

École polytechnique de Louvain

Analyses de cycle de vie pour différentes variantes de bâtiments multiétagés en béton

Auteur : **Martin SION**
Promoteurs : **Pierre LATTEUR, Hadrien RATTEZ**
Lecteurs : **André STEPHAN**
Année académique 2022–2023
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Analyses de cycle de vie pour différentes variantes de bâtiments multiétagés en béton

MARTIN SION

Remerciements

Je souhaite en premier lieu remercier mes promoteurs, Monsieur Pierre Latteur et Monsieur Hadrien Rattez, pour m'avoir permis de réaliser ce mémoire. En effet, après mettre rendu compte que mon premier sujet ne m'intéressait pas tant que cela, j'ai pu leur proposer un nouveau sujet qui me tenait plus à cœur. Malgré que ce thème ne soit pas dans leurs domaines d'expertises initiaux, Monsieur Latteur et Monsieur Rattez m'ont soutenu dans ma démarche. Nous avons travaillé ensemble sur l'élaboration d'une étude qui donne des résultats intéressants. Je tiens donc à les remercier pour leur écoute, leurs conseils et leur soutien tout au long de ce travail de fin d'étude, qui me permet de finir mon cursus universitaire.

Je souhaite aussi remercier Monsieur André Stephan pour l'intérêt qu'il accorde à ce travail, la lecture de ce document et sa présence lors de la défense orale. Je le remercie également pour l'accès à la base de donnée, EPiC, qu'il a co-élaborée et qui m'a aidé à fournir des résultats de qualités pour cette étude.

Je voudrais également remercier l'entreprise BuildWise et plus particulièrement Monsieur Benoît Michaux, qui m'ont accueilli durant mon travail sur cette étude et qui ont répondu aux interrogations que je pouvais avoir.

J'aimerais également remercier les membres du pôle GC et particulièrement Madame Nathalie Sergoigne qui ont mis à ma disposition des locaux pour avancer dans ma recherche et qui ont su m'aiguiller dans les questionnements que j'avais.

Pour finir, un grand merci à ma famille et mes amis qui se reconnaîtront. Merci pour leur soutien tout au long de mes études et de ce mémoire, merci, car c'est grâce à eux que j'en suis arrivé ici.

Table des matières

REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	 I
TABLE DES SYMBOLES	 IV
TABLE DES ACRONYMES	 V
1 INTRODUCTION	 1
2 ÉTAT DE L'ART	 3
2.1 ANALYSE DE CYCLE DE VIE.....	 3
2.1.1 ANALYSE DE CYCLE DE VIE DES BÂTIMENTS	 4
2.1.2 OUTIL TOTEM	 6
2.2 ANALYSE DE STRUCTURES EN BÉTON	 7
2.2.1 CHOIX DU MATÉRIAU : BÉTON ARMÉ	 8
2.2.2 PROGRAMMATION PARAMÉTRIQUE – GRASSHOPPER.....	 8
2.2.3 BASE DE DONNÉES EPIC	 9
3 ANALYSE D'UN CAS SPÉCIFIQUE : BÂTIMENT R+3 EN BÉTON DE 2000 M².....	 11
3.1 HYPOTHÈSES DU CAS	 11
3.2 DIMENSIONNEMENT.....	 11
3.2.1 DIMENSIONNEMENT DES PLANCHERS ET DU RADIER.....	 12
3.2.2 DIMENSIONNEMENT DES POUTRES	 19
3.2.3 DIMENSIONNEMENT DES COLONNES	 24
3.2.4 DIMENSIONNEMENT DES VOILES DE CONTREVENTEMENT.....	 31
3.3 ANALYSE DE CYCLE DE VIE DU BÂTIMENT R+3.....	 35
3.3.1 IMPACT DE LA PRODUCTION DE LA STRUCTURE.....	 35
3.3.2 IMPACT DES AUTRES ÉTAPES DU CYCLE DE VIE	 38
3.3.3 COMPARAISON DE L'ACV FAITE AVEC LA BASE DE DONNÉES EPIC VS L'ACV FAITE VIA TOTEM	 43
3.4 CONCLUSION INTERMÉDIAIRE.....	 45
4 OUTIL DE MODÉLISATION PARAMÉTRIQUE	 46
4.1 DÉFINITION DU MODÈLE PARAMÉTRIQUE	 46
4.1.1 HYPOTHÈSES ET LIMITES DU MODÈLE	 47
4.2 ALGORITHME - GRASSHOPPER	 49
4.2.1 PARTIE GÉOMÉTRIE DE LA STRUCTURE - GRASSHOPPER	 50
4.2.2 PARTIE DIMENSIONNEMENT - GRASSHOPPER	 53
4.2.3 PARTIE ANALYSE DE CYCLE DE VIE - GRASSHOPPER.....	 59

5	ANALYSES DE VARIANTES DE STRUCTURE POUR UNE MÊME SPU.....	63
5.1	HYPOTHÈSES DES ANALYSES DE VARIANTES DE STRUCTURE POUR UNE MÊME SPU.....	63
5.2	ANALYSES DES VARIANTES DE STRUCTURE POUR UNE SPU DE 2160 M ²	65
5.2.1	PARAMÈTRE VOLUMÉTRIQUE V_b	68
5.2.2	PARAMÈTRE DE COMPACITÉ C ET C_f	71
5.2.3	RÉCAPITULATIF DES VARIANTES ET DE LEURS PARAMÈTRES	72
5.3	ANALYSES DES VARIANTES DE STRUCTURE POUR UNE SPU DE 3000 M ²	74
5.4	CONCLUSION INTERMÉDIAIRE.....	78
6	DISCUSSION ET CONCLUSION.....	82
7	ANNEXES.....	88
7.1	DIMENSIONNEMENT.....	88
7.1.1	CALCUL DE L'ÉLANCEMENT D'UNE COLONNE	88
7.1.2	CALCUL DE L'EXCENTRICITÉ DU SECOND ORDRE	88
7.1.3	SOLlicitation DUE AU VENT SELON L'EN1991-1-4	90
7.2	ANALYSES DE CYCLES DE VIE.....	95
7.2.1	BASE DE DONNÉES EPIC	95
7.2.2	ÉLÉMENTS TOTEM, BÂTIMENT R+3	99
7.3	ALGORITHME GRASSHOPPER	103
7.3.1	GÉOMÉTRIE FILAIRE	103
7.3.2	DIMENSIONNEMENT	103
7.3.3	ANALYSE DE CYCLE DE VIE.....	103
7.3.4	SÉRIE DE COMBINAISONS POSSIBLES DE STRUCTURE POUR UNE SPU DONNÉE	103
7.4	VARIANTES DE STRUCTURES.....	104
7.4.1	VARIANTES POUR 2160 M ²	104
7.4.2	VARIANTES POUR 3000 M ²	124
8	TABLE DES FIGURES	144
9	TABLE DES TABLEAUX	146
10	BIBLIOGRAPHIE	148

Table des symboles

Notation	Unités	Définition
γ_b	$[N/m^3]$	Poids volumique du béton armé
ρ_s	$[kg/m^3]$	Masse volumique de l'acier
α_{acc}	$[/]$	Coefficient tenant compte des effets à long terme sur la résistance en compression du béton
f_{ck}	$[MPa]$	Résistance caractéristique du béton en compression
f_{cd}^*	$[MPa]$	Résistance de design du béton en compression
γ_c	$[/]$	Coefficient de sécurité relatif au béton
E_b	$[GPa]$	Module d'élasticité du béton
f_{yk}	$[MPa]$	Limite d'élasticité de l'acier
γ_s	$[/]$	Coefficient de sécurité relatif à l'acier
f_{yd}	$[MPa]$	Limite d'élasticité de design de l'acier
E_s	$[GPa]$	Module d'élasticité de l'acier
q	$[kN/m^2]$	Charges variables
q_{ELU}	$[kN/m^2]$	Combinaison de charges pondérées à l'ELU
q_{ELS}	$[kN/m^2]$	Combinaison de charges pondérées à l'ELS
σ_s	$[MPa]$	Contrainte dans les armatures d'acier
A_s	$[cm^2/m \text{ ou } m^2]$	L'aire de la section d'armatures longitudinales
A_{etr}	$[cm^2/m]$	L'aire d'étrier par mètre d'élément
M_{Ed}	$[kNm]$	Moment maximum considéré à l'ELU
N_{Ed}	$[kN]$	Effort normal maximum considéré à l'ELU
V_{Ed}	$[kN]$	Effort tranchant maximum considéré à l'ELU
L_0	$[m]$	Longueur de flambement
f	$[m]$	La flèche d'un élément
μ	$[/]$	Moment réduit
ν	$[/]$	Effort normal réduit
V_b	$[/]$	Paramètre volumétrique, rapport du volume de la structure sur le volume total du bâtiment
C	$[/]$	Paramètre de compacité d'un bâtiment, rapport de l'enveloppe totale du bâtiment sur l'aire de SPU
C_f	$[/]$	Paramètre de compacité des façades d'un bâtiment, rapport de la surface de façade du bâtiment sur l'aire de SPU
f_{GES}	$[kgCO_2e/m^2SPU]$	Facteur d'impact d'émission de GES par m^2 de SPU

Table des acronymes

Acronyme	Signification	Définition
ACV	Analyse de cycle de vie	Méthode d'évaluation multi étapes qui permet d'examiner les impacts environnementaux d'un produit ou service tout au long de son existence.
UF	Unité fonctionnelle	L'unité fonctionnelle est une quantification spécifique d'un produit ou d'un système qui sert de référence pour évaluer ses performances environnementales.
SPU	Surface de plancher utile	Somme de toutes les surfaces d'étages d'un bâtiment.
SF	Surface de façade	Surface de façade ouverte de la structure.
SS	Surface au sol	/
GES	Gaz à effet de serre	Substance gazeuse qui a la caractéristique d'absorber le rayonnement infrarouge produit par la terre. Ils sont exprimés en $[kgCO_2\text{équivalent}]$.
RDC	Rez-de-chaussée	/
R+x	Rez-de-chaussée + x étages	/
ELU	État limite ultime	Limite de performance maximale d'une structure ou d'un élément, au-delà de laquelle il y a un risque de rupture.
ELS	État limite de service	Limite de capacité de fonctionnement normal d'une structure ou d'un élément, au-delà de laquelle l'utilisation du bâtiment pourrait être affectée.
BA	Béton armé	Béton renforcé par des armatures d'acier.
T	Trame	Grille répétitive de colonnes et de poutres de dimensions égales, qui forme la structure principale d'un bâtiment.
NE	Nombre d'étages	/
NV	Nombre de voiles	/
L	Nombre de modules en longueur du bâtiment	/
I	Nombre de modules en largeur du bâtiment	/
CLT	Crossed laminated timber	Bois lamellé collé, matériau de construction dérivé du bois.

1 Introduction

+1,5 °C, c'est la limite de réchauffement climatique qu'il faudrait ne pas dépasser d'ici l'an 2100. Passé cette limite de nombreux effets irréversibles et indésirables se produiront : la destruction d'écosystème (glacier, permafrost), l'élévation du niveau des océans, l'augmentation de la famine, etc. Certains événements ont déjà lieu telles que les fortes sécheresses et inondations qui sont de plus en plus récurrentes. Il y a déjà, des répercussions inévitables dont le temps de réponse est de plusieurs décennies, comme la montée du niveau mondial des mers qui aura pris entre 2 et 3 mètres durant les 2000 prochaines années quelques soient nos efforts. Ce sont les informations transmises dans le rapport de synthèse de GIEC du 6^e cycle d'évaluation¹.

Ces données doivent nous faire réfléchir. Nous sommes à un stade où le changement climatique doit être la préoccupation n°1 de tout citoyen de la planète. Il n'y a en effet pas de plan B, de planète bis. Ce changement est attribué en grande partie aux activités humaines, c'est donc à nous qu'il relève de trouver des solutions ingénieuses et efficaces.

Le domaine de la construction fait entièrement partie de la problématique du réchauffement climatique, car c'est un des secteurs les plus polluants au monde. En effet, rien que le béton serait la source de 7 à 8 % des émissions mondiales de CO_2 .² Et c'est pourtant encore le matériau le plus utilisé actuellement.

De fait, ce matériau apporte une large flexibilité dans la construction. La plupart du temps combiné à des armatures d'acier, il présente des caractéristiques mécaniques qui ne s'égalent pas facilement. C'est pourquoi il continuera d'être utilisé durant les prochaines décennies.

Dès lors, comment faire pour minimiser son impact environnemental ? Des variantes de composition sont étudiées, au niveau du ciment utilisé pour le fabriquer, mais aussi en remplaçant les armatures d'acier par de la fibre de verre, etc. De nombreuses recherches ont lieu à l'heure actuelle sur ces alternatives.

Le besoin d'utiliser le béton, part de la nécessité de construire un habitat, c'est-à-dire un lieu de vie chauffé et protégé des intempéries. Ces constructions ont une caractéristique principale : la surface habitable. Nous quantifions, en effet, la superficie d'un bâtiment en fonction du nombre de personnes qui doivent l'occuper, l'utiliser.

