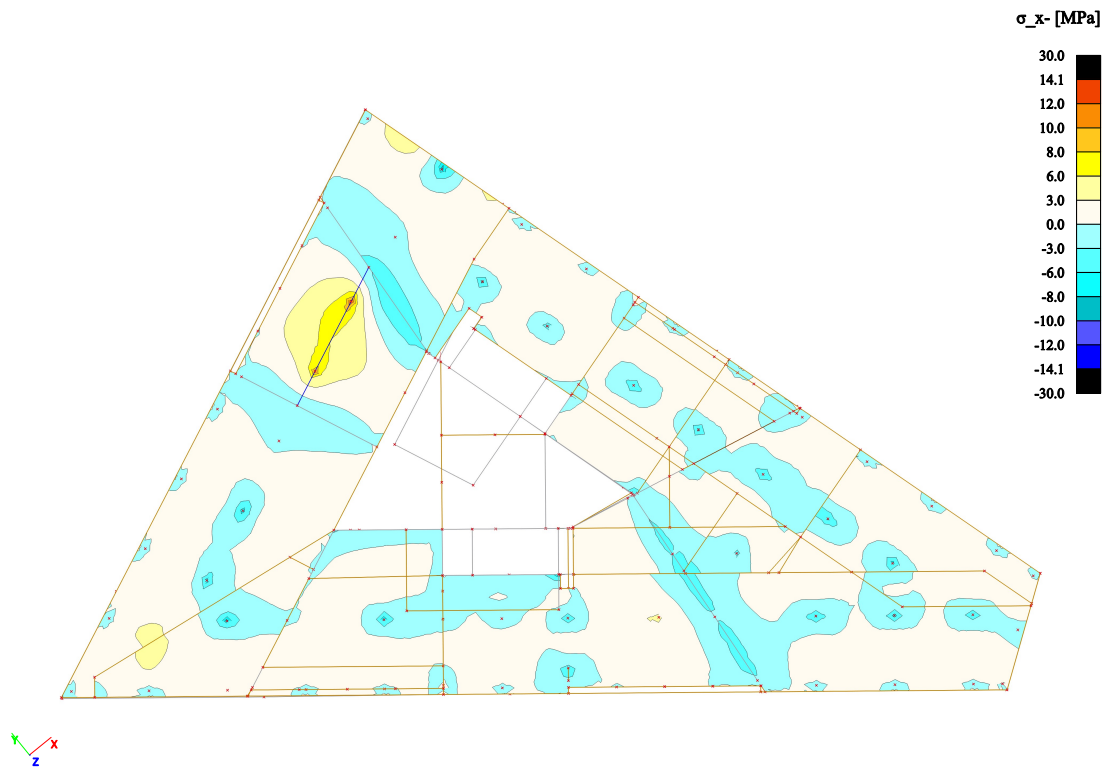


FIGURE 66 - R+2 :  $\sigma_x^+$

FIGURE 67 – R+2 :  $\sigma_x^-$

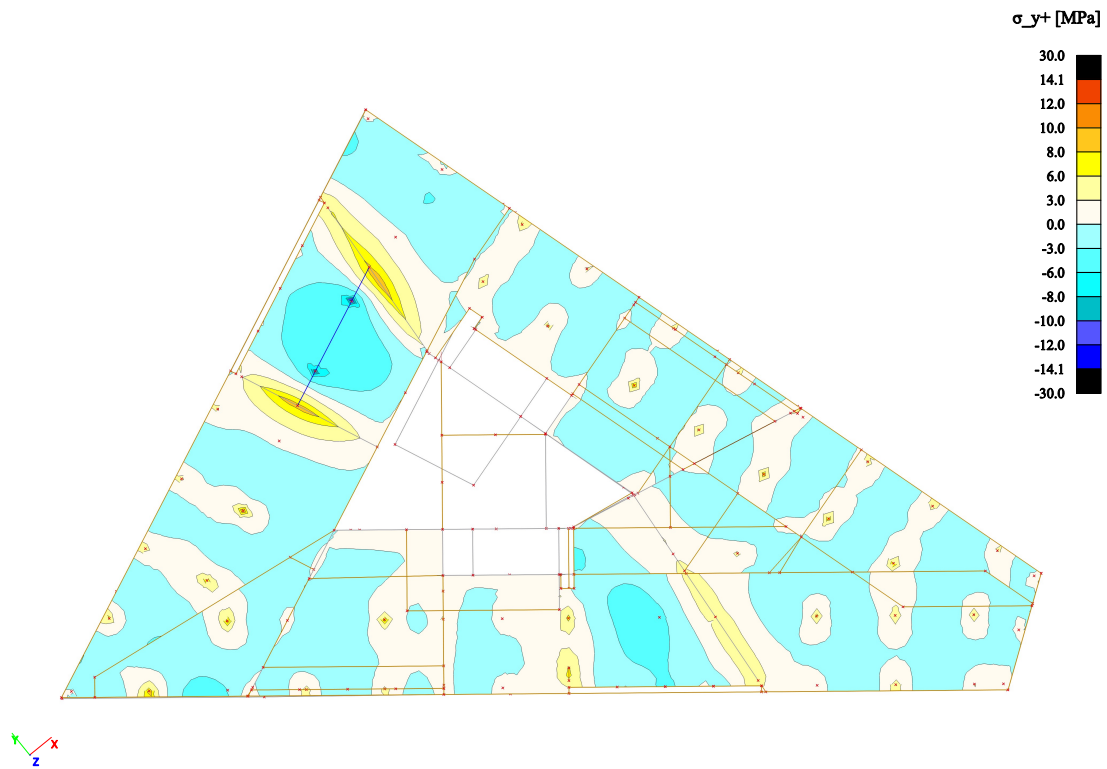
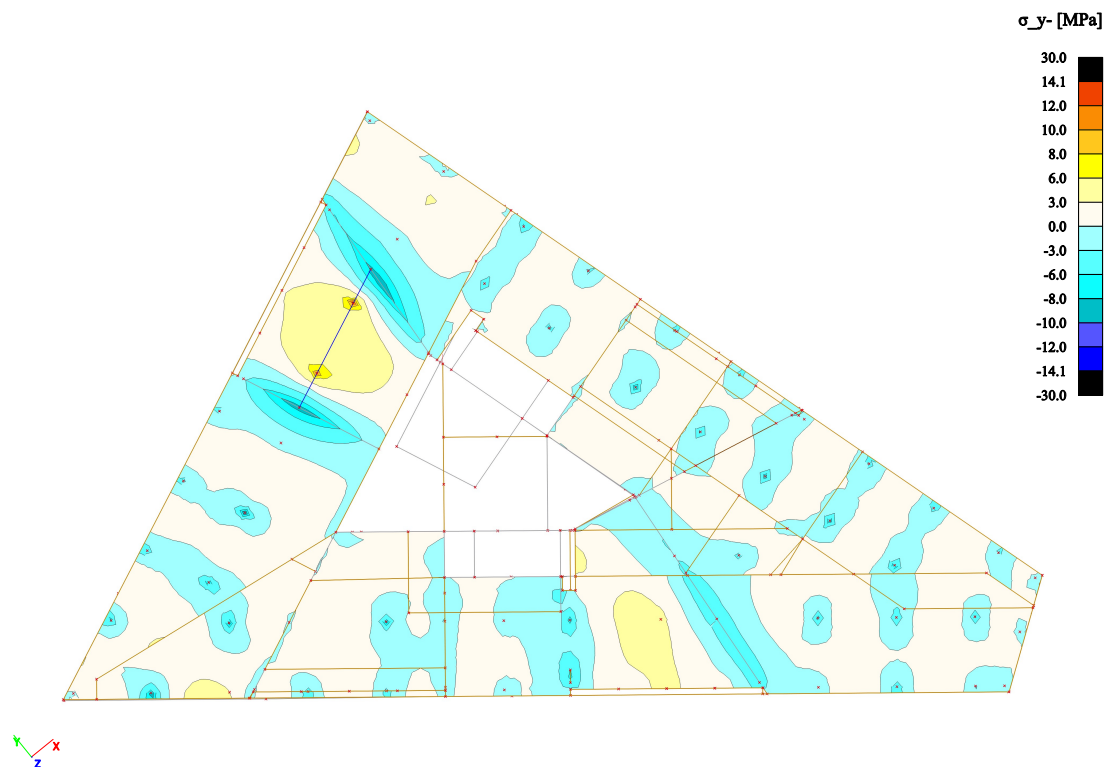
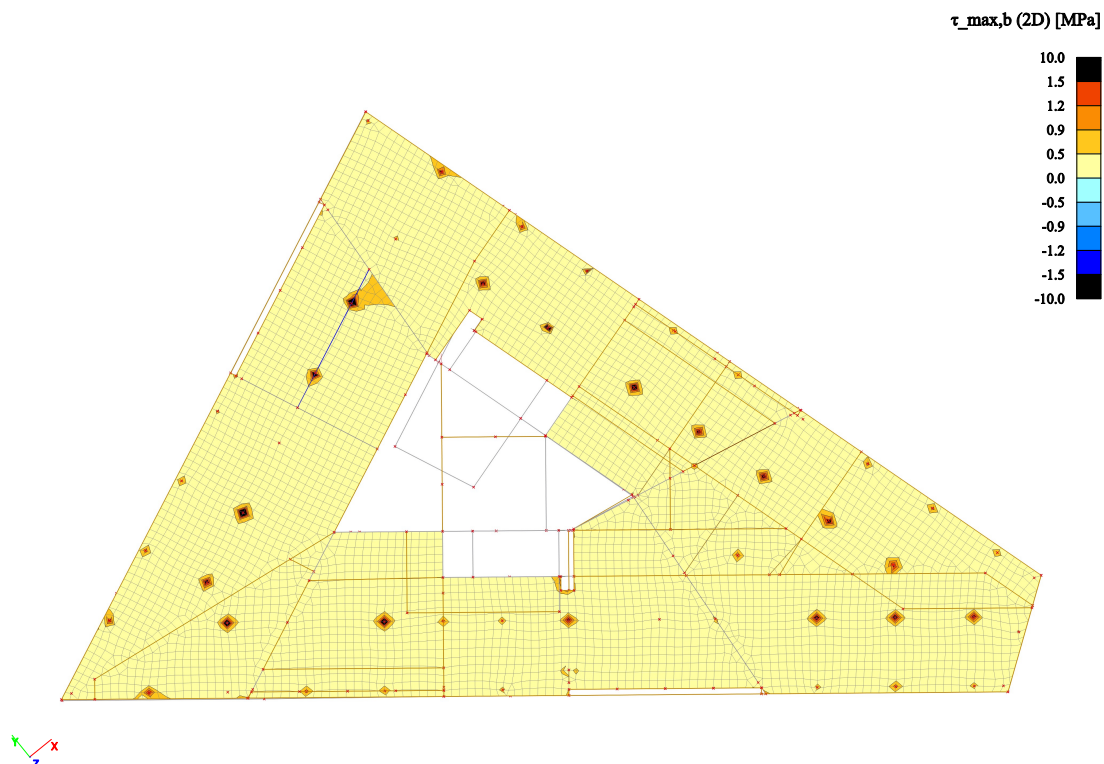


FIGURE 68 – R+2 :  $\sigma_y^+$



FIGURE 69 – R+2 :  $\sigma_y^-$ 

Toutes les contraintes de flexions sont admissibles, même au droit des piliers

FIGURE 70 – R+2 :  $\tau_{max,b}$ 

Les contraintes de cisaillement sont admissibles partout sauf au droit de certains piliers. Ceci est dû au fait que le modèle ne prend pas en compte les appareils d'appuis. Ceux-ci permettent une transmission des efforts de cisaillement via une bielle directe.