Cette étude a pour objectif d'optimiser la structure en béton armé utilisée pour ériger un bâtiment avec $X \text{ m}^2$ de surface de plancher utile (SPU). Par le terme « optimiser » nous entendons réduire au maximum l'impact sur le changement climatique. Pour évaluer cet impact une méthode d'analyse de cycle de vie (ACV) existe. Elle évalue chaque étape, de la conception à la démolition du bâtiment, et détermine leurs impacts environnementaux. Ces analyses peuvent être faites selon plusieurs indicateurs, émissions de gaz à effet de serre (GES), consommation de l'eau, émissions de particules fines, etc. Dans cette étude, qui a pour but d'évaluer l'impact sur le changement climatique, l'indicateur qui doit être considéré, est l'émission de GES.

Lors de ce travail, nous nous penchons sur l'optimisation des structures en béton de bâtiment multiétagés, de relativement grande envergure (1000 à 4000 m^2 de SPU). Pour articuler cette recherche nous suivons la méthodologie suivante :

¹ (GIEC, 2023)

² (Vandormael, 2019)

Dans un premier temps, une méthode de dimensionnement des structures est définie. Nous dimensionnons un premier bâtiment dit « pilote », afin de choisir un type de structure et de poser les premières hypothèses sur le cas étudié.

Nous effectuons ensuite une première analyse de cycle de vie de ce bâtiment « pilote » dimensionné. Ces premiers résultats nous permettent de définir une référence et un cadre pour les analyses suivantes. Les différentes étapes du cycle de vie du bâtiment sont évaluées pour identifier celles qui sont susceptibles d'avoir un impact différent d'une structure à l'autre. Nous fixons donc les éléments de comparaisons entre les différentes variantes de structure pour une même SPU.

Dans un second temps nous procédons à l'élaboration d'un algorithme de programmation paramétrique. Celui-ci nous permet de dimensionner les structures en fonction de certains paramètres d'entrée. Nous obtenons donc différentes combinaisons possibles de structure pour une même surface.

Après avoir effectué les analyses de cycles de vie sur les différentes combinaisons possible, nous identifions les caractéristiques des structures qui amènent à un impact minimal sur le changement climatique de ces dernières.

Ce travail permet donc de mettre en évidence l'impact sur notre environnement des différents paramètres caractérisant un bâtiment multiétagé et ainsi d'optimiser sa structure de béton armé en réduisant les émissions de GES associées.

2 État de l'art

Dans cette section, nous commencerons par explorer les travaux existants dans le domaine. Premièrement, nous discutons des analyses de cycle de vie des bâtiments à travers une revue de la littérature. À cet égard, le logiciel Totem, qui permet d'effectuer ces analyses, est présenté et ses limitations seront discutées.

Ensuite, nous nous concentrerons spécifiquement sur les structures en béton armé, en décrivant leurs propriétés et leur utilisation. Dans ce contexte, nous introduirons le logiciel Rhino et son plugin Grasshopper, qui sont utilisés pour générer notre algorithme de modélisation paramétrique.

Pour conclure, nous présenterons la base de données EPiC, qui est utilisée pour effectuer les analyses de cycle de vie des structures dans notre étude.

2.1 Analyse de cycle de vie

Définition générale

L'analyse de cycle de vie (ACV) est une méthode d'évaluation multi étapes qui permet d'examiner les impacts environnementaux d'un produit ou service tout au long de son existence. De l'extraction des matières premières, à sa fin de vie en passant par la production, l'utilisation et le traitement des déchets.

Pour effectuer une ACV conforme aux meilleures pratiques internationales, il convient de suivre les normes internationales ISO 14040 (principe et cadre de l'ACV) et ISO 14044 (exigences et lignes directrices) qui constituent un cadre de référence pour sa réalisation. On y retrouve les quatre étapes principales³ :

1. Définition des objectifs et du champ d'application : Identification de l'objet d'étude, des frontières du système et de l'unité fonctionnelle comme référence de comparaison (Voir exemple dans la section 2.1.1).
2. Inventaire du cycle de vie : Collecte des données sur les intrants (les ressources) et les extrants (les émissions) de chaque étape du cycle de vie.
3. Évaluation de l'impact du cycle de vie : Analyse des données collectées pour estimer les impacts environnementaux.
4. Interprétation des résultats : Analyse des résultats pour identifier les domaines d'amélioration et guider la prise de décision.

Les critères d'évaluation de l'impact d'un produit ou service (utilisé dans l'étape 2 de la procédure) peuvent être très divers. Certains reviennent plus souvent :

- Consommation de ressources : eau, énergie fossile, énergie renouvelable
- Émissions de gaz à effet de serre
- Pollution de l'air
- Pollution de l'eau
- Production de déchets

³ (Altermaker, 2015)

- Biodiversité et utilisation des terres
- Acidification des sols et eaux
- Etc

L'ACV est un outil puissant pour les producteurs et consommateurs, car il fournit une vue d'ensemble des impacts environnementaux d'un produit. Ces informations peuvent aider à optimiser l'utilisation des ressources, en identifiant les étapes du cycle de vie les plus énergivores ou impactantes. Cela permet ensuite de se concentrer sur leurs améliorations ou encore d'innover en les comparant à des alternatives.

En somme, les ACV sont les nouveaux arguments de vente de demain. Elles donnent aux entreprises et consommateurs un moyen de comprendre, réduire et communiquer les impacts environnementaux.

2.1.1 Analyse de cycle de vie des bâtiments

Pour l'analyse de cycle de vie des bâtiments nous avons des normes européennes : EN15978 et EN 15804. La norme EN15978 définit la méthodologie pour évaluer les impacts environnementaux tout au long du cycle de vie des bâtiments. Tandis que la norme EN15804, définit celle pour évaluer les produits de construction. Elles établissent des règles pour les déclarations environnementales des produits de construction et identifient les catégories d'impact environnemental à évaluer.

Penchons-nous maintenant sur le cas d'un bâtiment.

Définition des objectifs et du champ d'application

Le but est d'évaluer l'impact environnemental global du bâtiment sur toute sa durée de vie. L'unité fonctionnelle de l'analyse peut être identifiée comme « une surface habitable sur une période de 60 ans ». Ainsi nous pourrions comparer les différentes solutions de structures, matériaux ou géométries du bâtiment, sur base des différents critères d'évaluation.

Inventaire du cycle de vie

Il faut ici définir les différentes étapes du cycle de vie ainsi que les différents intrants et extrants à chacune de ces étapes. Les normes établissent 5 étapes :



Figure 1: Étapes du cycle de vie d'un bâtiment (Tchakorom, 2023)

La première étape comprend les modules A1 à A3, c'est la production⁴ :

⁴ (Inies)

- A1 : Extraction des matières premières et leurs traitements
- A2 : Transport vers le fabricant
- A3 : Production des matériaux de construction

Ensuite vient la construction, les modules A4 et A5 sont repris :

- A4 : Transport vers le chantier
- A5 : Construction du bâtiment

L'utilisation du bâtiment est reprise dans la troisième étape, on y trouve les modules B1 à B7 :

- B1 : Utilisation
- B2 : Maintenance
- B3 : Réparation
- B4 : Remplacement
- B5 : Réhabilitation
- B6 : Utilisation de l'énergie
- B7 : Utilisation de l'eau

Vient la quatrième qui peut être la dernière dans certains cas, la fin de vie avec les modules C1 à C4 :

- C1 : La déconstruction ou démolition
- C2 : Transport vers le centre de traitement des déchets
- C3 : Traitement des déchets
- C4 : Décharge, élimination des déchets

Et enfin la dernière étape, le module D :

- D : Récupération et recyclage des produits pour un nouveau cycle de vie

Évaluation de l'impact du cycle de vie

Ici, un métré général du bâtiment est établi, contenant les quantités de matière qui nous permettront d'évaluer leur impact avec une base de données. Ces bases de données répertorient les matériaux, composants, matières premières de la construction et leurs processus de fabrication pour déterminer ainsi leurs impacts environnementaux sous formes de différents indicateurs (voir les critères d'évaluation ci-dessus 2.1).

Il faut également mesurer les surfaces et volumes du bâtiment pour déterminer l'impact lors de l'utilisation de celui-ci.

Interprétations des résultats

Un regard critique est apporté sur les résultats obtenus, Les pistes d'amélioration pour diminuer l'impact du bâtiment au maximum, sont identifiées. Il faudra jouer sur la géométrie de celui-ci pour diminuer au maximum l'énergie utilisée durant la vie du bâtiment. Il est possible aussi de trouver des alternatives au niveau du choix des matériaux. En vérifiant leur coût environnemental de production/mise en place et leur maintenance durant la vie du bâtiment tout en s'assurant qu'ils aient des caractéristiques qui n'impactent pas son utilisation (Isolation thermique, isolation sonore, résistance au feu, ...).

Pour faire de telles analyses l'utilisation des logiciels est souvent conseillée. Effectivement ces évaluations demandent un nombre conséquent de données à traiter, dès lors le calcul peut vite devenir chaotique.

En Belgique un outil a été mis en place par l'entreprise Buildwise qui est le centre scientifique et technique de la construction. IL s'agit de l'outil Totem.

2.1.2 Outil Totem

Cet outil⁵ a été développé par les 3 régions belges dans le but d'évaluer et d'améliorer les projets de construction du pays en terme d'impact environnemental.

Il permet d'évaluer un projet d'ensemble, un bâtiment unique ou même un élément en particulier. Cependant, il n'évalue pas les composants individuels des éléments. Totem utilise un ensemble de 19 indicateurs environnementaux (voir les critères d'évaluation 2.1), regroupées en 12 catégories, qui évaluent la totalité du cycle de vie d'une structure :

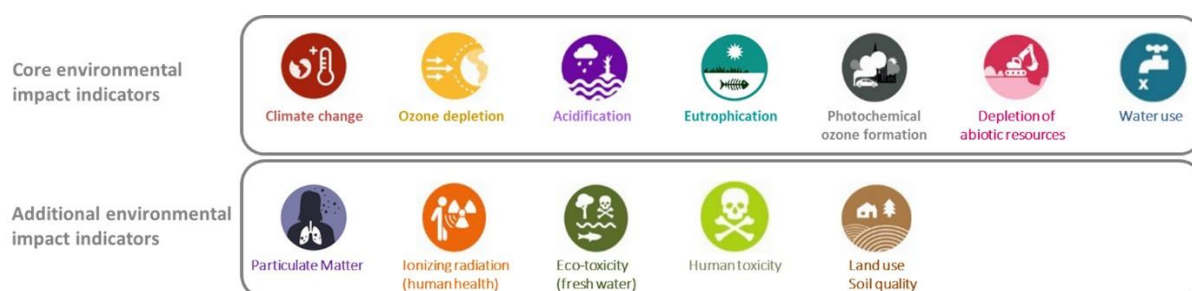


Figure 2 : Catégories d'impact considérées par Totem⁶

Pour faire ses analyses, Totem fait appel à des composants, ceux-ci servent à quantifier l'impact d'un produit en fonction des indicateurs cités ci-dessus. Ces composants sont distingués en deux catégories dans la base de données : les éléments génériques et les éléments spécifiques. Les premiers sont basés sur les données provenant de la base Ecoinvent 3.6⁷, des scénarios adaptés au contexte belge, et des informations générales sur les produits de construction. Les seconds sont fondés sur des Déclarations Environnementales de Produit (EPD), qui ont été validées et inscrites dans la base de données B-EPD de Belgique.

Ces EPD contiennent des informations relatives aux produits, ainsi que des scénarios propres à chaque produit. Totem réalise des calculs sur ces informations pour déterminer les impacts représentatifs, en considérant des modules spécifiques du cycle de vie du produit. Lorsque certains modules ne sont pas renseignés dans l'EPD, Totem estime les impacts des modules manquants selon différentes méthodes.

Pour les ACV réalisées par Totem, il n'y a que certaines étapes du cycle de vie du bâtiment qui sont prises en compte:

1. Production des composants (A1-A3)
2. Mise en œuvre sur site (A4-A5)
3. Utilisation du bâtiment (B2, B4 et B6)
4. Fin de vie du bâtiment (C1-C4)

Pour permettre des comparaisons cohérentes, Totem combine les différents impacts environnementaux en un seul indicateur, exprimé en millipoints (mpts) par unité fonctionnelle. Ce

⁵ (Totem - building, 2023)

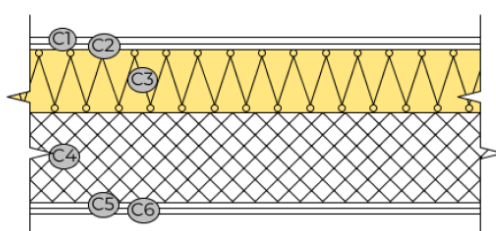
⁶ (Totem - building, 2023) Point 14.02 de la FAQ

⁷ (Ecoinvent, 2019)

score est calculé en sommant les scores individuels de chaque indicateur, qui sont multipliés par un facteur d'agrégation distinct (ex : $1 \text{ kgCO}_2\text{e} = 0,026 \text{ mpts}$).

C'est un outil très puissant mais qui possède ses limites. Il est possible d'ajouter bon nombre de types d'éléments au bâtiment et même de changer certains composants mais il n'est pas possible de modifier les dimensions de ce dernier. Par exemple pour cet élément (voir Figure 3) utilisé plus tard dans ce travail (voir ACV du bâtiment R+3 3.3.2.1) nous avons une épaisseur de béton de 20 cm que nous ne pouvons pas modifier. Il en va de même pour la composition, nous ne savons pas renseigner la quantité d'armature dans le composant en béton.

ME_Coulé sur site_Béton armé_BIB_Neuf_02



Catégorie:	Mur extérieur	Référence:	(21.)+
Score environnemental:	33 mPt/UF	Valeur U:	0.24 W/m²K
Epaisseur:	0.37 m		

Composant(s)				
C1	Mur - finition extérieure Revêtement Carreaux rigides Pierre calcaire (600x300x15 mm) Collé Importé Nouveau Σ ≥ 60 ans ↑ 0.015 m			R 0.0065 m²K/W
C2	Mur - finition extérieure Structure portante Enduit épais Enduit de base renforcée (6 mm) À combiner avec des plaquettes ou des carreaux Nouveau Σ ≥ 60 ans ↑ 0.006 m			N.A.
C3	Mur - finition extérieure Isolation thermique Panneau Laine de roche (140 mm) Collé et fixé avec des chevilles À combiner avec des plaquettes ou des carreaux Nouveau Σ ≥ 60 ans ↑ 0.14 m		λ 0.036 W/mK	R 3.9 m²K/W
C4	Mur extérieur - porteur Partie primaire Coulé sur site Béton armé (200 mm) Nouveau Σ ≥ 60 ans ↑ 0.2 m			R 0.12 m²K/W
C5	Mur - finition intérieure Revêtement Enduit épais Plâtre (12 mm) Nouveau Σ 40 ans ↑ 0.012 m			R 0.023 m²K/W
C6	Mur - finition intérieure Traitement du revêtement Films Peinture acrylique Sur enduit en plâtre Nouveau Σ 10 ans ↑ 0.0001 m			N.A.
Total				U 0.24 W/m²K

Figure 3 : Composant "Mur extérieur" de Totem⁸

2.2 Analyse de structures en béton

Le but de ce travail est d'analyser et de comparer plusieurs variantes de structures en béton armé pour une même surface de plancher et ainsi déterminer la configuration optimale. Comme montré à la section précédente, Totem n'intègre pas suffisamment de paramètres dans ses éléments pour une évaluation complète. Pour pallier à ce problème la conception d'un algorithme paramétrique est considérée. Avant de se plonger pleinement dans la création de cet outil, il est intéressant d'expliquer le choix du matériau utilisé. Une description est donnée par la suite, d'une part pour le logiciel de

⁸ (Totem - Building, 2023) Voir annexe 7.2.2.6

paramétrisation choisi et d'autre part pour la base de donnée utilisée lors des analyses de cycle de vie des différentes variantes de structure.

2.2.1 Choix du matériau : béton armé

Le choix du matériau s'est porté sur le béton armé car c'est un des matériaux de construction les plus couramment utilisés et ce pour diverses raisons.

- Tout d'abord, sa durabilité. Il s'agit d'un matériau extrêmement résistant qui peut supporter des conditions environnementales difficiles, y compris les intempéries, la corrosion, le feu, ... ce qui lui permet d'assurer la longévité des structures.
- Ensuite, il offre une résistance exceptionnelle. Sa forte capacité à résister à la compression, couplée à la résistance à la traction fournie par l'acier, lui permet de supporter des charges significatives, ce qui est un critère essentiel dans la construction de bâtiment multiétagé.
- En termes de coût, le béton armé est souvent une option économique attractive. Les coûts de matériaux initiaux peuvent être inférieurs à ceux de nombreuses alternatives, et sa durabilité signifie que les coûts d'entretien à long terme sont généralement plus faibles.
- Même si le cas étudié dans ce travail présente une structure simple, le béton offre une flexibilité de conception remarquable. Il peut être moulé dans presque n'importe quelle forme, ce qui le rend idéal pour des conceptions structurelles complexes ou novatrices.

Bref sa popularité le précède, mais du point de vue environnemental, le béton armé est une matière d'intérêt particulier. Sa production nécessite une grande quantité de ressources et génère des émissions de CO_2 considérables. Par conséquent, l'analyse de cycle de vie sur les structures en béton armé pourrait donc contribuer à trouver des pistes d'améliorations telles que des configurations optimales.

2.2.2 Programmation paramétrique – Grasshopper

L'outil de programmation paramétrique est utile pour comparer différentes configurations de structures. L'objectif est de définir plusieurs paramètres du bâtiment et de pouvoir les faire varier afin d'obtenir différentes géométries de structure. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser Grasshopper, un plugin du logiciel de modélisation 3D, Rhino 3D.

Grasshopper permet de manipuler et de faire varier le modèle 3D de la structure en fonction des paramètres prédéfinis. Les calculs de dimensionnement sont introduits dans l'algorithme, ce qui permet d'obtenir des métrés précis en combinant les dimensions des éléments avec la géométrie 3D du modèle. Cela facilite grandement l'analyse comparative des différentes configurations de structure.

De plus, Grasshopper permet d'intégrer pas mal d'extensions pour pousser la programmation. EPiC est l'une de ces extensions, c'est une base de données qui permet d'effectuer des analyses de cycle de vie dans le milieu de la construction. En intégrant EPiC à notre outil, nous pourrions directement obtenir des résultats liés aux performances environnementales des différentes structures que nous étudions.

En résumé, l'utilisation de Grasshopper dans Rhino 3D nous permettra de créer un outil puissant pour comparer et analyser différentes configurations de structures. L'intégration d'EPiC dans Grasshopper

nous offrira également la possibilité d'évaluer l'impact environnemental de ces structures. Dans la section suivante, nous explorerons plus en détail les fonctionnalités et avantages de la base de données EPiC.

2.2.3 Base de données EPiC

EPiC est une base de données quantifiant les flux environnementaux des matériaux de construction. C'est une base de données australienne qui a été développée par l'université de Melbourne plus précisément par Mr. Crawford R. professeur à l'université de Melbourne, Mr. Stephan A. professeur à l'UCLouvain, Mr. Prideaux F. doctorant à l'université de Melbourne et la KULeuven et Mr. Bontinck P.-H. spécialiste en ACV. L'acronyme EPiC signifie *Environmental Performance in Construction*.

Cette base de données EPiC⁹ a l'avantage d'être « open source » et d'être complètement transparente. Toutes les méthodes et les données utilisées pour produire les coefficients de flux environnementaux sont librement accessibles via des plateformes en accès ouvert. Cela nous permet d'examiner en détail les métadonnées, les méthodes utilisées et les sources de données, ce qui améliore la confiance dans l'utilisation des coefficients.

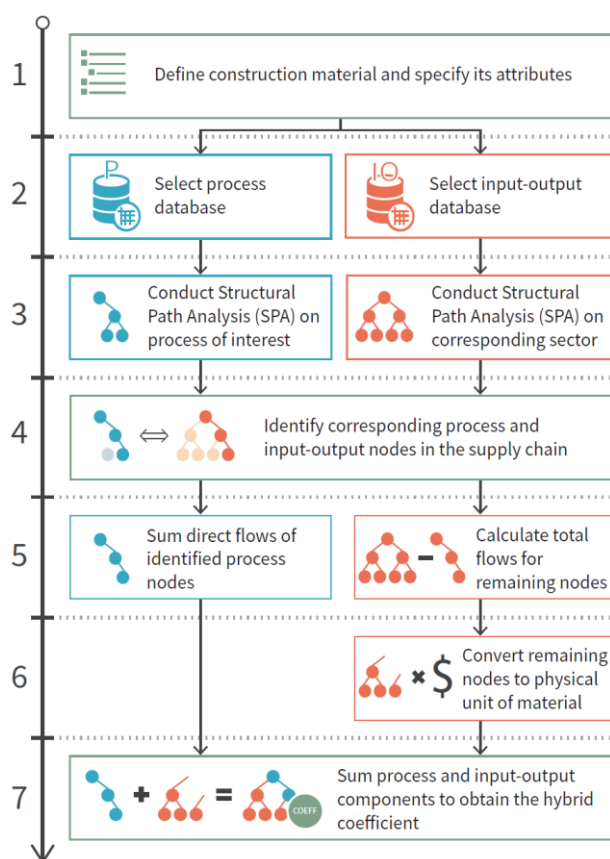


Figure 4 : Résumé de la méthode hybride pour le calcul des coefficients EPiC (source : 9)

Epic est une base de données dite *cradle-to-gate* c'est-à-dire qu'elle couvre l'ensemble du cycle de vie des matériaux de construction, de la production des matières premières jusqu'à la fabrication des produits finis (A1-A3). Elle utilise une approche hybride pour calculer les coefficients des indicateurs environnementaux des matériaux. Cette approche combine des données de processus spécifiques à

⁹ (Crawford, R.H., Stephan, A. and Prideaux, F., 2019)

chaque étape du cycle de vie des matériaux avec des données d'entrée-sortie étendues sur le plan environnemental (basées sur des modèles économiques qui décrivent les relations entre les secteurs économiques et les flux de matériaux et d'énergies).

En utilisant des données de processus détaillées, lorsque disponibles, et en comblant les lacunes avec des données d'entrée-sortie étendues, EPiC assure une couverture complète de la chaîne d'approvisionnement des matériaux, ce qui permet une meilleure précision dans la quantification des flux environnementaux. Cela permet une comparaison précise entre les différents matériaux, facilitant ainsi les prises de décision éclairées en matière de sélection des matériaux.

EPiC évalue les différents matériaux selon 3 indicateurs différents : l'énergie consommée en *MJ*, l'eau consommée en *l* et les émissions de gaz à effet de serre (GES) en *kgCO₂e*. Dans ce travail nous choisissons de nous pencher sur l'indicateur correspondant au changement climatique, les émissions de GES.

Le *kgCO₂équivalent* est une unité qui permet de rassembler tous les GES en un seul et même indicateur. Il est déduit en multipliant la masse d'un GES (pour une unité fonctionnelle du matériaux) par un facteur de caractérisation de ce GES. Ce facteur permet de caractériser l'importance relative du GES en question, par rapport à la contribution générale de l'indicateur de changement climatique. (Exemple : 0,5 kg de CH₄ émis pour 1 m³ de béton C30/37, avec un facteur de caractérisation de 25 pour le méthane on obtient : 12,5 *kgCO₂e*)

Pourquoi utiliser une base de données australienne alors que nous voulons évaluer les impacts environnementaux de bâtiment en Belgique ?

Pour finir, une explication du choix de la provenance de la base de donnée est nécessaire. Effectivement, elle contient des données pour des produits australiens mais les structures évaluées sont situées en Belgique. Ceci s'explique pour différentes raisons.

Tout d'abord, l'intégration directe d'EPiC à Grasshopper représente un avantage majeur car cela nous permettra de développer un outil plus abouti. L'utilisation conjointe de Grasshopper et d'EPiC nous offre une plateforme complète pour effectuer des analyses précises et comparables des différents paramètres environnementaux.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, EPiC est une base de données complète. Cette exhaustivité nous permet d'obtenir des analyses précises en prenant en compte l'ensemble des flux environnementaux associés, nous pouvons ainsi obtenir des résultats fiables et comparables.

Enfin, en ce qui concerne les procédés de fabrication du béton et de l'acier en Australie et en Belgique, ils sont globalement similaires. Les principales différences se situent dans les impacts des transports entre les différentes étapes de production. Cependant, puisque notre objectif principal est de comparer les différentes structures entre elles, les différences d'impacts entre ces structures devraient rester relativement similaires, qu'elles soient évaluées en Belgique ou en Australie.

Nous serons donc en mesure de réaliser des comparaisons significatives entre les différentes structures que nous étudions.

3 Analyse d'un cas spécifique : bâtiment R+3 en béton de 2000 m²

Pour avoir une première expérience dans les analyses de cycle de vie d'un bâtiment, un cas spécifique de bâtiment est déterminé. Grâce à ce bâtiment, dit « pilote », les premières hypothèses sont fixées autour d'un modèle précis. Le but est de définir une méthodologie de dimensionnement ainsi qu'une méthodologie pour la réalisation de l'ACV. Une fois établies, ces méthodes sont intégrées dans l'algorithme qui permet de faire varier les paramètres de la structure pour déterminer une configuration optimale.

3.1 Hypothèses du cas

Le bâtiment étudié est composé de 2000 m² de bureaux répartis sur 3 étages plus le rez-de-chaussée (= R+3).

Pour la structure, elle est en béton armé. Celle-ci est composée de « modules » carrés ayant une trame de 6 m (voir Figure 5a & 5b). Un module désignant un ensemble de 4 colonnes, 2 poutres et une dalle.

Il s'agit d'une première approche pour ce type d'étude, le module carré est donc un choix adéquat afin de limiter, dans un premier temps, le nombre de paramètres à considérer et à faire varier. Une fois ces modules complètement maîtrisés il serait intéressant de s'intéresser à d'autres modules.

5 modules sont répartis dans la longueur du bâtiment pour 3 dans sa largeur (voir Figure 5a). Soit un total 15 modules, chaque module fait 36 m² et un étage a donc 540 m² de surface. En considérant les escaliers, ascenseurs et autres sanitaires ceci correspond plus ou moins à 500 m² de bureaux par étage. Le bâtiment est aussi composé de 4 voiles de contreventements. Un radier minimum est considéré mais le calcul des fondations n'est pas pris en compte dans ce travail. En effet, les éléments de fondations sont trop dépendant du type de sol sur lequel le bâtiment se situe.