## E.5 Murs sismiques

Les efforts présentés ci-après ont été obtenus après une modélisation sur le logiciel SCIA Engineer. La rigidité des murs a été modifiée afin de prendre en compte la fissuration (voir après). La méthode de calcul utilisée est la méthode du spectre de réponse avec 16 modes propres calculés pour une masse entraînée de 96% en x et 90% en y. Le bâtiment se trouve en zone Z1b et le sol est de catégorie E.

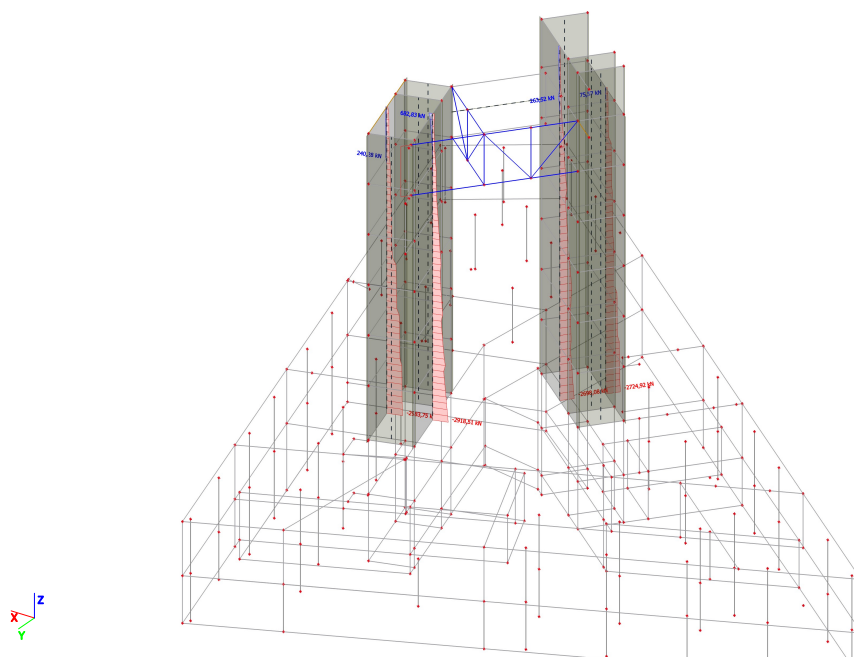


FIGURE 71 – Murs sismiques longs : N

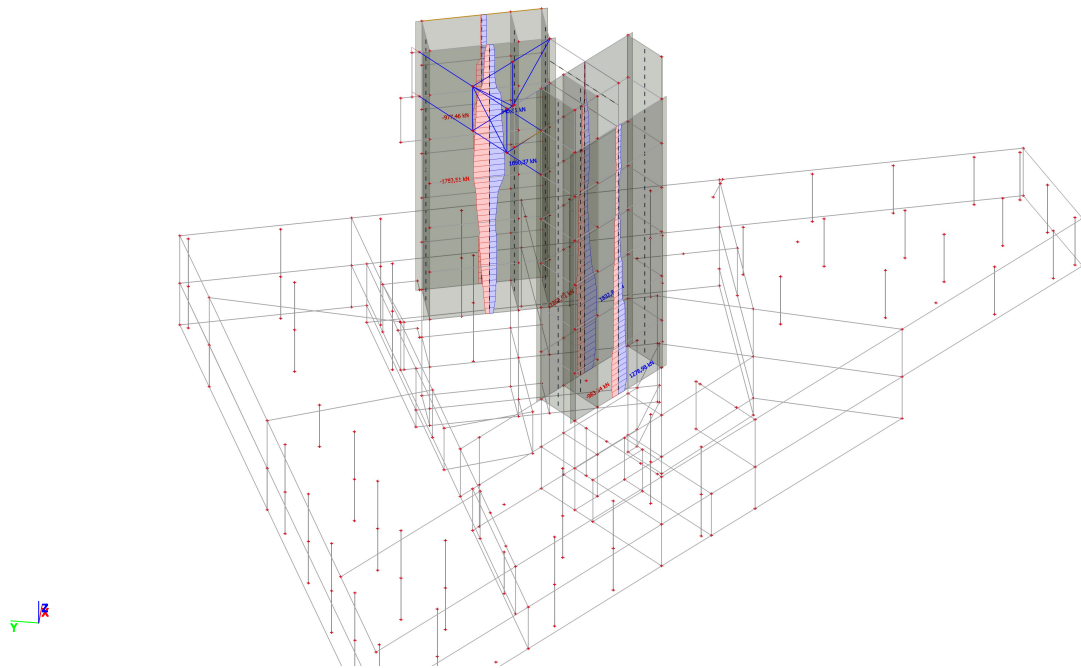


FIGURE 72 – Murs sismiques longs : V

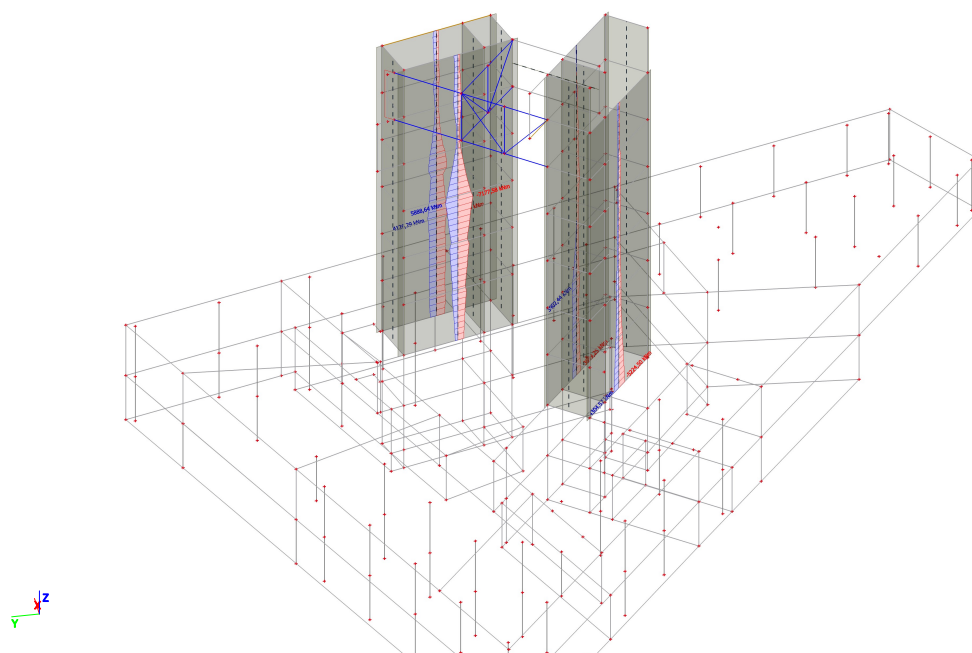