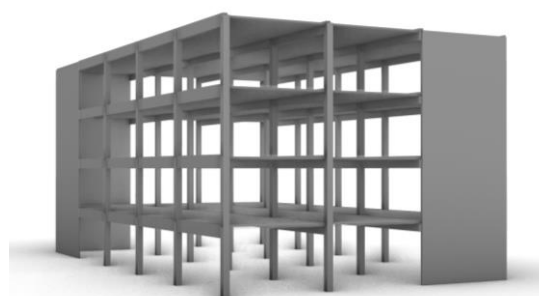
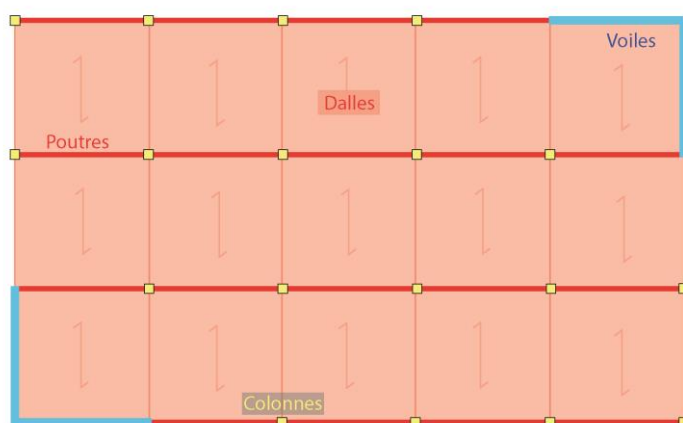


Figure 5a : Vue en plan schématique & Figure 5b : Modèle 3D du bâtiment

3.2 Dimensionnement

Dans cette section la méthode de dimensionnement est abordée pour chaque élément structurel du bâtiment. Chaque sous-section est constituée de :

- Des hypothèses prises en compte pour le dimensionnement de l'élément
- Des différents calculs considérés pour les éléments
- D'un récapitulatif reprenant les caractéristiques majeures des éléments

Dans le cadre de ce dimensionnement, deux matériaux ont été considérés : le béton et l'acier. Voici dans les tableaux 1 et 2, les principales caractéristiques de ceux-ci qui seront utilisées tout au long du dimensionnement.

Caractéristiques :	C30/37	
γ_b	25000	[N/m ³]
f_{ck}	30	[MPa]
α_{acc}	0,85	[/]
γ_c	1,5	[/]
f_{cd}^*	17	[MPa]
E_b	10	[GPa]

Tableau 1 : Classe de béton utilisée et ses caractéristiques

Caractéristiques :	BE500 S	
f_{yk}	500	[MPa]
γ_s	1,15	[/]
f_{yd}	435	[MPa]
E_s	210	[GPa]
ρ_s	7850	[kg/m ³]

Tableau 2 : Acier utilisé et ses caractéristiques

La classe de béton considérée pour chaque élément est du C30/37. En pratique, cette classe de béton est la plus utilisée, elle est donc appliquée à tous les éléments dans ce travail.

Les calculs de dimensionnement se réfèrent au cours de Mr. Cap « *LGCIV1032 Structure en béton armé* » et à la partie *structure* du cours « *LGCIV2011 Projet de bâtiment* » donnée par Mr. Latteur. Ces deux cours sont basés sur les Eurocodes qui sont l'ensemble de normes européennes qui établissent les règles et les critères techniques pour la conception des structures de construction en Europe.

3.2.1 Dimensionnement des planchers et du radier

3.2.1.1 Hypothèses

Les premiers éléments considérés dans le dimensionnement de cette structure sont les planchers. Il est nécessaire de commencer par là car leur poids propre est considéré dans les calculs de dimensionnement des autres éléments.

Pour ces éléments des dalles coulées en place sont choisies. La trame étant de 6 m des hourdis seraient plus économiques en terme de quantité de matière. Cependant cette option nécessite d'imposer des contraintes en plus au modèle. Effectivement il faudrait limiter les dimensions des modules à des valeurs spécifiques vu que les hourdis ont des largeurs standardisées (de 1,2 m en général). Le but étant de faire varier la dimension des modules dans l'algorithme paramétrique, le choix des dalles coulées en place reste donc plus aisé à mettre en pratique pour nous.

Chaque dalle de chaque module est considérée comme isostatique et repose simplement sur les deux poutres. Encore une fois, ce choix étant fait pour avoir un dimensionnement plus facile lorsqu'on augmente les dimensions du bâtiment. Si les dalles étaient considérées comme hyperstatiques les cas de charges et le nombre d'appuis varieraient à mesure que le nombre de modules et leurs dimensions varient.

Il y aura des armatures longitudinales en fibre inférieure pour reprendre le moment en travée ainsi que des armatures transversales technologiques pour la répartition des efforts. Aussi un treillis en fibre supérieure est considéré afin de pouvoir contrôler la fissuration.

Les charges appliquées sont les suivantes :

- Charges variables : Charge d'exploitation correspondant à l'utilisation de bureaux
 - o $q = 3kN/m^2$
- Charges permanentes : Elles correspondent à une chappe de finition, au revêtement, au mobilier, ou à tout autre installation.
 - o $g = 1,5kN/m^2$

Ces valeurs sont tirées du cours de *LGCIV2011 Projet de bâtiment*¹⁰ qui se réfère lui-même à l'Eurocode 1 partie 1.

Dans le dimensionnement qui suit, la dalle est considérée comme une poutre de 1 mètre de largeur. Il suffira de multiplier les quantité d'acier par la largeur réelle de cette dernière. En ce qui concerne la hauteur de dalle, elle est considérée, au début du calcul, à 14 cm. Effectivement, dans la pratique ces dalles coulées en place ne sont jamais plus petites que cela.

Enfin, le radier est défini à la fin de la section. Dans la suite de ce travail le radier sera inclus dans le métré des planchers en général.

3.2.1.2 Méthodologie

3.2.1.2.1 Dimensionnement à la flexion simple - ELU

Tout d'abord il faut déterminer la hauteur de la dalle. Pour cela un calcul à l'État limite ultime (= ELU) est effectué.

Le moment maximum repris par la dalle est déterminé. Comme celle-ci est considérée comme isostatique le moments est calculé comme suit :

$$M_{Ed} = \frac{qL^2}{8}$$

¹⁰ (P. Latteur, T. Vandenberg, D. Zastavni, 2019)

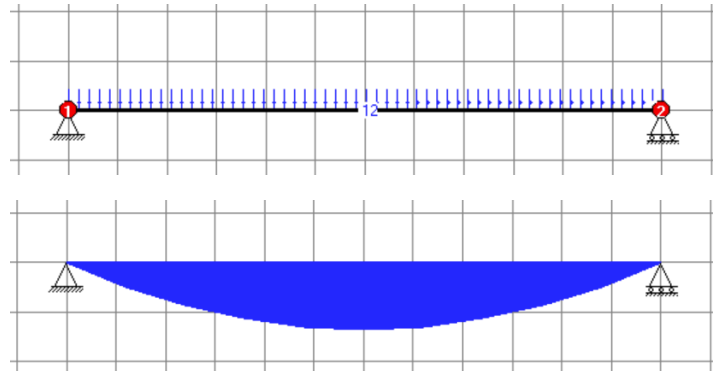


Figure 6 : Schéma statique et allure du moment repris par la dalle

À l'ELU nous appliquons le coefficients de sécurité aux charges : 1,5 pour les charges variables Q et 1,35 pour les charges permanentes G .

Vous retrouverez dans le tableau 3, un récapitulatif des différentes charges ci-dessous :

Noms des charges	Coefficient	Charge [kN/m]
<i>Charges permanentes G</i>		
Finitions + installations	1,35	1,5
Poids propre	1,35	3,75
<i>Charges variables Q</i>		
Charges d'exploitation	1,5	3
Cas de charge à l'ELU	q_{ELU}	11,59

Tableau 3 : Récapitulatif du cas de charge à l'ELU pour les dalles

Pour le poids propre une hauteur initiale de 0,14 m de dalle a été considérée ainsi que le poids volumique du BA, $\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3$.

Le moment maximum à l'ELU est trouvé : $M_{Ed} = 52,14 \text{ kNm}$

Ensuite pour déterminer la hauteur de dalle nécessaire, nous fixons l'état de déformation à la rupture.

La valeur du moment réduit résistant $\mu_{Rd,dim}$ correspondant à l'état de déformation choisit, est fixée à $\mu_{Rd,dim} = 0,296$. Ce qui correspond à une rupture ni trop fragile (pas assez de béton, augmentation de la section d'armatures) ni trop ductile (trop de béton et peu d'armatures). Cet état de déformation est l'optimum pour obtenir le bon compromis entre quantité de béton et d'acier. Il correspond également à une compatibilité des déformation $\xi = x/d = 0,45$. Avec d la distance de l'armature à la fibre supérieure, x la distance entre l'axe neutre et la fibre la plus comprimée et ξ la valeur adimensionnelle. Vous retrouverez ces variables à la Figure 7.

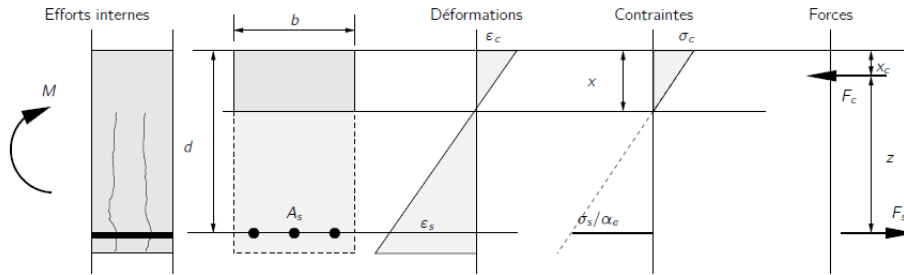


Figure 7 : Contraintes et déformations dans une section rectangulaire fléchie¹¹

Une fois cet état de déformation définit la hauteur de la dalle adéquate peut être trouvée avec la relation suivante,

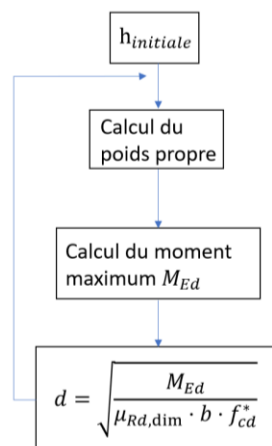
$$\mu_{Rd,dim} = \frac{M_{Rd}}{b \times d^2 \times f_{cd}^*} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{M_{Ed}}{\mu_{Rd,dim} \cdot b \cdot f_{cd}^*}}$$

Avec :

- b la largeur de la dalle, ici considéré égale à 1m.
- f_{cd}^* la résistance à la compression du béton pour le dimensionnement : $f_{cd}^* = 17 \text{ MPa}$.
- M_{Rd} le moment résistant de la section. Ici on veut que celle-ci résiste à M_{Ed} .

Une première valeur de d est déterminé. Cette valeur correspond à la hauteur de la section diminuée de l'enrobage des armatures les plus éloignées de l'axe neutre. Ici cet enrobage est de 4 cm par rapport au dessous de la dalle.

Des itérations sont effectuées en réinjectant la hauteur $h = d + 0,04$ dans le calcul du poids propre pour trouver le moment maximum jusqu'à ce que la section résiste.



La hauteur obtenue est : $h = 0,15 \text{ m}$.

¹¹ (Cap)

3.2.1.2.2 Vérification de la flèche - ELS

Une vérification est faite à l'état limite de service (=ELS) si les dimensions de la dalle sont correct. Pour cela nous définissons une flèche maximum correspondant à $L/250$ avec L la longueur de portée des dalles ou encore de la trame.

À l'ELS nous pondérons les charges permanentes et variable avec un coefficient de 1.

Noms des charges	Coefficient	Charge [kN/m]
<i>Charges permanentes G</i>		
Finitions + installations	1	1,5
Poids propre	1	4
<i>Charges variables Q</i>		
Charges d'exploitation	1	3
Cas de charge à l'ELS	q_{ELS}	8,25

Tableau 4 : Récapitulatif du cas de charge à l'ELS pour les dalles

Pour une « poutre » isostatique à deux appuis la flèche se détermine comme suit :

$$f = \frac{5 \cdot q_{ELS} \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Avec :

- L la longueur de la dalle 6 m
- E le module d'élasticité du béton, il est limité à 10.000 MPa pour les flèches totales à long terme prenant compte du fluage
- I l'inertie de la section $I = \frac{bh^3}{12}$ exprimé en m^4 avec b largeur de la dalle et h sa hauteur.

La flèche est obtenue : $f = 0,042 \text{ m} > f_{max} = 0,024 \text{ m}$. Un calcul itératif est effectué en augmentant de 0,01 m la hauteur de dalle jusqu'à ce que la flèche maximale soit respectée.

Finalement la hauteur est de : $h = 0,19 \text{ m}$. Ce qui est une nette augmentation comparé à la valeur trouvée lors du calcul à l'ELU.

3.2.1.2.3 Calcul des armatures

Pour le calcul de la section des armatures la méthode des « stress block » expliquée au cours *LGCIV1032 structure en béton armé*¹² est utilisée.

Cette méthode consiste à déterminer la hauteur de béton comprimé pour trouver la contrainte de compression à la rupture et en déduire la contrainte nécessaire en traction pour équilibrer les forces.

¹² (Cap)

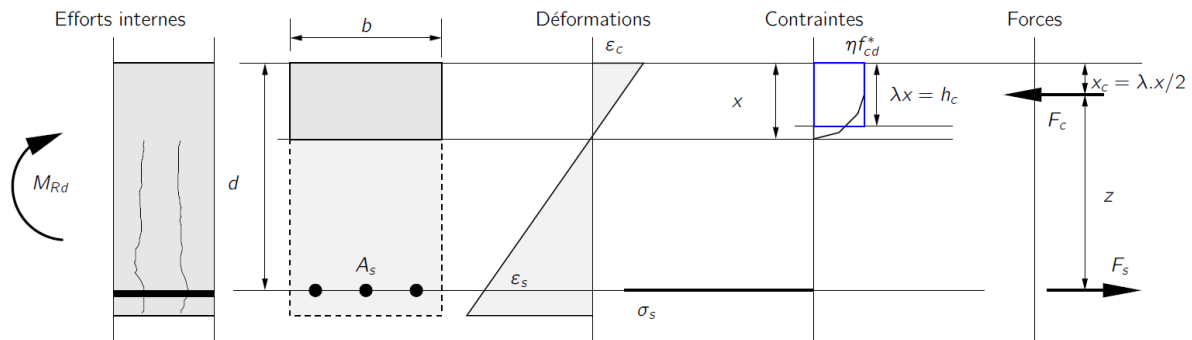
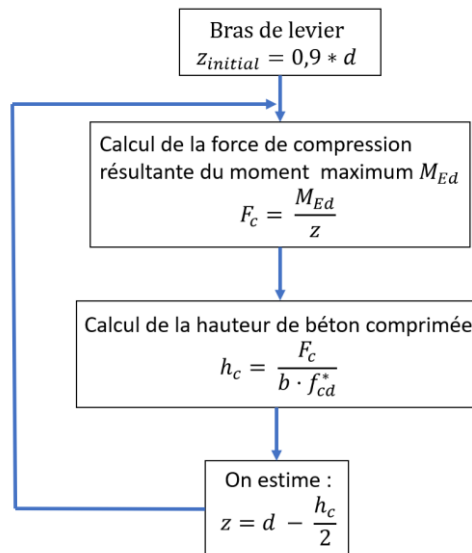


Figure 8 : Forces résultantes de traction et compression dans une section rectangulaire fléchie¹³

Avec les paramètres $\lambda = 0,8$ et $\eta = 1$ pour des classes de béton inférieur à C50 représentés sur la Figure 8.

Cette méthode est un calcul itératif qui suit :



Avec :

- Z le bras de levier de la force résultante du moment M_{Ed}
- F_c La force de compression
- h_c la hauteur de béton comprimé nécessaire pour équilibrer les efforts de tractions dans les armatures

En étant précis au dixième de cm près 4 itérations suffisent. Avec le z final nous calculons à nouveau la force F_c . Nous considérons par la somme des forces $F_c = F_s$.

Les armatures sont considérées comme plastifiées à la rupture. On peut dire alors que :

$$\sigma_s = f_{yd} \text{ et donc } A_s = \frac{F_s}{f_{yd}}$$

Avec σ_s la contrainte dans les armatures, f_{yd} la résistance des armatures pour le dimensionnement et A_s l'aire totale d'armatures longitudinales.

¹³ (Cap)

L'aire d'armature longitudinale équivaut finalement à : $A_s = 9,92 \text{ cm}^2$. Ce qui correspond à des armatures $\phi 12$ tous les 10 cm. L'aire d'acier réelle dans les dalle est donc de $A_s = 11,3 \text{ cm}^2$ par m^2 de dalle.

À ça est rajouté 20% de l'aire d'armatures longitudinales comme armatures technologiques qui sont posées transversalement et qui servent à la transmission homogène des charges. On obtient $A_{s,tot} = 13,56 \text{ cm}^2$.

Dans les dalles il n'y a pas d'étriers pour l'effort tranchant quand des armatures transversales sont prévues¹⁴.

Par contre un treillis 5x150x150 est disposé pour le contrôle de la fissuration de la dalle en partie supérieure. Ce qui nous donne une aire totale d'acier par mètre de dalle de 1 m de large de,

$$A_{s,totale} = 15,82 \text{ cm}^2/\text{m}^2$$

3.2.1.2.4 Radier

Comme dit précédemment les fondations ne sont pas prises en compte dans ce travail. Pour un tel bâtiment situé en Wallonie il faudrait sûrement travailler avec des pieux, ceci dépendant du type de sol sur lequel on installe le bâtiment. Néanmoins il est important de considérer des dimensions minimales pour un radier. Nous pourrions ainsi faire une ACV plus précise et prendre en compte l'impact de la surface au sol dans nos futures comparaisons. Ainsi comme hauteur minimum de radier nous considérons 0,15 m, Les armatures minimum seraient deux treillis (inférieur et supérieur) de 6 x 150 x 150 ce qui représente une aire d'acier au m^2 de $A_{s,radier} = 7,55 \text{ cm}^2/\text{m}^2$.

3.2.1.2.5 Récapitulatif

Caractéristiques des dalles		
Matériaux	Béton	C30/37
	Acier	BE 500 S
Charges	Permanente	6,25 [kN/m ²]
	Variable	3 [kN/m ²]
Dimensions	h_d	0,19 [m]
Aire de section totale d'acier	$A_{s,tot}$	15,82 [cm ² /m]
Flèche	f	0,027 [m]
Schéma statique	Isostatique	
Efforts internes maximum	M_{Ed}	58 [kNm]
	N_{Ed}	/
	V_{Ed}	39 [kN]

Tableau 5 : Récapitulatif des caractéristiques des dalles

¹⁴ (Cap) Slide 443 de AUCE 2031 Séance All1x2

Caractéristiques du radier			
Matériaux	Béton	C30/37	
	Acier	BE 500 S	
Hauteur	h_r	0,15	[m]
Aire de section totale d'acier	$A_{s,tot}$	7,55	[cm ² /m ²]

Tableau 6 : Récapitulatif des caractéristiques du radier

3.2.2 Dimensionnement des poutres

Les poutres sont ensuite le deuxième type d'élément à être dimensionné par suite logique des choses.

3.2.2.1 Hypothèses

Les poutres sont considérées aussi coulées en place de sorte que sur chantier elles soient mises en place en même temps que les dalles.

Elles sont isostatiques pour les mêmes raisons que les dalles. Il n'y a donc que des armatures longitudinales en fibre inférieure et des étriers pour les efforts tranchants.

Au niveau des charges, les mêmes que pour les dalles sont considérées et il faut fatalement rajouter le poids des dalles qui reposent sur les poutres ainsi que leur poids propre.

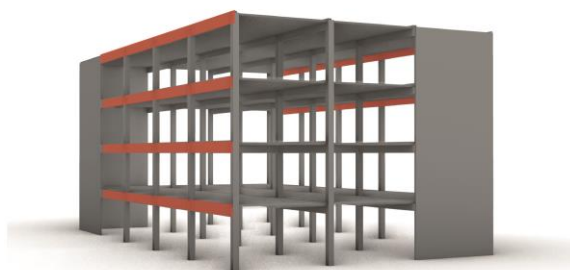
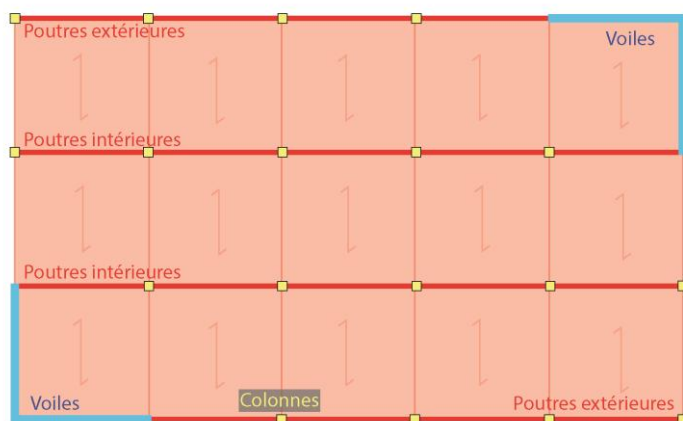


Figure 9a : Schéma simplifié du plan du bâtiment & Figure 9b : Vue 3D du bâtiment avec les poutres extérieures en rouge

Deux types de poutres (en rouge sur la Figure 9a) sont prises en compte, celles aux bords du bâtiment, les poutres extérieures et celles à l'intérieur, les poutres intérieures. Effectivement les extérieures ne supportent que la moitié des charges de leurs dalles adjacentes comparées à celles intérieures qui doivent supporter les moitiés des dalles de part et d'autre de celles-ci.

Les charges et les coefficients sont définis pour les calculs de dimensionnements des poutres :

Type de poutres :			Extérieures	Intérieures
Nom des charges	Coefficient ELU	Coefficient ELS	Charge [kN/m]	Charge [kN/m]
Charges permanentes G				
Finitions + installations	1,35	1	4,5	9
Poids de la dalle			14,25	28,5
Poids propre			$h \cdot b \cdot 25 \text{ kN/m}^3$	$h \cdot b \cdot 25 \text{ kN/m}^3$
Charges variables Q				
Charges d'exploitation	1,5	1	9	18

Tableau 7 : Récapitulatif des charges reprises par les poutres

Avec h la hauteur de poutre et b sa largeur.

3.2.2.2 Méthodologie

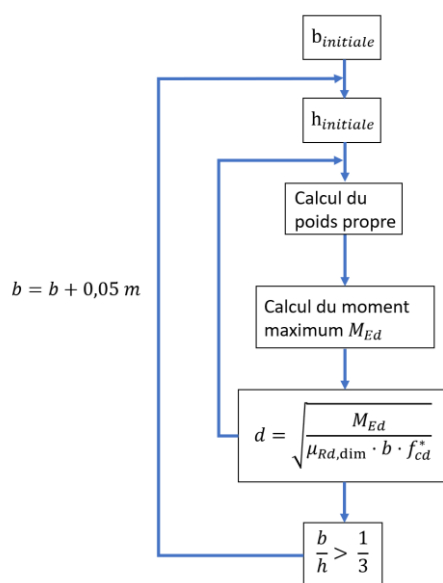
3.2.2.2.1 Dimensionnement à la flexion simple - ELU

Pour trouver les dimensions des sections la même méthodologie que la section précédente 3.2.1.2.1. est utilisée.

Ici nous démarrerons le calcul à l'ELU avec :

- Une hauteur initiale de section $h_{init} = 0,15 \text{ m}$
- Une largeur initiale de section $b_{init} = 0,1 \text{ m}$

Le schéma itératif est le même si ce n'est qu'une condition est rajoutée sur la largeur de poutre. Si, après avoir trouvé la hauteur correspondante à l'état de rupture avec $\mu_{Rd,dim} = 0,296$, le rapport b/h est plus petit que $1/3$ la largeur est incrémentée de 5 cm et le calcul est réitéré avec cette nouvelle largeur. Cette condition est imposée car ceci évite que les poutres soient trop élancées et qu'elles soient plus sensibles au déversement.



Les dimensions suivantes sont obtenues:

Dimensionnement à l'ELU			
Poutres intérieures	h_i	0,59	[m]
	b_i	0,25	[m]
Poutres extérieures	h_e	0,51	[m]
	b_e	0,2	[m]

Tableau 8 : Dimensions des poutres calculées à l'ELU

3.2.2.2.2 Vérification de la flèche - ELS

À l'ELS la flèche de la poutre est vérifiée pour qu'elle ne dépasse pas une flèche maximale de $L/250$. La même procédure que pour les dalles 3.2.1.2.2 est suivie avec les dimensions de section des poutres trouvées juste avant. Les flèches suivantes sont obtenues :

Vérification à l'ELS			
Poutres intérieures	f_{pi}	0,018	[m]
Poutres extérieures	f_{pe}	0,022	[m]
Flèche maximale autorisée	f	0,024	[m]

Tableau 9 : Récapitulatif des flèches des poutres

Les flèches n'étant pas plus importante que la flèche limite les dimensions précédemment trouvées sont conservées.

3.2.2.2.3 Calcul des armatures

Encore une fois la même procédure que pour les dalles 3.2.1.2.3 est utilisée avec la méthode des stress-block. Les aires de section d'armatures longitudinales suivantes sont obtenues,

Armatures longitudinales			
Poutres intérieures	$A_{s,i}$	16,1	[cm ² /m]
	Armatures correspondantes	4 ϕ 25	
	$A_{s,i,fin}$	19,6	[cm ² /m]
Poutres extérieures	$A_{s,e}$	9,5	[cm ² /m]
	Armatures correspondantes	5 ϕ 16	
	$A_{s,e,fin}$	10,1	[cm ² /m]

Tableau 10 : Récapitulatif des armatures longitudinales des poutres

3.2.2.2.4 Vérification de l'effort tranchant

Il est également nécessaire de contrôler l'effort tranchant dans les poutres bétons. Dans ce paragraphe, les étriers nécessaires sont déterminés.

L'Eurocode EN1992-1-1¹⁵ définit les expressions suivantes pour calculer la résistance à l'effort tranchant des poutres sans armature transversale :

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100\rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d$$

Avec : $C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c}$; $d = h - 0,04$; b_w la largeur de l'âme de la section soit la largeur de nos poutres.