FIGURE 73 – Murs sismiques longs : M

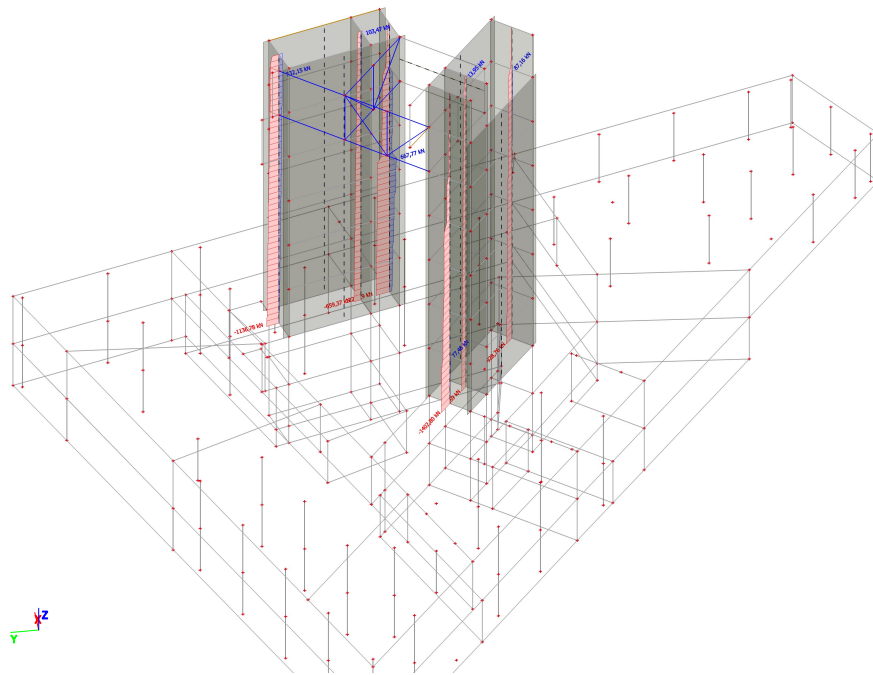


FIGURE 74 – Murs sismiques courts : N

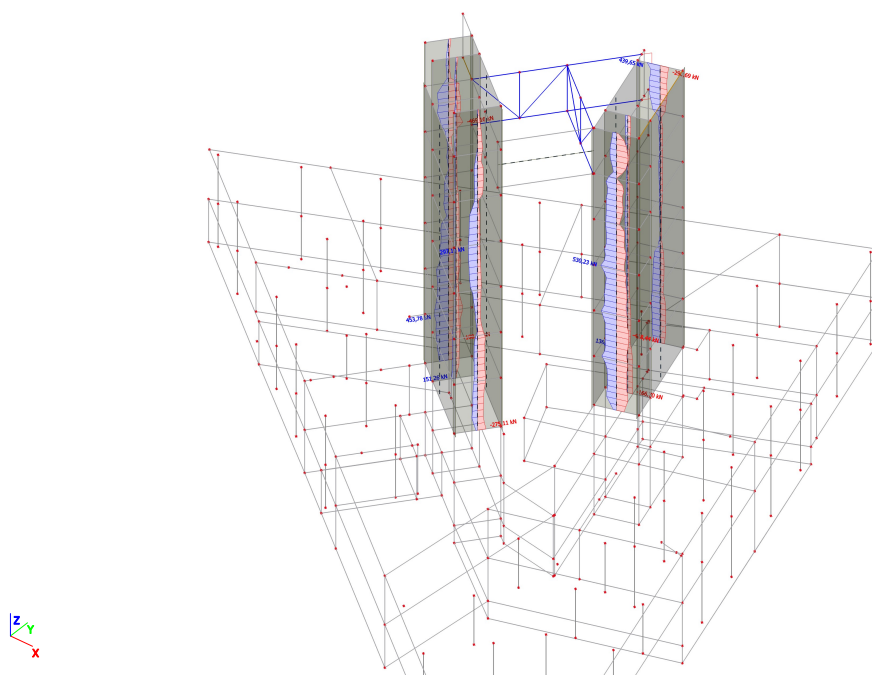


FIGURE 75 – Murs sismiques courts : V

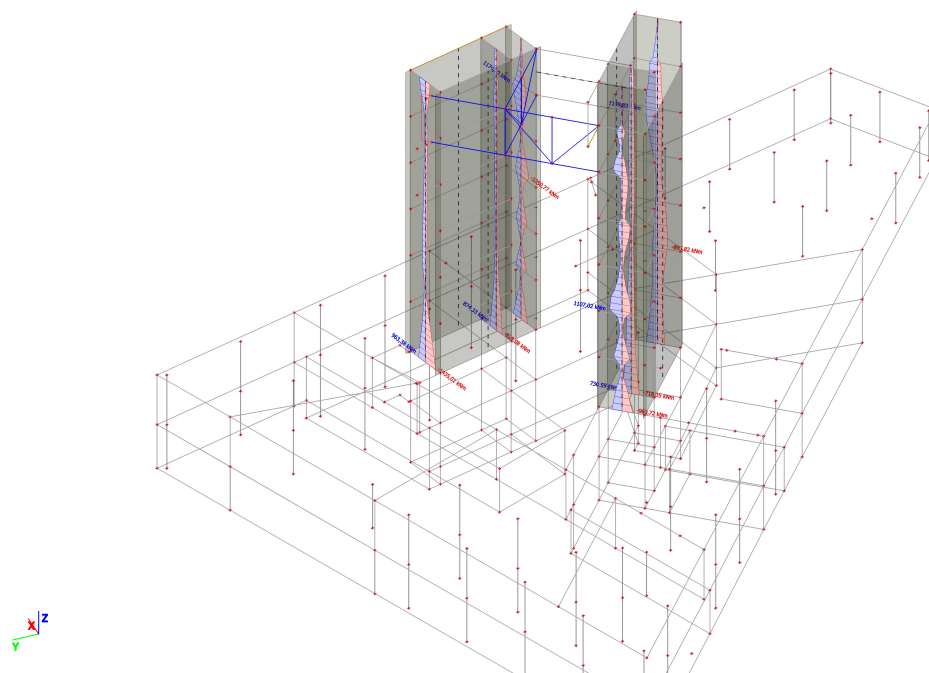


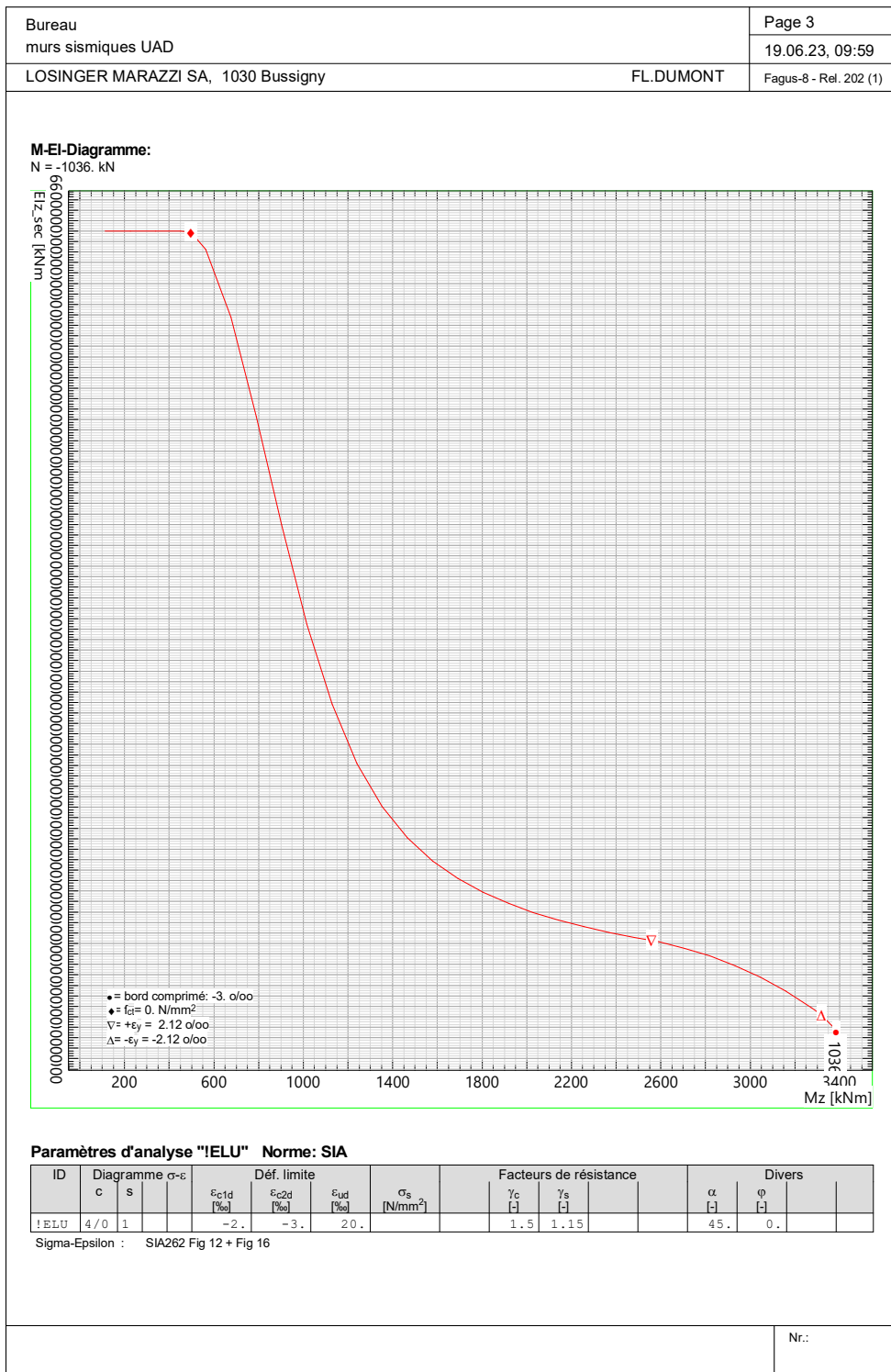
FIGURE 76 – Murs sismiques courts : M

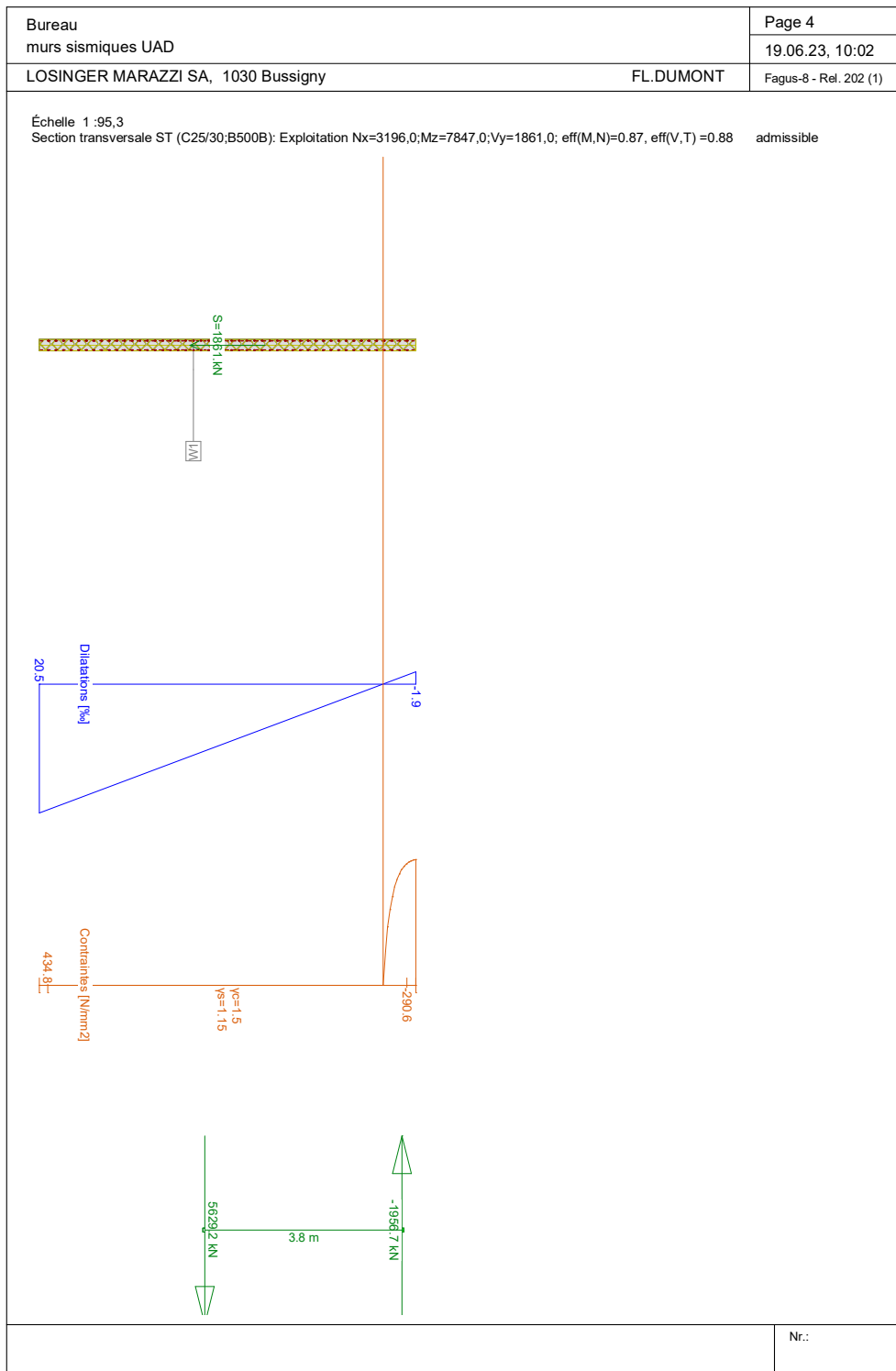
Les efforts pris en compte et les armatures nécessaires sont les suivants :

Mur	nombre	longueur [m]	largeur [m]	N [kN]	V [kN]	M [kNm]	ratio armature [kg/m <sup>3</sup> ]	taux d'armature
long	4	7,245	0,22	3196	1861	7847	97,1	1,24%
court	6	2,875	0,22	1036	484	1119	81,2	1,03%



Bureau murs sismiques UAD		Page 2																																											
LOSINGER MARAZZI SA, 1030 Bussigny		19.06.23, 09:59																																											
FL.DUMONT		Fagus-8 - Rel. 202 (1)																																											
Échelle 1 : 128,9 (-9.37,-7.81..12.52,1.99) Section transversale ST1 (C25/30;B500B): Exploitation Nx=1036,0;Mz=1119,0;Vy=484,0; eff(M,N)=0.95, eff(V,T)=0.58 admissible																																													
<b>Charge ultime Section (Poutre): ST1</b>																																													
<b>Sollicitations / Taux d'exploitation: eff(M,N)=0.95, eff(V,T)=0.58 admissible</b>																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">No</th> <th rowspan="2">AP</th> <th rowspan="2">P</th> <th colspan="3">Flexion et effort normal</th> <th rowspan="2">eff(M,N)</th> <th colspan="3">Effort tranchant et torsion</th> <th rowspan="2">eff(V,T)</th> <th rowspan="2">Section complète eff(M,N,V,T)</th> </tr> <tr> <th>N [kN]</th> <th>My [kNm]</th> <th>Mz [kNm]</th> <th>Vy [kN]</th> <th>Vz [kN]</th> <th>T [kNm]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>!ELU</td> <td></td> <td>1036,0</td> <td>0</td> <td>1119,0</td> <td>0,95</td> <td>484,0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0,58</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				No	AP	P	Flexion et effort normal			eff(M,N)	Effort tranchant et torsion			eff(V,T)	Section complète eff(M,N,V,T)	N [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Vy [kN]	Vz [kN]	T [kNm]	1	!ELU		1036,0	0	1119,0	0,95	484,0	0	0	0,58													
No	AP	P	Flexion et effort normal				eff(M,N)	Effort tranchant et torsion			eff(V,T)	Section complète eff(M,N,V,T)																																	
			N [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Vy [kN]		Vz [kN]	T [kNm]																																				
1	!ELU		1036,0	0	1119,0	0,95	484,0	0	0	0,58																																			
<b>Paramètres d'analyse "IELU" Norme: SIA</b>																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">ID</th> <th colspan="2">Diagramme σ-ε</th> <th colspan="3">Déf. limite</th> <th rowspan="2">σs [N/mm²]</th> <th colspan="3">Facteurs de résistance</th> <th colspan="2">Divers</th> </tr> <tr> <th>c</th> <th>s</th> <th>εc1d [%]</th> <th>εc2d [%]</th> <th>εud [%]</th> <th>γc [-]</th> <th>γs [-]</th> <th>α [-]</th> <th>φ [-]</th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>!ELU</td> <td>4/0</td> <td>1</td> <td>-2.</td> <td>-3.</td> <td>20.</td> <td></td> <td>1.5</td> <td>1.15</td> <td></td> <td>45.</td> <td>0.</td> </tr> </tbody> </table> Sigma-Epsilon : SIA262 Fig 12 + Fig 16				ID	Diagramme σ-ε		Déf. limite			σs [N/mm²]	Facteurs de résistance			Divers		c	s	εc1d [%]	εc2d [%]	εud [%]	γc [-]	γs [-]	α [-]	φ [-]		!ELU	4/0	1	-2.	-3.	20.		1.5	1.15		45.	0.								
ID	Diagramme σ-ε		Déf. limite			σs [N/mm²]	Facteurs de résistance				Divers																																		
	c	s	εc1d [%]	εc2d [%]	εud [%]		γc [-]	γs [-]	α [-]	φ [-]																																			
!ELU	4/0	1	-2.	-3.	20.		1.5	1.15		45.	0.																																		
<b>Contraintes et dilatations extrêmes</b>																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Nom</th> <th>Classe</th> <th>Yd [m]</th> <th>Zd [m]</th> <th>ε [%]</th> <th>σd [N/mm²]</th> <th>γ [-]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C1</td> <td>C25/30</td> <td>2.88</td> <td>0.</td> <td>-1.5</td> <td>-16.4</td> <td>1.50</td> </tr> <tr> <td>c1</td> <td>C25/30</td> <td>0.</td> <td>0.</td> <td>20.2</td> <td>0.</td> <td>1.50</td> </tr> <tr> <td>R2</td> <td>B500B</td> <td>2.85</td> <td>0.2</td> <td>-1.4</td> <td>-286.5</td> <td>1.15</td> </tr> <tr> <td>R2</td> <td>B500B</td> <td>0.02</td> <td>0.2</td> <td>20.</td> <td>434.8</td> <td>1.15</td> </tr> <tr> <td colspan="2">Étriers (!SIG-ASW)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>251.2</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>				Nom	Classe	Yd [m]	Zd [m]	ε [%]	σd [N/mm²]	γ [-]	C1	C25/30	2.88	0.	-1.5	-16.4	1.50	c1	C25/30	0.	0.	20.2	0.	1.50	R2	B500B	2.85	0.2	-1.4	-286.5	1.15	R2	B500B	0.02	0.2	20.	434.8	1.15	Étriers (!SIG-ASW)					251.2	
Nom	Classe	Yd [m]	Zd [m]	ε [%]	σd [N/mm²]	γ [-]																																							
C1	C25/30	2.88	0.	-1.5	-16.4	1.50																																							
c1	C25/30	0.	0.	20.2	0.	1.50																																							
R2	B500B	2.85	0.2	-1.4	-286.5	1.15																																							
R2	B500B	0.02	0.2	20.	434.8	1.15																																							
Étriers (!SIG-ASW)					251.2																																								
<b>État limite "IELU"</b>																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">N [kN]</th> <th colspan="2">Efforts intérieurs</th> <th colspan="3">Élongation et courbures</th> <th colspan="3">Rigidités</th> </tr> <tr> <th>My [kNm]</th> <th>Mz [kNm]</th> <th>εx [%]</th> <th>χy [km⁻¹]</th> <th>χz [km⁻¹]</th> <th>N/εx [kN]</th> <th>My/χy [kNm²]</th> <th>Mz/χz [kNm²]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1087.5</td> <td>0.</td> <td>1175.3</td> <td>9,3</td> <td>0,0</td> <td>7,5</td> <td>116919.86</td> <td>626.51</td> <td>155717.77</td> </tr> </tbody> </table>				N [kN]	Efforts intérieurs		Élongation et courbures			Rigidités			My [kNm]	Mz [kNm]	εx [%]	χy [km⁻¹]	χz [km⁻¹]	N/εx [kN]	My/χy [kNm²]	Mz/χz [kNm²]	1087.5	0.	1175.3	9,3	0,0	7,5	116919.86	626.51	155717.77																
N [kN]	Efforts intérieurs		Élongation et courbures			Rigidités																																							
	My [kNm]	Mz [kNm]	εx [%]	χy [km⁻¹]	χz [km⁻¹]	N/εx [kN]	My/χy [kNm²]	Mz/χz [kNm²]																																					
1087.5	0.	1175.3	9,3	0,0	7,5	116919.86	626.51	155717.77																																					
<b>Détails des éléments de résistance au cisaillement</b>																																													
C25/30;B500B Ak = 0.5481 [m²] uk = 6.08 [m] tef = 0.03 [m] Valeurs de la section complète																																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>No</th> <th>Nom</th> <th>Vd [kN]</th> <th>bw [m]</th> <th>z [m]</th> <th>α</th> <th>effc</th> <th>asw [mm²/m]</th> <th>eff(V,T)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>w1</td> <td>484.</td> <td>0.22</td> <td>2.88</td> <td>45.</td> <td>0.17</td> <td>670</td> <td>0.58</td> </tr> </tbody> </table>				No	Nom	Vd [kN]	bw [m]	z [m]	α	effc	asw [mm²/m]	eff(V,T)	1	w1	484.	0.22	2.88	45.	0.17	670	0.58																								
No	Nom	Vd [kN]	bw [m]	z [m]	α	effc	asw [mm²/m]	eff(V,T)																																					
1	w1	484.	0.22	2.88	45.	0.17	670	0.58																																					
Nr.:																																													