- k est un coefficient tenant compte de l'effet d'échelle et il est calculé comme suit :
 $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$ avec d exprimé en mm.
- ρ_l est le ratio d'armatures longitudinales tendues, il est défini comme suit :
 $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} \leq 2\%$
- $k_1 = 0,15$
- σ_{cp} est la contrainte de compression du béton au niveau du centre de gravité sous l'effet de l'effort normal dû aux charges et/ou à la précontrainte, donc dans notre cas $\sigma_{cp} = 0$.

On trouve donc les résistances à l'effort tranchant des poutres suivantes :

Résistances à l'effort tranchant sans étrier			
Poutres intérieures	$V_{Rd,i}$	84,2	[kN]
	$V_{Ed,i}$	249,1	[kN]
Poutres extérieures	$V_{Rd,e}$	58	[kN]
	$V_{Ed,e}$	127	[kN]

Tableau 11 : Récapitulatif des résistances aux efforts tranchants des poutres sans armature transversales

Il faut donc mettre des étriers pour reprendre les efforts tranchants.

Les étriers servent à relier le tirant inférieur (armature longitudinale) et la zone comprimée supérieure de la poutre. Celles-ci permettent un mécanisme de fonctionnement impliquant des bielles inclinées successives équilibrées verticalement par les tirants que forment les étriers.¹⁶

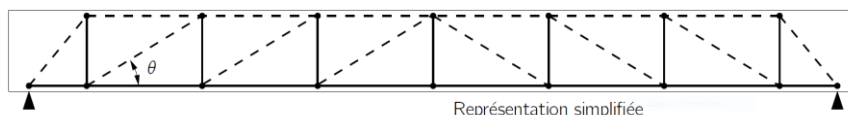


Figure 10 : Représentation des bielles - tirants dans une poutre (ligne pointillée = compression, ligne pleine = traction)

La quantité minimale d'armatures est obtenue en choisissant un angle θ d'inclinaison pour les bielles correspondant à $\cot \theta = 2$ ce qui permet un dimensionnement économique des étriers tout en évitant une rupture fragile par écrasement des bielles. Cette valeur limite est définie également par l'EN1992-1-1.

La résistance de la compression des bielles pour cette inclinaison est vérifiée.

$$V_{Rd,max} = v \cdot f_{cd} \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} \cdot b_w \cdot z$$

¹⁵ (Cap) Slide 418 de AUCE 2031 Séance All1x2

¹⁶ (Cap) Slide 423 de AUCE 2031 Séance All1x2

Avec,

- ν le coefficient de réduction de la résistance en compression du béton qui tient compte de la présence de fissures obliques : $\nu = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{ck}}{250}\right)$
- z la distance entre les armatures longitudinale et la force résultante de la zone supérieure comprimée, $z_{pi} = 0,578 \text{ m}$ et $z_{pe} = 0,466 \text{ m}$ (calculée lors du dimensionnement à l'ELU 3.2.2.2.1)
- b_w la largeur de l'âme de la section
- Et du coup $\cot \theta = 2$

Si $V_{Rd,max} > V_{Ed}$ cela signifie que l'inclinaison des bielles est suffisante pour résister. Sinon il faudra calculer l'inclinaison minimum à avoir pour résister,

$$V_{Rd,max} = V_{Ed} \Rightarrow \cot \theta = \xi + \sqrt{\xi^2 - 1} \text{ avec } \xi = \frac{z \cdot b_w \cdot \nu \cdot f_{cd} \cdot \alpha_{cw}}{2V_{Ed}}$$

Résistances à l'effort tranchant avec cot teta =2			
Poutres intérieures	$V_{Rdmax,i}$	442,2	[kN]
	$V_{Ed,i}$	249,1	[kN]
Poutres extérieures	$V_{Rdmax,e}$	285,2	[kN]
	$V_{Ed,e}$	127	[m]

Tableau 12 : Récapitulatif des résistances maximum à l'effort tranchant avec une inclinaison de bielle correspondant à $\cot \theta = 2$

L'inclinaison pour les bielles correspondant à $\cot \theta = 2$ est plus que suffisante maintenant nous pouvons calculer la quantité d'étriers avec cette inclinaison :

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta}$$

Avec s la distance entre les étriers le long de l'axe de la poutre et A_{sw} l'aire de la section des étriers régnant sur la longueur s .

On obtient donc finalement,

Étriers			
Poutres intérieures	$A_{etr,i}$	0,5	[mm ² /mm]
	Armatures correspondantes	$\phi 8$ tous les 20 cm	
	$A_{etr,i,fin}$	4,3	[cm ² /m]
Poutres extérieures	$A_{etr,e}$	0,313	[mm ² /mm]
	Armatures correspondantes	$\phi 8$ tous les 30 cm	
	$A_{etr,e,fin}$	2,3	[cm ² /m]

Tableau 13 : Récapitulatifs des étriers pour les poutres

L'aire des étriers est exprimé en cm^2/m directement pour pouvoir l'additionner à l'aire des armatures longitudinales. Cette conversion est exécutée en calculant la longueur d'étrier L_e et en la multipliant par le nombre d'étrier par mètre. L_e est calculée en retirant du périmètre de la poutre, les enrobages nécessaires :

$$L_e = h - 0,02 * 2 + b - 0,02 * 2 + 0,04$$

Avec comme estimation, 0,02 m l'enrobage de part et d'autre de l'étrier en largeur et longueur et 0,04 m les surplus de l'étrier (extrémités pliées pour « boucler » l'étrier).

3.2.2.2.5 Récapitulatif

Dimensionnement des poutres			
	Matériaux	Béton	C30/37
		Acier	BE 500 S
	Schéma statique	Isostatique	
Poutres intérieures	Charges	Permanente	41,5 [kN/m]
		Variable	18 [kN/m]
	Dimensions	h_{pi}	0,59 [m]
		b_{pi}	0,25 [m]
	Aire de section totale d'acier	$A_{s,tot,pi}$	23,85 [cm ² /m]
	Flèche	f_{pi}	0,018 [m]
	Efforts internes maximum	M_{Ed}	374 [kNm]
		N_{Ed}	/
		V_{Ed}	249 [kN]
Poutres extérieures	Charges	Permanente	21,35 [kN/m]
		Variable	9 [kN/m]
	Dimensions	h_{pe}	0,51 [m]
		b_{pe}	0,2 [m]
	Aire de section totale d'acier	$A_{s,tot,pe}$	12,4 [cm ² /m]
	Flèche	f_{pe}	0,022 [m]
	Efforts internes maximum	M_{Ed}	190 [kNm]
		N_{Ed}	/
		V_{Ed}	127 [kN]

Tableau 14 : Récapitulatif des caractéristiques des poutres

3.2.3 Dimensionnement des colonnes

3.2.3.1 Hypothèses

Dans une logique de continuité, les colonnes sont considérées également coulées en place.

En pratique, les poutres et les colonnes seraient sûrement préfabriquées. Avec une première phase où les colonnes seraient placées et elles auraient des consoles pour reprendre les poutres. On placerait ensuite des fonds de poutres préfabriquées sur les consoles et on viendrait couler les dalles par-dessus. Les colonnes du dessus viendraient s'enfiler dans les armatures d'attentes des colonnes inférieures et on coulerait un béton de scellement pour les armatures.

Dans ce cas-ci la mise en place sur le chantier peut être imaginée en considérant les 3 phases suivantes (voir Figure 11). Une première phase où l'on coule les colonnes du dessous en laissant des armatures d'attentes assez longue que pour passer outre la hauteur de poutre et assurer un bon recouvrement avec les armatures de la colonne du dessus. Ensuite lors de la phase 2 nous coulerions les poutres et

les dalles qui ont la même classe de béton que les colonnes. Nous ne mettrions que des armatures inférieures pour assurer que les poutres soient bien isostatiques et qu'aucun moment ne soit repris entre les poutres (assuré par la fissuration du béton). Et puis les colonnes du dessus seraient coulées par la suite.

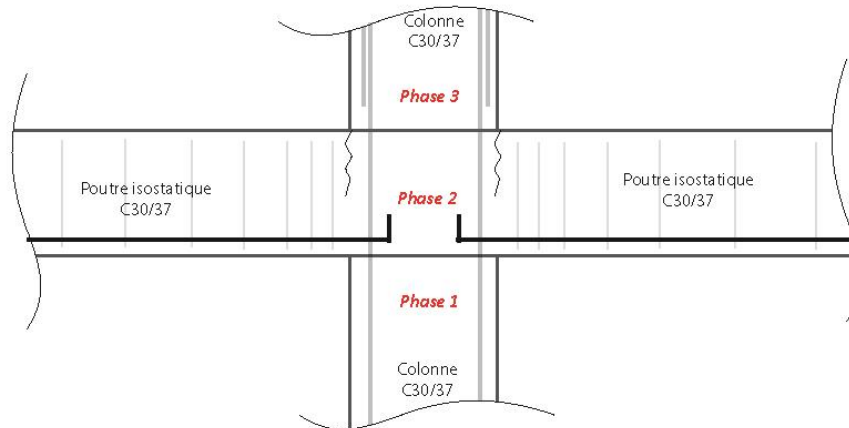


Figure 11 : Schéma de principe fonctionnement poutre – colonne

Pour la section de la colonne une section carrée est considérée pour réduire le nombre de paramètres à prendre en compte dans le dimensionnement. De cette manière la même inertie peut être prise quel que soit le sens d'application des efforts (pour le flambement ou encore la flexion composée).

Étant donné que le bâtiment étudié est de 4 niveaux, le type de colonne mise en œuvre est toujours le même. Dès lors la colonne est dimensionnée, là où elle est la plus chargée à savoir au centre du bâtiment et au rez-de-chaussée (=RDC).

Pour le schéma statique de la colonne, elle est encastree dans les fondations et retenue latéralement en son sommet.

Sa longueur de flambement est donc $L_0 = 0,7 * L$. Les étages ont une hauteur de 3,5 m. Pour la hauteur initiale de la colonne la longueur suivante est calculée $L = h_{\text{étage}} - h_{\text{dalle}}$ car il est considéré que la dalle retient la colonne latéralement.

Nous avons donc ici $h_c = L = 3,31m$.



Figure 12 : Schéma statique de la colonne

3.2.3.2 Méthodologie

Dans un premier temps un dimensionnement à la compression simple est effectué, celui-ci permet de définir les dimensions de la colonne.

Dans un deuxième temps une vérification du flambement à l'ELS est effectuée pour voir si un moment résiduel dû au second ordre (flambement) doit être pris en compte.

Troisièmement, un dimensionnement à la flexion composée pour un cas de charge asymétrique (et potentiellement reprendre un moment dû au flambement) est réalisé. L'aire d'armatures y est déterminée.

Finalement, un récapitulatif est fait.

3.2.3.2.1 Dimensionnement à la compression simple – ELU

Nous cherchons d'abord les dimensions des colonnes seulement en considérant la compression simple. Pour cela il faut évaluer les charges maximales que pourrait reprendre une colonne.

Nous considérons les charges suivantes,

Nom des charges	Coefficient ELU	Coefficient ELS	Charge [kN]
Charges permanentes G pour un étage			
Finitions + installations	1,35	1	54
Poids du plancher			171
Poids des poutres			24
Poids propre			Q_{pp}
Charges variables Q pour un étage			
Charges d'exploitation	1,5	1	108

Tableau 15 : Récapitulatif des charges d'un étage revenant sur une colonne

Q_{pp} représente le poids propre de la colonne il est défini comme ceci :

$$Q_{pp} = b_c^2 \cdot h_{\text{étage}} \cdot \gamma_b$$

La largeur initiale de la colonne, b_c , correspond à la largeur des poutres (intérieures dans ce cas-ci) pour une bonne transmission des charges.

Ce qui représente donc une charge par étage (pondérée à l'ELU) de $N_{e,Ed} = 505,5 \text{ kN}$. Nous multiplions donc simplement cette charge par le nombre d'étages et nous obtenons l'effort normal que la colonne reprend, $N_{Ed} = 2022 \text{ kN}$.

Pour déterminer les dimensions de la colonne, il est imposé que la section de la colonne sans armature sait bien reprendre cet effort,

$$\sigma_c = \frac{A_c}{N_{Ed}} < f_{cd}^*$$

Tant que cette relation n'est pas vérifiée la largeur de la section est incrémentée de 0,01 m. La largeur finale de la colonne est obtenue : $b_c = 0,35 \text{ m}$ avec un effort normal $N_{Ed} = 2050 \text{ kN}$.

3.2.3.2.2 Vérification du flambement – ELS

Une colonne étant un élément principalement soumis à un effort normal de compression, un phénomène de flambement peut apparaître. Il est donc nécessaire de vérifier l'élancement de la colonne. Pour démarrer la vérification, la section (35x35cm) obtenue au point précédent est utilisée.