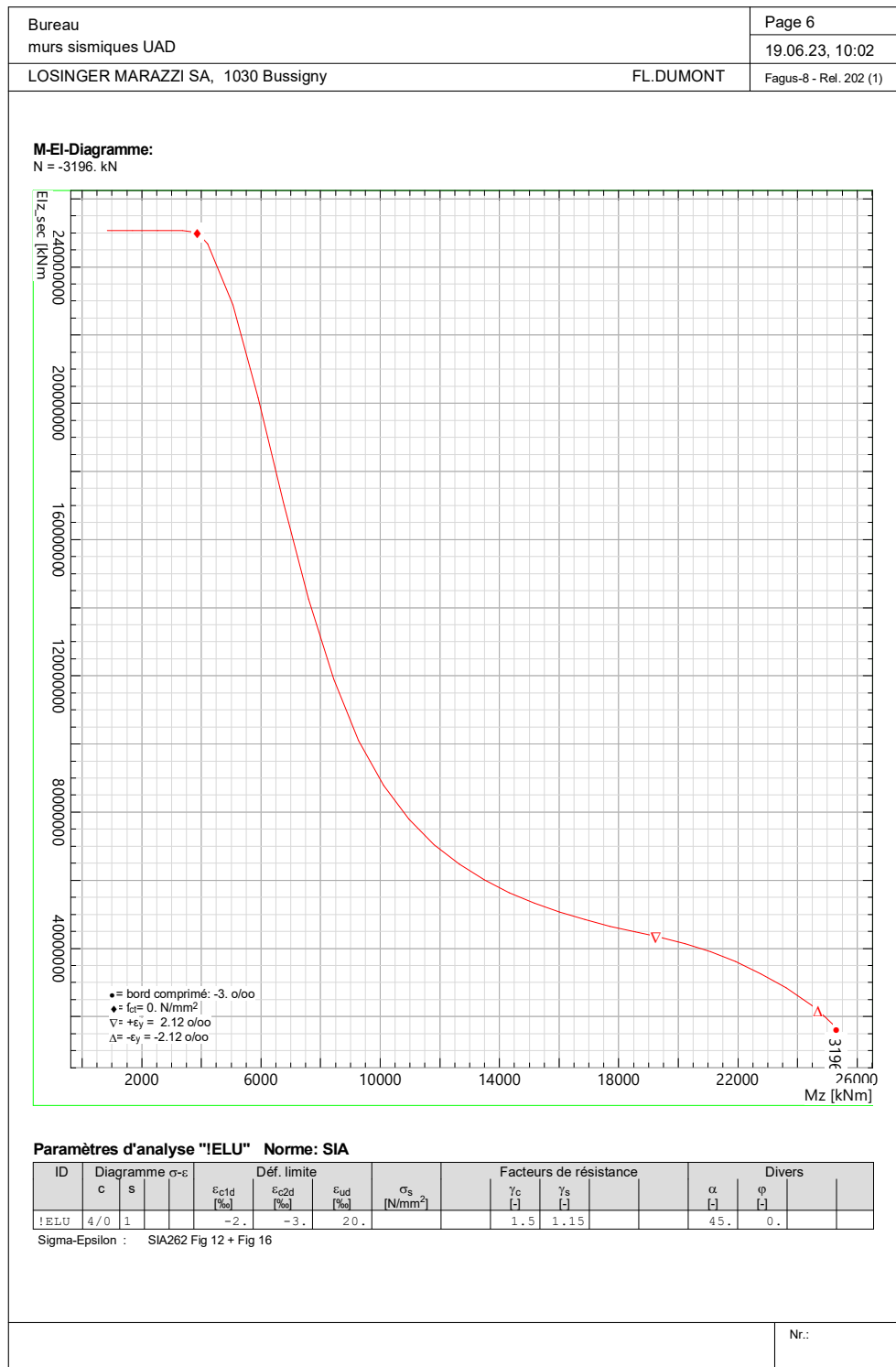




C:\Users\FL.DUMONT\OneDrive - BYCN\Bureau\murs sismiques UAD.FG8

Bureau murs sismiques UAD										Page 5			
LOSINGER MARAZZI SA, 1030 Bussigny										FL.DUMONT		19.06.23, 10:02	
LOSINGER MARAZZI SA, 1030 Bussigny										FL.DUMONT		Fagus-8 - Rel. 202 (1)	
<b>Charge ultime Section (Poutre): ST</b>													
<b>Sollicitations / Taux d'exploitation: eff(M,N)=0.87, eff(V,T)=0.88 admissible</b>													
No	AP	P	N [kN]	Flexion et effort normal M <sub>y</sub> [kNm]    M <sub>z</sub> [kNm]		eff(M,N) [-]	V <sub>y</sub> [kN]	V <sub>z</sub> [kN]	T [kNm]	eff(V,T) [-]	Section complétée eff(M,N,V,T) [-]		
1	!ELU		3196,0	0	7847,0	0,87	1861,0	0	0	0,88			
<b>Paramètres d'analyse "IELU" Norme: SIA</b>													
ID	Diagramme	σ-ε	Déf. limite			Facteurs de résistance				Divers			
c	s		ε <sub>c1d</sub> [%]	ε <sub>c2d</sub> [%]	ε <sub>ud</sub> [%]	σ <sub>s</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	γ <sub>c</sub> [-]	γ <sub>s</sub> [-]		α [-]	φ [-]		
!ELU	4/0	1	-2.	-3.	20.		1.5	1.15		45.	0.		
Sigma-Epsilon : SIA262 Fig 12 + Fig 16													
<b>Contraintes et dilatations extrêmes</b>													
Nom	Classe	y <sub>q</sub> [m]	z <sub>q</sub> [m]	ε [%]	σ <sub>d</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	γ [-]							
C1	C25/30	7.25	0.	-1.9	-16.7	1.50							
C1	C25/30	0.	0.	20.5	0.	1.50							
R1	B500B	7.08	0.2	-1.4	-290.6	1.15							
R1	B500B	0.17	0.2	20.	434.8	1.15							
Étriers (!SIG-ASW)					383.3								
<b>État limite "IELU"</b>													
N [kN]	Efforts intérieurs M <sub>y</sub> [kNm]		M <sub>z</sub> [kNm]	Élongation et courbures ε <sub>x</sub> [%]    χ <sub>y1</sub> [km <sup>-1</sup> ]			χ <sub>z</sub> [km <sup>-1</sup> ]	N/ε <sub>x</sub> [kN]	Rigidités M <sub>y</sub> /χ <sub>y</sub> [kNm <sup>2</sup> ]		M <sub>z</sub> /χ <sub>z</sub> [kNm <sup>2</sup> ]		
3672.5	0.	9019.8	9,3	0,0	3,1	395260.81	28987.32	2910445.42					
<b>Détails des éléments de résistance au cisaillement</b>													
C25/30:B500B    A <sub>k</sub> = 1.3894 [m <sup>2</sup> ]    u <sub>k</sub> = 14.82 [m]    t <sub>ef</sub> = 0.03 [m] Valeurs de la section complète													
No	Nom	V <sub>d</sub> [kN]	b <sub>w</sub> [m]	z [m]	α	eff <sub>c</sub>	a <sub>sp</sub> [mm <sup>2</sup> /m]	eff(V,T) [-]					
1	w1	1861.	0.22	7.25	45.	0.25	670	0.88					
											Nr.:		

C:\Users\FL.DUMONT\OneDrive - BYCN\Bureau\murs sismiques UAD.FG8



C:\Users\FL.DUMONT\OneDrive - BYCN\Bureau\murs sismiques UAD.FG8

Les deux murs sont admissibles pour l'interaction M-N ainsi que pour l'effort tranchant. De plus, leur rigidité se situe aux alentours de 50% de la rigidité à l'état élastique. Les efforts introduits sont tirés d'une modélisation pour laquelle la rigidité des murs a été modifiée afin de simuler cet état de fissuration. Les résultats affichés font suite à un processus itératif de manière à faire concorder les efforts et la rigidité.

## E.6 Fondations

### Sol

Les paramètres du sol de fondation sont :

- cohésion :  $c' = 12 [kN/m^2]$
- angle de frottement interne :  $\phi' = 28^\circ$
- poids volumique :  $\gamma = 20.5 kN/m^3$

La capacité portante du sol est :  $\sigma_{adm} = 272 [kN/m^2]$  (Therzaghi)

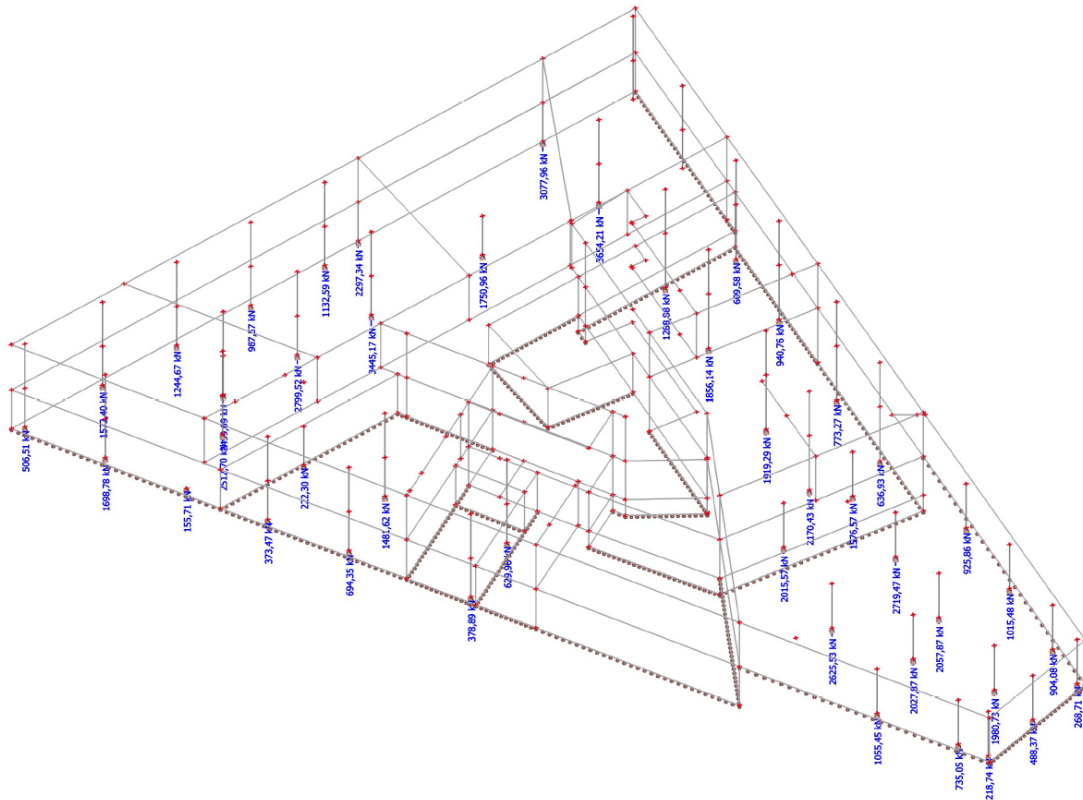


FIGURE 77 – Réactions d'appuis ponctuelles

Les fondations sont séparées en 6 types :

- 500 kN
- 1000 kN
- 1500 kN
- 2000 kN
- 2500 kN
- 3655 kN

Les calculs ont été réalisés avec ancotech

## Feuille de calculation

## ancoPLUS® - Armature anti-poinçonnement

Bureau d'ing.	,	Position	<1>
Responsable	null null	Nbre	1
Projet		Date:	19.06.2023
Partie		Version:	5.0.41

Base de calcul: Suisse, SIA262-2013 (Optimisation selon la dérogation, article 0.4) - (f)

## Valeurs données

Sollicitation de poinçonnement:	Rd	=	500 kN	(ke = 0.90)
Actions dans la zone de contrôle (gd = 12 kN/m <sup>2</sup> ; qd = 272 kN/m <sup>2</sup> ):	ΔVd	=	64 kN	(ΔVd,ua = 262 kN)
Valeur de calcul de l'effort tranchant:	Vd/ke	=	484 kN	(Vd,ua/ke = 264 kN)
Épaisseur de dalle (co = 25 mm; cu = 40 mm):	h	=	360 mm	
Armature sens x (1. nappe):	øx / ex	=	12 / 150 mm	(ρx = 0.24 %)
Armature sens y (2. nappe):	øy / ey	=	12 / 150 mm	(ρy = 0.25 %)
Hauteur statique moyenne:	d	=	308 mm	(dv = 308 mm)
Dimensions du pilier:	ø	=	250 mm	
Distance jusqu'à md=0: (bsx=1125 mm; bsy=1125 mm):	LFx / LFy	=	750 / 750 mm	
Longueur du périmètre de contrôle:	u	=	1753 mm	(ua = 3528 mm)
Moments résistants dans les bandes d'appui:	mRd,x / y	=	100 / 96 kNm/m	
Contrainte de cisaillement du béton (Dmax=32 mm):	τcd	=	1.10 N/mm <sup>2</sup>	(C30/37)

## Résultats intermédiaires du calcul (sans itérations)

Moments moyens dans les bandes d'appui (degré d'app. 2):	msd,x / y	=	63 / 63 kNm/m
Rotations de la dalle:	ψx / ψy	=	3.8 / 4.2 ‰
Coefficient de poinçonnement:	kr	=	1.47
Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	871 kN

## Vérifications à l'état limite ultime (avec itérations)

Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	698 kN	≥	Vd/ke	(ψ = 7.2 ‰)
--	--------	---	--------	---	-------	-------------

Aucune armature de poinçonnement n'est nécessaire  
 Attention, la capacité de déformation de la dalle n'est pas suffisante, ψ = 0.0072 < 0.02  
 Veuillez respecter l'article 4.3.6.1.2 de la norme SIA 262 (2013)

L'exactitude et la plausibilité des résultats ci-dessus doivent être contrôlées



Administration+Produktion  
**ANCOTECH AG**  
 Spezialbewehrungen  
 Industriestrasse 3  
 CH-8157 Dielsdorf  
 info@ancotech.ch

Tel: +41 44 854 72 22  
 Fax: +41 44 854 72 29  
 www.ancotech.ch

Succursale technique  
**ANCOTECH SA**  
 Armatures spéciales  
 z.i. d'In Riaux 30  
 1728 Rossens/FR  
 info@ancotech.ch

Tel: +41 26 919 87 77  
 Fax: +41 26 919 87 79  
 www.ancotech.ch

Feuille de calcul

ancoPLUS® - Armature anti-poinçonnement

Bureau d'ing.	,	Position	<1>
Responsable	null null	Nbre	1
Projet		Date:	19.06.2023
Partie		Version:	5.0.41

Base de calcul: Suisse, SIA262-2013 (Optimisation selon la dérogation, article 0.4) - (f)

Valeurs données

Sollicitation de poinçonnement:	Rd	=	1000 kN	(ke = 0.90)
Actions dans la zone de contrôle (gd = 12 kN/m²; qd = 272 kN/m²):	ΔVd	=	64 kN	(ΔVd,ua = 262 kN)
Valeur de calcul de l'effort tranchant:	Vd/ke	=	<b>1040 kN</b>	(Vd,ua/ke = 820 kN)
Épaisseur de dalle (co = 25 mm; cu = 40 mm):	h	=	360 mm	
Armature sens x (1. nappe):	øx / ex	=	12 / 150 mm	(px = 0.24 %)
Armature sens y (2. nappe):	øy / ey	=	12 / 150 mm	(py = 0.25 %)
Hauteur statique moyenne:	d	=	308 mm	(dv = 308 mm)
Dimensions du pilier:	ø	=	250 mm	
Distance jusqu'à md=0: (bsx=1499 mm; bsy=1499 mm):	LFx / LFy	=	1000 / 1000 mm	
Longueur du périmètre de contrôle:	u	=	1753 mm	(ua = 3528 mm)
Moments résistants dans les bandes d'appui:	mRd,x / y	=	100 / 96 kNm/m	
Contrainte de cisaillement du béton (Dmax=32 mm):	tcd	=	1.10 N/mm²	(C30/37)

Résultats intermédiaires du calcul (sans itérations)

Moments moyens dans les bandes d'appui (degré d'app. 2):	msd,x / y	=	131 / 131 kNm/m
Rotations de la dalle:	ψx / ψy	=	15.1 / 16.7 %
Coefficient de poinçonnement:	kr	=	0.73
Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	432 kN

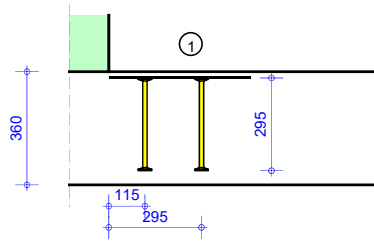
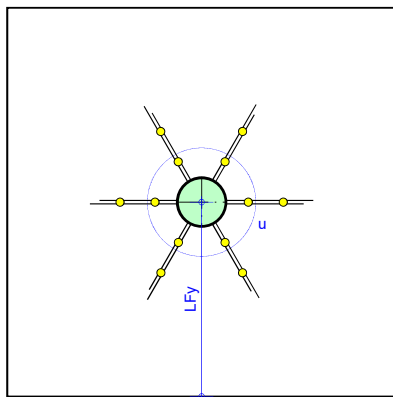
Vérifications à l'état limite ultime (avec itérations)

Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	653 kN	< Vd/ke	(ψ = 8.3 ‰)
Résistance écrasement 1.bielle de béton (avec ancoPLUS; ksys = 3.0):	VRd,c max*	=	1159 kN	> Vd/ke	(ψ = 19.6 ‰)
Résistance dans la zone renforcée (σsd=435 N/mm²):	VRd,c+s*	=	1182 kN	> Vd/ke	(ψ = 20.2 ‰)
Résistance à l'extérieure de la zone renforcée (dv,ua=283 mm):	VRd,c ua*	=	911 kN	> Vd,ua/ke	(ψ = 13.6 ‰)


Armature de poinçonnement choisie: **ancoPLUS 6 x DB2-0295 (1) Statique**

La distance entre le bord du pilier et la première ancre doit être comprise entre 105 mm et 135 mm!

\*) Résistance calculée sans réduction du périmètre de contrôle selon Fig. 22 SIA262:2013 (ke considéré sur l'action)



L'exactitude et la plausibilité des résultats ci-dessus doivent être contrôlées

	Administration+Production		Succursale technique	
	<b>ANCOTECH AG</b>		<b>ANCOTECH SA</b>	
	Spezialbewehrungen		Armatures spéciales	
	Industriestrasse 3	Tel: +41 44 854 72 22	z.i. d'In Riaux 30	Tel: +41 26 919 87 77
CH-8157 Dielsdorf	Fax: +41 44 854 72 29	1728 Rossens/FR	Fax: +41 26 919 87 79	
info@ancotech.ch	www.ancotech.ch	info@ancotech.ch	www.ancotech.ch	



## Feuille de calculation

## ancoPLUS® - Armature anti-poinçonnement

Bureau d'ing.	,	Position	<1>
Responsable	null null	Nbre	1
Projet		Date:	19.06.2023
Partie		Version:	5.0.41

Base de calcul: Suisse, SIA262-2013 (Optimisation selon la dérogation, article 0.4) - (f)

## Valeurs données

Sollicitation de poinçonnement:	Rd	=	1500 kN	(ke = 0.90)
Actions dans la zone de contrôle (gd = 12 kN/m <sup>2</sup> ; qd = 272 kN/m <sup>2</sup> ):	ΔVd	=	62 kN	(ΔVd,ua = 251 kN)
Valeur de calcul de l'effort tranchant:	Vd/ke	=	1598 kN	(Vd,ua/ke = 1387 kN)
Épaisseur de dalle (co = 25 mm; cu = 40 mm):	h	=	360 mm	
Armature sens x (1. nappe):	øx / ex	=	20 / 150 mm	(px = 0.68 ‰)
Armature sens y (2. nappe):	øy / ey	=	20 / 150 mm	(py = 0.72 ‰)
Hauteur statique moyenne:	d	=	300 mm	(dv = 300 mm)
Dimensions du pilier:	ø	=	250 mm	
Distance jusqu'à md=0: (bsx=1875 mm; bsy=1875 mm):	LFx / LFy	=	1250 / 1250 mm	
Longueur du périmètre de contrôle:	u	=	1728 mm	(ua = 4633 mm)
Moments résistants dans les bandes d'appui:	mRd,x / y	=	262 / 243 kNm/m	
Contrainte de cisaillement du béton (Dmax=32 mm):	τcd	=	1.10 N/mm <sup>2</sup>	(C30/37)

## Résultats intermédiaires du calcul (sans itérations)

Moments moyens dans les bandes d'appui (degré d'app. 2):	msd,x / y	=	196 / 196 kNm/m
Rotations de la dalle:	ψx / ψy	=	8.3 / 9.9 ‰
Coefficient de poinçonnement:	kr	=	1.01
Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	578 kN

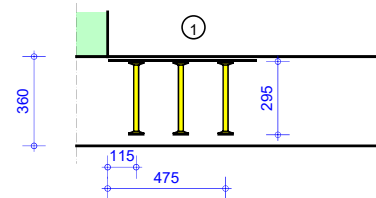
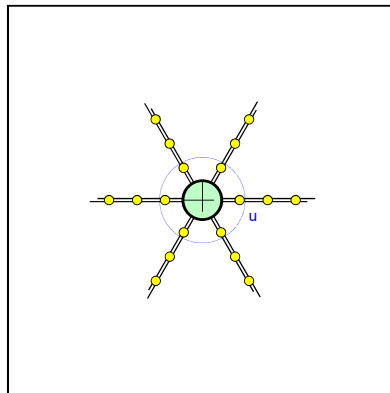
## Vérifications à l'état limite ultime (avec itérations)

Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	861 kN	< Vd/ke	(ψ = 3.9 ‰)
Résistance écrasement 1.bielle de béton (avec ancoPLUS; ksys = 3.0):	VRd,c max*	=	1670 kN	> Vd/ke	(ψ = 10.6 ‰)
Résistance dans la zone renforcée (σsd=435 N/mm <sup>2</sup> ):	VRd,c+s*	=	2093 kN	> Vd/ke	(ψ = 14.9 ‰)
Résistance à l'extérieure de la zone renforcée (dv,ua=275 mm):	VRd,c ua*	=	1497 kN	> Vd,ua/ke	(ψ = 9.0 ‰)

Armature de poinçonnement choisie: ancoPLUS 6 x DG3-0295 (1) Statique

La distance entre le bord du pilier et la première ancre doit être comprise entre 105 mm et 135 mm!

\*) Résistance calculée sans réduction du périmètre de contrôle selon Fig. 22 SIA262:2013 (ke considéré sur l'action)



L'exactitude et la plausibilité des résultats ci-dessus doivent être contrôlées

Administration+Produktion

ANCOTECH AG

Spezialbewehrungen

Industriestrasse 3

CH-8157 Dielsdorf

info@ancotech.ch

Tel: +41 44 854 72 22

Fax: +41 44 854 72 29

www.ancotech.ch

Succursale technique

ANCOTECH SA

Armatures spéciales

z.i. d'In Riaux 30

1728 Rossens/FR

info@ancotech.ch

Tel: +41 26 919 87 77

Fax: +41 26 919 87 79

www.ancotech.ch

**Feuille de calcul**

**ancoPLUS® - Armature anti-poinçonnement**

Bureau d'ing.	,	<b>Position</b>	<1>
Responsable	null null	<b>Nbre</b>	1
Projet		<b>Date:</b>	19.06.2023
Partie		<b>Version:</b>	5.0.41

**Base de calcul: Suisse, SIA262-2013 (Optimisation selon la dérogation, article 0.4) - (f)**

**Valeurs données**

Sollicitation de poinçonnement:	Rd	=	2000 kN	<b>(ke = 0.90)</b>
Actions dans la zone de contrôle (gd = 16 kN/m²; qd = 272 kN/m²):	ΔVd	=	86 kN	(ΔVd,ua = 401 kN)
Valeur de calcul de l'effort tranchant:	<b>Vd/ke</b>	=	<b>2127 kN</b>	(Vd,ua/ke = 1777 kN)
Épaisseur de dalle (co = 25 mm; cu = 40 mm):	h	=	460 mm	
Armature sens x (1. nappe):	øx / ex	=	18 / 150 mm	(px = 0.41 %)
Armature sens y (2. nappe):	øy / ey	=	18 / 150 mm	(py = 0.43 %)
Hauteur statique moyenne:	d	=	402 mm	(dv = 402 mm)
Dimensions du pilier:	ø	=	250 mm	
Distance jusqu'à md=0: (bsx=2062 mm; bsy=2062 mm):	LFx / LFy	=	1375 / 1375 mm	
Longueur du périmètre de contrôle:	u	=	2048 mm	(ua = 4420 mm)
Moments résistants dans les bandes d'appui:	mRd,x / y	=	290 / 276 kNm/m	
Contrainte de cisaillement du béton (Dmax=32 mm):	tcd	=	1.10 N/mm²	(C30/37)