La sensibilité au flambement de la colonne dépend de la longueur de flambement mais aussi de son inertie donc des dimensions de sa section transversale. Cet élancement est donné par un coefficient adimensionnel,

$$\lambda = \frac{L_0}{i}$$

avec,

- L_0 la longueur de flambement $L_0 = 0,7 * L$
- i le rayon de giration de la section exprimé en m, $i = \sqrt{\frac{I_c}{A_c}}$
- I_c l'inertie de la section $I_c = \frac{b_c^4}{12}$
- $A_c = b_c^2$

On obtient ainsi $\lambda = 22,9$

Avec une valeur comprise entre 20 et 50 la sensibilité au flambement est considérée comme faible à moyenne. Vu que λ est supérieur à 20 une vérification plus poussée, en tenant compte de l'effort normal appliqué, est faite. Pour cela il faut vérifier la relation suivante¹⁷,

$$\lambda < \lambda_{\text{lim}} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{\nu}}$$

avec ν l'effort normal réduit $\nu = \frac{N_{Ed}}{A_c \cdot f_{cd}}$. Vous trouverez le développement de cette relation en annexe 7.1.1.

Une valeur d'élancement limite est obtenue, $\lambda_{\text{lim}} = 10,97$. Vu que cette valeur est inférieure à l'élancement de la colonne, il faut tenir compte des effets du second ordre. Ceci implique que la colonne fléchit légèrement latéralement, ce qui crée une excentricité pour l'effort normal. Un moment va donc naître dans la colonne (voir Figure 13).

3.2.3.2.3 Calcul des armatures – flexion composée

Les colonnes ne peuvent pas être considérées en compression simple. En effet, la colonne peut également être soumise à de la flexion. La principale cause de flexion dans une colonne peut venir d'un cas de répartition des charges asymétrique. Une deuxième cause peut être le flambement comme expliqué dans la section précédente. En effet, lorsque la colonne flambe, cela va générer un excentrement de celle-ci par rapport à l'effort normal à reprendre. Dans les deux cas, un moment

¹⁷ (Cap) Slide 535 de AUCE 2031 Séance All1x2

devra alors être repris par la colonne. La colonne est donc soumise à un effort normal et à un moment, soit une flexion composée.

Des armatures sont nécessaires pour reprendre le moment qui apparait dans la colonne. Il faut donc déterminer le moment le plus critique pour dimensionner ces armatures. C'est-à-dire le moment maximum dû au cas asymétrique et celui dû au flambement.

Dans un premier temps le moment dû au cas de répartition des charges asymétriques est calculé. Le cas de charge asymétrique le plus critique est celui où la charge variable (charge d'exploitation) n'est répartie que sur l'une des deux poutres posées sur la colonne. Ce cas crée un moment avec la force résultante des charges qui s'applique au niveau de la colonne et qui a donc comme bras de levier la moitié de la largeur celle-ci (voir Figure 13).

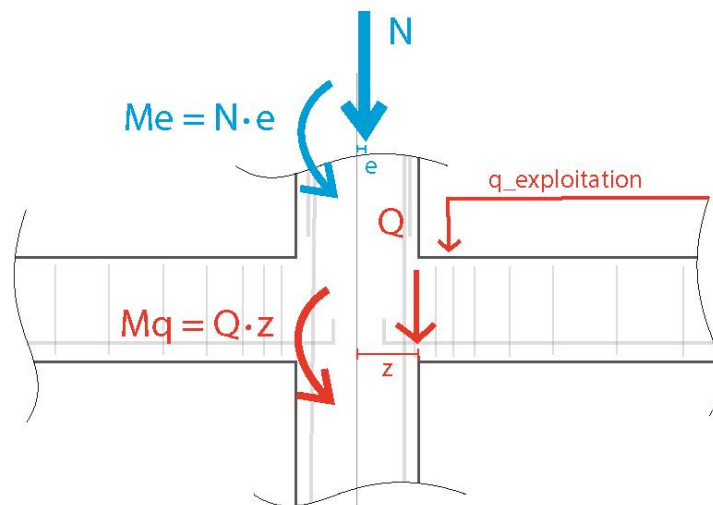


Figure 13 : Moments repris par la colonne

Nous calculons ce moment comme suit :

$$M_{Ed,q} = Q_{exp,ELU} \cdot \frac{b_c}{2} = 14,175 \text{ kNm}$$

On exprime $Q_{exp,ELU} = q_{exp} \cdot L_t \cdot 1,5 \cdot \frac{L_p}{2} = 3 \text{ kN/m}^2 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1,5 \cdot 3 \text{ m} = 81 \text{ kN}$

Avec L_t la longueur de la trame, L_p la longueur de la poutre, 1,5 le coefficient à l'ELU et q_{exp} la charge d'exploitation.

Maintenant le moment créé par le flambement est calculé, Il faut trouver l'excentricité $e = e_0 + e_i + e_2$.

Avec,

- **e_0 l'excentricité « réelle »** de la charge par rapport à la colonne. On la considère nulle car la majorité des charges viennent des étages supérieurs qui sont repris au « centre » de notre colonne au RDC. (Lors du calcul du moment dû au cas de charge asymétrique nous considérerons une excentricité égale à la moitié de la largeur de la colonne).
- **e_i l'excentricité due aux imperfections géométriques**, ici $e_i = 0,00636 \text{ m}$.
- **e_2 l'excentricité due au second ordre**, $e_2 = 0,0122 \text{ m}$.

Vous trouverez les détails des calculs des excentricités dans l'annexe 7.1.1.

On obtient donc une excentricité totale $e = 0,0186 \text{ m}$.

Nous pouvons donc maintenant calculer le moment $M_{Ed,e} = N_{Ed} \cdot e = 38,18 \text{ kNm}$.

Les deux sources de moments ayant été calculées, il est possible de déterminer le moment total sollicitant la colonne :

$$M_{Ed,Tot} = M_{Ed,e} + M_{Ed,q}$$

Le moment maximal sollicitant la colonne ($M_{Ed,Tot}$) et l'effort normal sollicitant (N_{Ed}) la colonne sont maintenant connus. Afin de déterminer la quantité d'armature nécessaire, il est alors possible d'utiliser le diagramme d'interaction (voir Figure 14). Ce diagramme met en lien 3 nombres adimensionnels :

- L'effort normal réduit : $\mu = \frac{M_{Ed,tot}}{b_c^3 \cdot f_{cd}^*$
- Le moment réduit : $\nu = \frac{N_{Ed}}{b_c^2 \cdot f_{cd}^*$
- Le ratio mécanique d'armatures (omega)

Dans le cas étudié, $\mu = 0,071$ et $\nu = 0,985$

Le diagramme (voir Figure 14) est valable pour les sections rectangulaires symétriques qui ont la même quantité d'armature de part et d'autre de la section. Il correspond aux classes de béton allant de C12 à C50 et aux armatures d'acier BE500 S. Ce diagramme correspond bien à la situation étudiée étant donné que la colonne est carrée, le béton considéré est du C30/37 et l'acier du B500S.

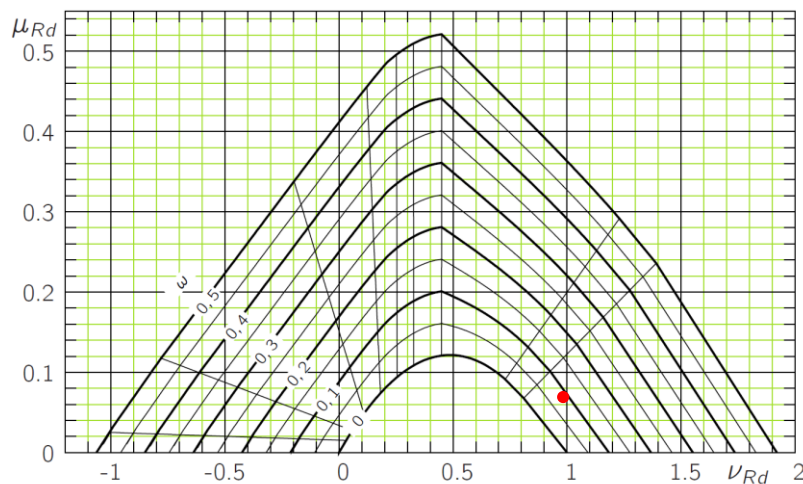


Figure 14 : Diagramme d'interactions pour les classe de béton C12 à C50 et l'acier BE500 S considérant une section symétrique rectangulaire

Le ratio correspondant aux efforts réduits est trouvé sur le diagramme (point rouge) $\omega = 0,1$. Sachant que ce ratio équivaut au rapport entre la force que peut reprendre les armatures et la force que peut reprendre l'aire de béton,

$$\omega = \frac{A_{s1} \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}^*} = \frac{A_{s2} \cdot f_{yd}}{A_c \cdot f_{cd}^*}$$

Avec le ratio ω , l'aire armatures calculée est nécessaire dans le sens de flexion de la colonne. Cela veut dire qu'il faut le double d'aire d'armature pour pouvoir reprendre la flexion dans les deux sens.

L'aire d'armature de part et d'autre de la colonne est trouvée : $A_{s1} = A_{s2} = 4,79 \text{ cm}^2/\text{m}$

Cette aire d'acier correspond à 4 ϕ 20 dans les coins de la colonne et donc une surface réelle de $A_s = 12,6 \text{ cm}^2/\text{m}$.

Même si ω était nulle, nous mettrions au minimum 4 ϕ 12 comme armatures longitudinales technologiques.

Des efforts tranchant pourraient naître suite aux efforts du vent sur la structure. De fait ceux-ci étant transmis par les dalles en tête de colonne pourraient induire des efforts tranchant. Ils seront tout de même négligé ici car ceux-ci devraient être minimales. Cependant des étriers comme armatures technologique sont considérés. Ils seront utiles d'une part pour reprendre les petits efforts tranchants s'il y en a et d'autre part pour la mise en place des armatures longitudinales. Des ϕ 6 tous les 25 cm de colonnes sont pris en compte, ce qui est équivalent à $1,33 \text{ cm}^2/\text{m}$ en effectuant la même conversion que pour les étriers des poutres 3.2.2.2.4.

3.2.3.2.4 Récapitulatif

Dimensionnement des colonnes		
Matériaux	Béton	C30/37
	Acier	BE 500 S
Charges	Permanente	1039 [kN]
	Variable	432 [kN]
	Axiale	1471 [kN]
	Excentrée	54 [kN]
Dimensions	h	3,5 [m]
	b_c	0,35 [m]
Aire de section totale d'acier	$A_{s,tot}$	13,9 [cm ² /m]
Longueur de flambement	L_0	2,32 [m]
Efforts internes maximum	M_{Ed}	52 [kNm]
	N_{Ed}	2050 [kN]
	V_{Ed}	/

Tableau 16 : Récapitulatif des caractéristiques des colonnes

3.2.4 Dimensionnement des voiles de contreventement

Pour finir, le dimensionnement des éléments de contreventement est réalisé dans cette section.

Ces voiles sont dimensionnés à l'ELU en flexion composée, sous la charge du vent.

3.2.4.1 Hypothèses

Pour contreventer la structure 4 voiles de béton armé sont disposés. Ces voiles sont nécessaires pour résister aux charges de vent sur le bâtiment.

Ils sont placés dans deux coins opposés du bâtiment, deux par deux. Ce positionnement est choisi car lorsqu'on voudra modifier les paramètres du bâtiment dans notre algorithme, il sera plus aisé de placer les voiles aux extrémités du bâtiment que dans le centre (si le nombre de modules en longueur ou en largeur du bâtiment est pair, il devient plus complexe de placer le noyau de contreventement au centre au niveau de l'algorithme). Dans ce cas-ci, en plaçant les voiles aux extrémités une économie est faite car 6 séries de 4 colonnes (dû au 4 étages) sont supprimées contre 4 séries de 4 colonnes si le noyau de contreventement était placé au centre. Effectivement les voiles endossent également le rôle des colonnes et poutres dont ils prennent la place. Une attention particulière est portée pour ne pas compter les éléments remplacés dans le métré final du bâtiment.

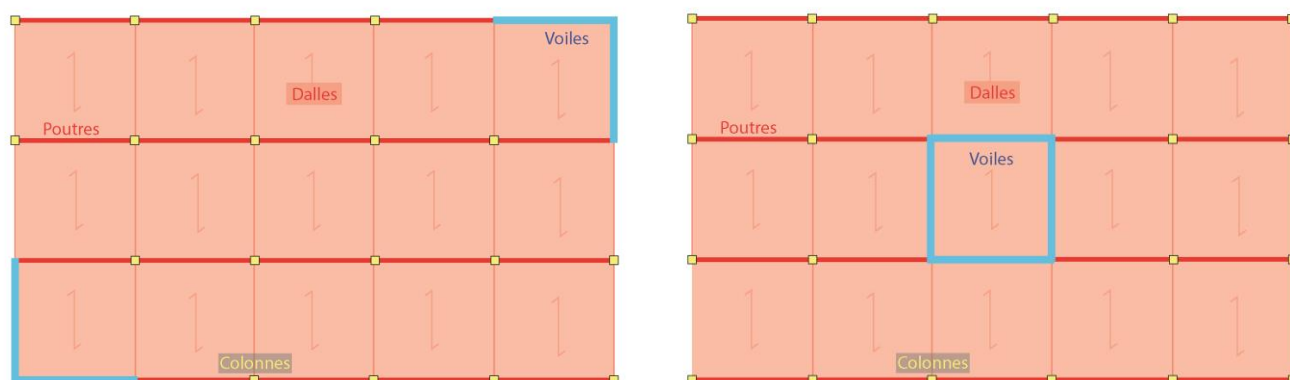


Figure 15a : Voiles situés aux coins opposés du bâtiment & Figure 15b : Voiles situés au centre

La longueur des voiles est fixée à celle des modules que ceux-ci s'intègrent plus facilement dans l'algorithme par la suite. Le dimensionnement concerne donc seulement, l'épaisseur du voile et ses armatures.