**Résultats intermédiaires du calcul (sans itérations)**

Moments moyens dans les bandes d'appui (degré d'app. 2):	msd,x / y	=	263 / 263 kNm/m
Rotations de la dalle:	ψx / ψy	=	9.2 / 10.3 ‰
Coefficient de poinçonnement:	kr	=	0.83
Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	756 kN

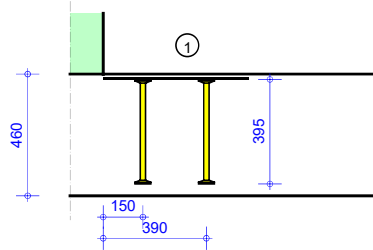
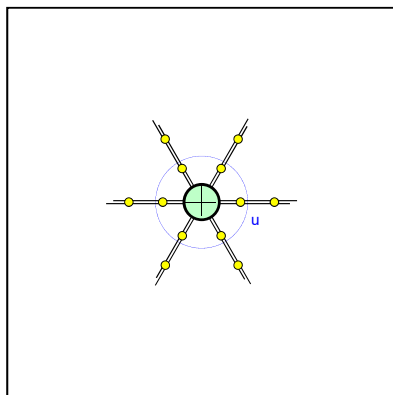
**Vérifications à l'état limite ultime (avec itérations)**

Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	1188 kN	< Vd/ke	(ψ = 4.3 ‰)
Résistance écrasement 1.bielle de béton (avec ancoPLUS; ksys = 3.0):	VRd,c max*	=	2198 kN	> Vd/ke	(ψ = 10.9 ‰)
Résistance dans la zone renforcée (σsd=435 N/mm²):	VRd,c+s*	=	2331 kN	> Vd/ke	(ψ = 11.9 ‰)
Résistance à l'extérieure de la zone renforcée (dv,ua=377 mm):	VRd,c ua*	=	1787 kN	> Vd,ua/ke	(ψ = 8.0 ‰)

**Armature de poinçonnement choisie: ancoPLUS 6 x DG2-0395 (1) Statique**

La distance entre le bord du pilier et la première ancre doit être comprise entre 140 mm et 180 mm!

\*) Résistance calculée sans réduction du périmètre de contrôle selon Fig. 22 SIA262:2013 (ke considéré sur l'action)



**L'exactitude et la plausibilité des résultats ci-dessus doivent être contrôlées**



Administration+Produktion  
**ANCOTECH AG**  
 Spezialbewehrungen  
 Industriestrasse 3  
 CH-8157 Dielsdorf  
 info@ancotech.ch

Tel: +41 44 854 72 22  
 Fax: +41 44 854 72 29  
 www.ancotech.ch

Succursale technique  
**ANCOTECH SA**  
 Armatures spéciales  
 z.i. d'In Riaux 30  
 1728 Rossens/FR  
 info@ancotech.ch

Tel: +41 26 919 87 77  
 Fax: +41 26 919 87 79  
 www.ancotech.ch

## Feuille de calculation

## ancoPLUS® - Armature anti-poinçonnement

Bureau d'ing.	,	Position	<1>
Responsable	null null	Nbre	1
Projet		Date:	19.06.2023
Partie		Version:	5.0.41

Base de calcul: Suisse, SIA262-2013 (Optimisation selon la dérogation, article 0.4) - (f)

## Valeurs données

Sollicitation de poinçonnement:	Rd	=	2500 kN	(ke = 0.90)
Actions dans la zone de contrôle (gd = 17 kN/m <sup>2</sup> ; qd = 272 kN/m <sup>2</sup> ):	ΔVd	=	98 kN	(ΔVd,ua = 482 kN)
Valeur de calcul de l'effort tranchant:	Vd/ke	=	2668 kN	(Vd,ua/ke = 2242 kN)
Épaisseur de dalle (co = 25 mm; cu = 40 mm):	h	=	510 mm	
Armature sens x (1. nappe):	øx / ex	=	20 / 150 mm	(px = 0.46 %)
Armature sens y (2. nappe):	øy / ey	=	20 / 150 mm	(py = 0.48 %)
Hauteur statique moyenne:	d	=	450 mm	(dv = 450 mm)
Dimensions du pilier:	ø	=	250 mm	
Distance jusqu'à md=0: (bsx=2437 mm; bsy=2437 mm):	LFx / LFy	=	1625 / 1625 mm	
Longueur du périmètre de contrôle:	u	=	2199 mm	(ua = 6581 mm)
Moments résistants dans les bandes d'appui:	mRd,x / y	=	398 / 380 kNm/m	
Contrainte de cisaillement du béton (Dmax=32 mm):	τcd	=	1.10 N/mm <sup>2</sup>	(C30/37)

## Résultats intermédiaires du calcul (sans itérations)

Moments moyens dans les bandes d'appui (degré d'app. 2):	msd,x / y	=	327 / 327 kNm/m
Rotations de la dalle:	ψx / ψy	=	8.4 / 9.4 ‰
Coefficient de poinçonnement:	kr	=	0.83
Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	899 kN

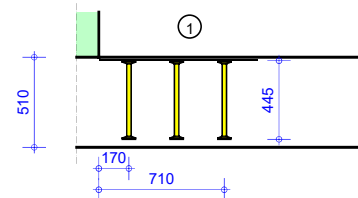
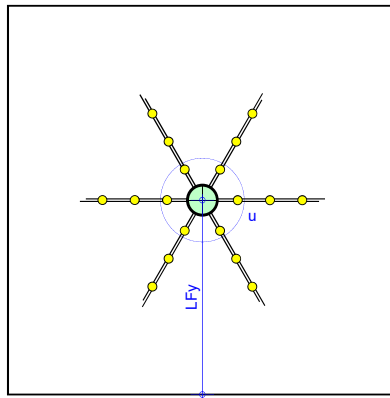
## Vérifications à l'état limite ultime (avec itérations)

Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	1445 kN	< Vd/ke	(ψ = 3.7 ‰)
Résistance écrasement 1.bielle de béton (avec ancoPLUS; ksys = 3.0):	VRd,c max*	=	2683 kN	> Vd/ke	(ψ = 9.5 ‰)
Résistance dans la zone renforcée (σsd=435 N/mm <sup>2</sup> ):	VRd,c+s*	=	3291 kN	> Vd/ke	(ψ = 12.9 ‰)
Résistance à l'extérieure de la zone renforcée (dv,ua=425 mm):	VRd,c ua*	=	2602 kN	> Vd,ua/ke	(ψ = 9.0 ‰)

Armature de poinçonnement choisie: ancoPLUS 6 x DO3-0445 (1) Statique

La distance entre le bord du pilier et la première ancre doit être comprise entre 160 mm et 205 mm!

\*) Résistance calculée sans réduction du périmètre de contrôle selon Fig. 22 SIA262:2013 (ke considéré sur l'action)



L'exactitude et la plausibilité des résultats ci-dessus doivent être contrôlées

Administration+Production

ANCOTECH AG

Spezialbewehrungen

Industriestrasse 3

CH-8157 Dielsdorf

info@ancotech.ch

Tel: +41 44 854 72 22

Fax: +41 44 854 72 29

www.ancotech.ch

Succursale technique

ANCOTECH SA

Armatures spéciales

z.i. d'In Riaux 30

1728 Rossens/FR

info@ancotech.ch

Tel: +41 26 919 87 77

Fax: +41 26 919 87 79

www.ancotech.ch

Feuille de calcul

ancoPLUS® - Armature anti-poinçonnement

Bureau d'ing.	,	Position	<1>
Responsable	null null	Nbre	1
Projet		Date:	19.06.2023
Partie		Version:	5.0.41

Base de calcul: Suisse, SIA262-2013 (Optimisation selon la dérogation, article 0.4) - (f)

Valeurs données

Sollicitation de poinçonnement:	Rd	=	3655 kN	(ke = 0.90)
Actions dans la zone de contrôle (gd = 21 kN/m²; qd = 272 kN/m²):	ΔVd	=	124 kN	(ΔVd,ua = 661 kN)
Valeur de calcul de l'effort tranchant:	Vd/ke	=	3922 kN	(Vd,ua/ke = 3327 kN)
Épaisseur de dalle (co = 25 mm; cu = 40 mm):	h	=	610 mm	
Armature sens x (1. nappe):	øx / ex	=	26 / 150 mm	(px = 0.64 %)
Armature sens y (2. nappe):	øy / ey	=	26 / 150 mm	(py = 0.67 %)
Hauteur statique moyenne:	d	=	544 mm	(dv = 544 mm)
Dimensions du pilier:	ø	=	250 mm	
Distance jusqu'à md=0: (bsx=2812 mm; bsy=2812 mm):	LFx / LFy	=	1875 / 1875 mm	
Longueur du périmètre de contrôle:	u	=	2494 mm	(ua = 5903 mm)
Moments résistants dans les bandes d'appui:	mRd,x / y	=	798 / 758 kNm/m	
Contrainte de cisaillement du béton (Dmax=32 mm):	τcd	=	1.10 N/mm²	(C30/37)

Résultats intermédiaires du calcul (sans itérations)

Moments moyens dans les bandes d'appui (degré d'app. 2):	msd,x / y	=	480 / 480 kNm/m
Rotations de la dalle:	ψx / ψy	=	5.0 / 5.7 ‰
Coefficient de poinçonnement:	kr	=	0.99
Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	1485 kN

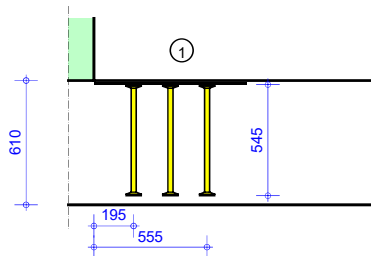
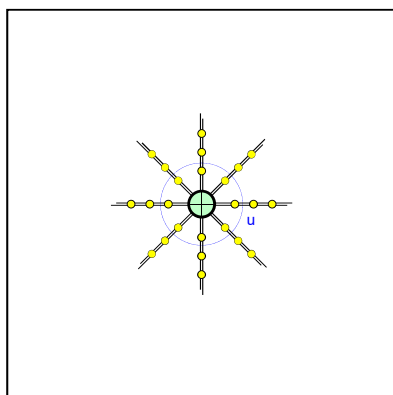
Vérifications à l'état limite ultime (avec itérations)

Résistance au poinçonnement sans système anti-poinçonnement:	VRd,c*	=	2190 kN	< Vd/ke	(ψ = 2.4 ‰)
Résistance écrasement 1.bielle de béton (avec ancoPLUS; ksys = 3.0):	VRd,c max*	=	4202 kN	> Vd/ke	(ψ = 6.3 ‰)
Résistance dans la zone renforcée (σsd=270 N/mm²):	VRd,c+s*	=	4502 kN	> Vd/ke	(ψ = 7.0 ‰)
Résistance à l'extérieure de la zone renforcée (dv,ua=519 mm):	VRd,c ua*	=	3596 kN	> Vd,ua/ke	(ψ = 5.0 ‰)

Armature de poinçonnement choisie: ancoPLUS 8 x DP3-0545 (1) Statique

La distance entre le bord du pilier et la première ancre doit être comprise entre 195 mm et 250 mm!

\*) Résistance calculée sans réduction du périmètre de contrôle selon Fig. 22 SIA262:2013 (ke considéré sur l'action)



L'exactitude et la plausibilité des résultats ci-dessus doivent être contrôlées

	Administration+Produktion	Succursale technique
	ANCOTECH AG	ANCOTECH SA
	Spezialbewehrungen	Armatures spéciales
	Industriestrasse 3 CH-8157 Dielsdorf info@ancotech.ch	z.i. d'In Riaux 30 1728 Rossens/FR info@ancotech.ch

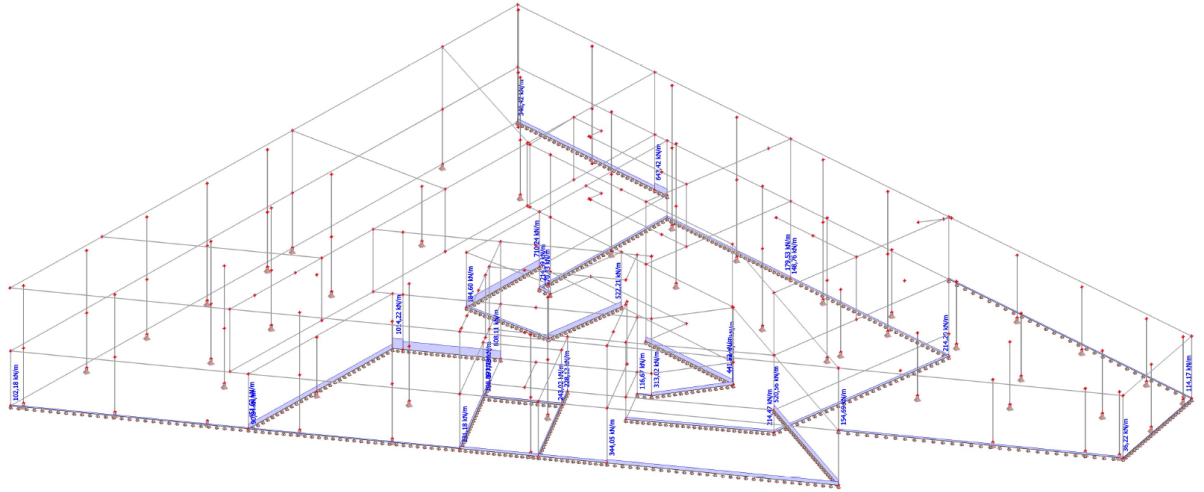


FIGURE 78 – Réactions d'appuis linéaires

Les fondations linéaires sont également calculées à l'aide d'ancotech.

Premièrement, la résistance du radier sans surépaisseur ni armature de cisaillement :

**Feuille de calculation**

**ancoPLUS® - Armature de cisaillement**

Bureau d'ing.		<b>Position</b>	<b>&lt;1&gt;</b>
Responsable	null null	Long. du mur	1.00 m
Projet		Date:	19.06.2023
Partie		Version:	5.0.11

**Base de calcul: Suisse, SIA262-2013 - Cisaillement - (f)**

**Valeurs données**

Sollicitation linéaire:	vd	= 500 kN/m <sup>1</sup>
Réaction du sol:	qd	= 150 kN/m <sup>2</sup>
Epaisseur de dalle (co = 25mm; cu = 25mm):	h	= 360 mm
Hauteur statique moyenne:	d	= 329 mm
Enrobage sup / inf:	co / cu	= 25 / 25 mm
Largeur du mur:	a	= 220 mm
Zone renforcée:	L(VRd,ext)	= 0 mm
Angle d'inclinaison des bielles:	α	= 30°
Moment de flexion / Résistance à la flexion:	md / mRd	= 105.17 / 105.2 kNm/m <sup>1</sup>
Bras de levier des forces internes:	z	= 296.1 mm (z = 0.9*d)

**Valeurs des matériaux**

Bétonqualität C30/37 (mit Dmax =32 mm):	tcd	= 1.10 N/mm <sup>2</sup>
Contrainte de cisaillement du béton	fcd	= 20.00 N/mm <sup>2</sup>
Valeur de dimension. de la contrainte de compres. du béton:	fsd	= 434.80 N/mm <sup>2</sup>
Limite d'élasticité de l'acier d'armature:	øx / ex	= 12/150 mm (px = 0.23 %)
Armature sens x (1. nappe) :	øy / ey	= 12/150 mm (py = 0.24 %)
Armature sens y (2. nappe) :		

**Résultats**

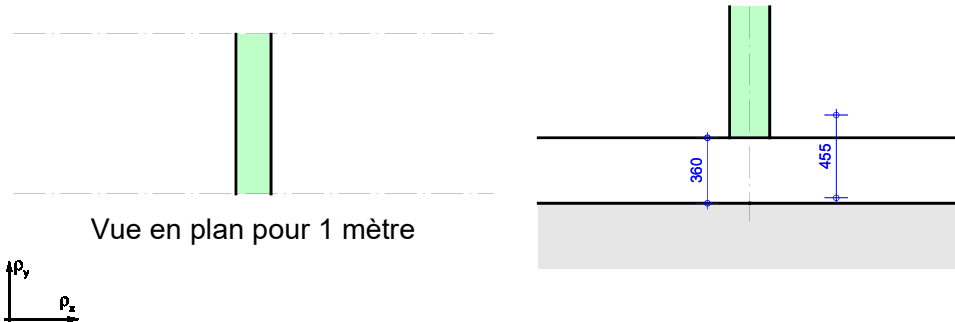
Coefficient de cisaillement sans armature de cisaillement:	kd	= 0.59
Coefficient de résistance des bielles de béton:	kc	= 0.55 (élastique)
Distance nécessaire jusqu'à la dernière ancre:	L1	= 90 mm (théorique)

**Résistances**


Résistance au cisaillement SANS armature de cisaillement:	vRd	= 515 kN/m <sup>1</sup>
Résistance au cisaillement max. AVEC armature de cisaillement:	vRd,c	= 2910 kN/m <sup>1</sup>

<b>Élément de cisaillement choisi:</b>	<b>ancoPLUS: 6.67 pces/m</b>	<b>(1) Statique</b>
	<b>(e = 150 mm)</b>	
	<b>ancoPLUS pour 1.00m</b>	<b>2x7 pièce</b>

La tolérance entre le bord du mur et la première ancre est de +/- 10 mm !



L'exactitude et la plausibilité des résultats ci-dessus doivent être contrôlées

	Administration+Production	Succursale technique
	<b>ANCOTECH AG</b>	<b>ANCOTECH SA</b>
	Spezialbewehrungen	Armatures spéciales
	Industriestrasse 3 CH-8157 Dielsdorf info@ancotech.ch	z.i. d'In Riaux 30 1728 Rossens/FR info@ancotech.ch
	Tel: +41 44 854 72 22	Tel: +41 26 919 87 77
	Fax: +41 44 854 72 29	Fax: +41 26 919 87 79
	www.ancotech.ch	www.ancotech.ch

Deuxièmement, pour un effort normal de 800 [kN/m<sup>2</sup>]

## Feuille de calculation

## ancoPLUS® - Armature de cisaillement

Bureau d'ing.	,	<b>Position</b>	<1>
Responsable	null null	Long. du mur	1.00 m
Projet		Date:	19.06.2023
Partie		Version:	5.0.11

Base de calcul: Suisse, SIA262-2013 - Cisaillement - (f)

## Valeurs données

Sollicitation linéaire:	vd	=	800 kN/m <sup>1</sup>
Réaction du sol:	qd	=	272 kN/m <sup>2</sup>
Epaisseur de dalle (co = 25mm; cu = 25mm):	h	=	610 mm
Hauteur statique moyenne:	d	=	572 mm
Enrobage sup / inf:	co / cu	=	25 / 25 mm
Largeur du mur:	a	=	220 mm
Largeur de la fondation:	L	=	1000 mm
Zone renforcée:	L(VRd,ext)	=	0 mm
Angle d'inclinaison des bielles:	α	=	30°
Moment de flexion / Résistance à la flexion:	md / mRd	=	821.09 / 821.1 kNm/m <sup>1</sup>
Bras de levier des forces internes:	z	=	514.8 mm (z = 0.9*d)

## Valeurs des matériaux

Bétonqualité C30/37 (mit Dmax =32 mm):			
Contrainte de cisaillement du béton	τcd	=	1.10 N/mm <sup>2</sup>
Valeur de dimension. de la contrainte de compres. du béton:	fcd	=	20.00 N/mm <sup>2</sup>
Limite d'élasticité de l'acier d'armature:	fsd	=	434.80 N/mm <sup>2</sup>
Armature sens x (1. nappe) :	øx / ex	=	26/150 mm (px = 0.62 %)
Armature sens y (2. nappe) :	øy / ey	=	26/150 mm (py = 0.65 %)

## Résultats

Coefficient de cisaillement sans armature de cisaillement:	kd	=	0.45
Coefficient de résistance des bielles de béton:	kc	=	0.55 (élastique)
Distance nécessaire jusqu'à la dernière ancre:	L1	=	105 mm (théorique)

## Résistances

Résistance au cisaillement SANS armature de cisaillement:	vRd	=	800 kN/m <sup>1</sup>
Résistance au cisaillement max. AVEC armature de cisaillement:	vRd,c	=	5136 kN/m <sup>1</sup>

Élément de cisaillement choisi:

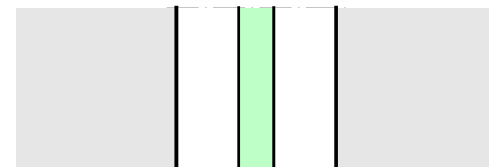
ancoPLUS: 6.67 pcs/m

(1) Statique

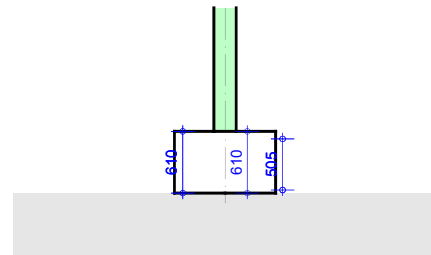
(e = 150 mm)  
2x7 pièce

ancoPLUS pour 1.00m

La tolérance entre le bord du mur et la première ancre est de +/- 10 mm !



Vue en plan pour 1 mètre



L'exactitude et la plausibilité des résultats ci-dessus doivent être contrôlées

Administration+Produktion  
**ANCOTECH AG**  
 Spezialbewehrungen  
 Industriestrasse 3  
 CH-8157 Dielsdorf  
 info@ancotech.ch

Tel: +41 44 854 72 22  
 Fax: +41 44 854 72 29  
 www.ancotech.ch

Succursale technique  
**ANCOTECH SA**  
 Armatures spéciales  
 z.i. d'In Riaux 30  
 1728 Rossens/FR  
 info@ancotech.ch

Tel: +41 26 919 87 77  
 Fax: +41 26 919 87 79  
 www.ancotech.ch