Comme le reste de la structure, les voiles sont coulés en place. (*encore une fois, en pratique on verra plus souvent deux prémurs qui sont remplis de béton coulé sur site, cela ne rend pas pour autant la méthode de calcul fausse*). La même mise en place que pour les colonnes est suivie pour que lors de la construction du bâtiment les voiles puissent supporter les poutres et dalles au fur et à mesure que le bâtiment monte.

Pour dimensionner les voiles leur schéma statique est simplifié comme une poutre encastree dans le sol, libre à l'extrémité opposée. La section de « poutre » a comme hauteur la longueur de la trame et comme largeur, l'épaisseur du voile (voir Figure 16). Il est considéré que le vent s'applique sur une

façade et par conséquent, les voiles orientés parallèlement au sens du vent sont négligés. Ceux-ci ont une inertie minime comparée aux 2 autres voiles orientés parallèlement au vent.

Les dimensions initiales de la section du voile sont, $b_v = 0,2m$ une valeur minimum en pratique pour un voile de contreventement et $h_v = 6m$ la longueur de trame d'un module.

Finalement la dernière hypothèse par du principe que la charge du vent se répartit de manière uniforme sur les voiles. Normalement il faudrait considérer des efforts ponctuels au niveau de chaque dalle mais pour notre algorithme il sera plus aisé de considérer une charge continue vu que le nombre d'étages variera d'une structure à l'autre. Nous prenons donc également cette considération dans ce cas précis.

3.2.4.2 Méthodologie

3.2.4.2.1 Sollicitations dues au vent

Pour la charge au vent, l'EN1991-1-4:2005(F) et NBN_EN_1991-1-4_ANB:2010(F) sont suivis,¹⁸ ces normes décrivent comment estimer les sollicitations dues au vent.

À l'aide de ces normes et en posant les hypothèses suivantes,

- Le bâtiment se trouve dans une catégorie de terrain 3 : zone avec couverture végétale régulière ou des bâtiments, ou avec des obstacles isolés séparés d'au plus 20 fois leur hauteur.
- Vitesse de référence du vent $v_{b,0} = 25 m/s$ en prenant comme zone de référence le Brabant-Wallon (côté sécuritaire par rapport à la zone de Charleroi $v_{b,0} = 25 m/s$, qui est la ville initiale où doit être construit l'homologue de ce bâtiment en grumes).
- Coefficient d'orographie $co(z) = 1$, pour un terrain plat.

Une charge au vent de $q_{v1} = 0,732 kN/m^2$ est obtenue, vous pourrez retrouver en annexe, 7.1.3, la méthode suivie.

Cette valeur dépendant de beaucoup de conditions et paramètres, une valeur de q_v plus communément utilisée dans des cas d'avant-projet, $q_{v1} = 1 kN/m^2$ est fixée. Ainsi une marge de sécurité est prise.

3.2.4.2.2 Dimensionnement à la flexion composée – ELU

Les voiles reprenant les charges des poutres et dalles adjacentes et les charges du vent, ils sont soumis à la flexion composée.

Nous calculons le moment dû au vent repris par le voile comme suit,

$$M_{Ed} = q_v \cdot \frac{h_{tot}^2}{2} = 1470 kNm$$

Avec,

- q_v la charge linéique reprise par le voile que nous trouvons comme suit, $q_v = q_{v1} \cdot \frac{L_{tot}}{n_v} = 15 kN/m$

¹⁸ (Latteur, 2019)

- $L_{tot} = 30m$ la longueur du bâtiment
- $n_v = 2$ le nombre de voiles considérés
- $h_{tot} = 14 m$ la hauteur totale du bâtiment

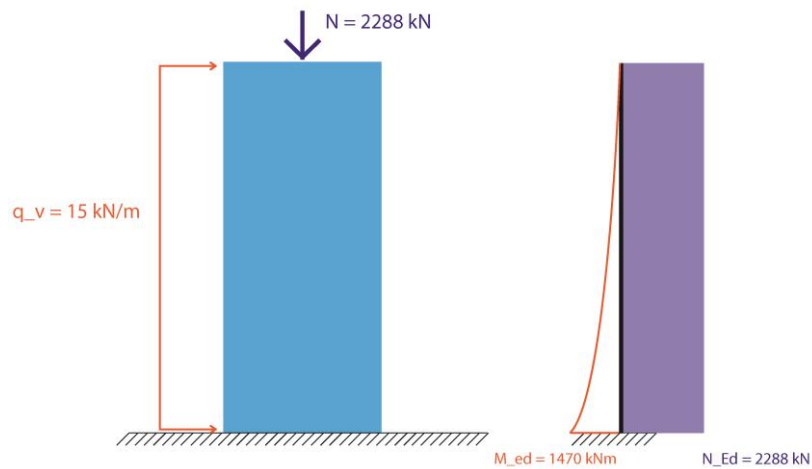


Figure 16 : Schéma statique du voile et ses efforts internes

En ce qui concerne l'effort normal, la zone d'influence la plus critique pour un voile est considérée et les charges suivantes sont obtenues,

Nom des charges	Coefficient ELU	Charge [kN]
<i>Charges permanentes G pour un étage</i>		
Finitions + installations	1,35	54
Poids du plancher		171
Poids propre des voiles		78,75
<i>Charges variables Q pour un étage</i>		
Charges d'exploitation	1,5	108
<i>Charge totale pondérée par étage</i>		572

Tableau 17 : Charges verticales les plus critiques reprises par le voile

Ce qui nous donne un effort normal $N_{Ed} = 2288kN$.

Les efforts réduits sont calculés pour trouver le ratio d'armatures longitudinales nécessaire dans les voiles via le diagramme d'interactions.

$$\mu = \frac{M_{Ed,tot}}{b_v \cdot h_v^2 \cdot f_{cd}^*} = 0,019$$

$$\nu = \frac{N_{Ed}}{b_v \cdot h_v \cdot f_{cd}^*} = 0,179$$

En regardant le diagramme d'interactions à la section 3.2.3.2.3 $\omega = 0$ est trouvé avec ces efforts réduits, ce qui n'est pas étonnant au vu des dimensions de la section.

3.2.4.2.3 Calcul des armatures

Comme nous avons pu le voir dans la section 3.2.4.2.2 il n'est pas nécessaire d'avoir des armatures longitudinales. Cependant des armatures technologiques sont nécessaires pour le contrôle de la fissuration et surtout assurer la bonne répartition des efforts. Des treillis 8x200x200 sont placés en face supérieure et inférieure du voile ainsi que des étriers ϕ 6 tous les 20 cm.

Ce qui correspond à $13,13 \text{ cm}^2/\text{m}^2$ de voiles.

3.2.4.2.4 Récapitulatif

Dimensionnement des voiles		
Matériaux	Béton	C30/37
	Acier	BE 500 S
Nombre de voiles	n_v	4 [/]
Charges verticales	Permanente	1215 [kN]
	Variable	432 [kN]
Charge due au vent	q_{v1}	1,5 [kN/m ²]
Dimensions de la section	h_v	6 [m]
	b_v	0,2 [m]
Hauteur totale des voiles	h_{tot}	14 [m]
Aire de section totale d'acier	$A_{s,tot}$	13,13 [cm ² /m ²]
Longueur de flambement	L_0	2,32 [m]
Efforts internes maximum	M_{Ed}	1470 [kNm]
	N_{Ed}	2288 [kN]
	V_{Ed}	210 [kN]

Tableau 18 : Récapitulatif des caractéristiques des voiles

3.3 Analyse de cycle de vie du bâtiment R+3

Dans ce travail nous voulons évaluer l'impact environnemental de la structure d'un bâtiment simple en béton, en fonction de sa géométrie. Étant donnée que cette dernière a des conséquences sur les dimensions des éléments mais aussi sur la vie du bâtiment, nous allons analyser le cycle de vie en deux temps. Dans un premier temps, nous nous concentrons sur les matériaux et leur métré. Dans un second temps, nous nous intéressons aux autres étapes du cycle de vie, notamment l'utilisation du bâtiment.

Pour cette ACV et celles qui suivront, nous nous pencherons principalement sur l'indicateur de changement climatique équivalent aux émissions de gaz à effet de serre (= GES) exprimé en *kgCO₂équivalent*.

3.3.1 Impact de la production de la structure

Maintenant que nous avons dimensionné tous les éléments de la structure nous pouvons faire un métré. Ainsi à l'aide des différentes quantités de matériaux nous pourrions estimer l'impact environnemental des premières étapes de cycle de vie du bâtiment (les modules A1 à A3 concernant la fabrication des matériaux voir 2.1.1).

Nous calculons donc le nombre d'éléments pour pouvoir le multiplier à leurs dimensions (hauteur de section h_i , largeur de section b_i et aire d'acier a_i (par m ou m² courant) et trouver le volume de béton, $V_{b,i}$, ainsi que la masse d'acier d'armatures $M_{a,i}$ utilisés pour chaque type d'éléments i .

Nom de l'élément	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément		Concentration d'armatures
Dalles	60	h_d	0,19 [m]	36 [m²]	V_b_d	410,4 [m³]	65 [kg/m³]
		a_d	15,82 [cm²/m²]		M_a_d	26824 [kg]	
Poutres intérieures	40	h_pi	0,59 [m]	6 [m]	V_b_pi	35,4 [m³]	120 [kg/m³]
		b_pi	0,25 [m]		M_a_pi	4446 [kg]	
		a_pi	23,6 [cm²/m]				
Poutres extérieures	32	h_pe	0,51 [m]	6 [m]	V_b_pe	19,6 [m³]	120 [kg/m³]
		b_pe	0,2 [m]		M_a_pe	2163 [kg]	
		a_pe	14,35 [cm²/m]				
Colonnes	72	b_c	0,35 [m]	3,5 [m]	V_b_c	30,9 [m³]	85 [kg/m³]
		a_c	13,33 [cm²/m]		M_a_c	2637 [kg]	
Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	84 [m²]	V_b_v	67,2 [m³]	52 [kg/m³]
		a_v	13,13 [cm²/m²]		M_a_v	3464 [kg]	
Radier	1	h_r	0,15 [m]	540 [m²]	V_b_r	81 [m³]	40 [kg/m³]
		a_r	7,55 [cm²/m²]		M a r	3200 [kg]	

Tableau 19 : Métré de la structure du bâtiment R+3

Comme expliqué dans la section 2.2.3 nous allons utiliser la base de données Epic pour estimer l'impact environnemental de cette structure. Cette base de données évalue trois indicateurs :

l'énergie utilisée exprimée en MJ/UF, la consommation d'eau exprimée en L/UF et les émissions de GES exprimés en kgCO₂e/UF. Ici les unités fonctionnelles (= UF) des deux matériaux sont les [m³] pour le béton et les [kg] pour l'acier.

Nous prenons donc un béton de classe « C32 » (qui est considéré comme l'équivalent C30/37 européen dans ce travail) et pour les armatures de renfort nous prenons le matériau « Hot rolled structural steel »¹⁹ qui est l'équivalent de l'acier BE500 S que nous avons utilisé pour le dimensionnement des éléments. Nous obtenons donc les impacts environnementaux suivants pour chaque élément ainsi que pour la totalité de la structure :

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES [tCO2e]	Émission de GES totale [tCO2e]	Cons. en eau [m³]	Cons. totale en eau [m³]	Cons. en énergie [GJ]	Cons. totale en énergie [GJ]
Planchers	C30/37	491,4	/	204	291	2113	3227	1482	2647
	BE500 s	/	30025	87		1114		1165	
Poutres	C30/37	55,0	/	23	42	236	482	166	422
	BE500 s	/	6609	19		245		256	
Colonnes	C30/37	30,9	/	13	20	133	231	93	195
	BE500 s	/	2637	8		98		102	
Voiles	C30/37	67,2	/	28	38	289	417	203	337
	BE500 s	/	3464	10		129		134	
		Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Cons. totale en eau [m³]	Cons. totale en énergie [MJ]		
			644	42,7	392	4357	3601		

Tableau 20 : Récapitulatif des impacts environnementaux du bâtiment R+3

Nous pouvons déjà faire une première observation au niveau des impacts par élément de la structure. Nous remarquons que la majorité d'influence des émissions de GES vient des planchers (comprenant les dalles et le radier), effectivement ceux-ci sont à l'origine de 74% des émissions de la structure. Ceci s'explique par leur volume qui représente lui 76% du volume total de la structure. Ces deux valeurs ne sont pas directement proportionnelles car la quantité d'armatures dans les éléments n'est elle-même pas proportionnelles au volume. Effectivement on retrouve moitié moins d'armatures dans les dalles que dans les poutres (voir Figure 18 et .

Ensuite viennent les poutres en terme d'impact sur les émissions, elles représentent 11% du total. Si l'on différencie les deux types de poutre on remarquera que celles extérieures consomment beaucoup moins que les poutres intérieures sur la Figure 17. L'impact d'une poutre extérieure équivaut à 450 kgCO₂e contre 690 kgCO₂e pour les poutres intérieures. Ceci s'explique par le volume et la concentration d'armatures plus faibles pour celles extérieures.

¹⁹ (Crawford R.H., Stephan A., Prideaux, F., Bontinck P-A., 2020)

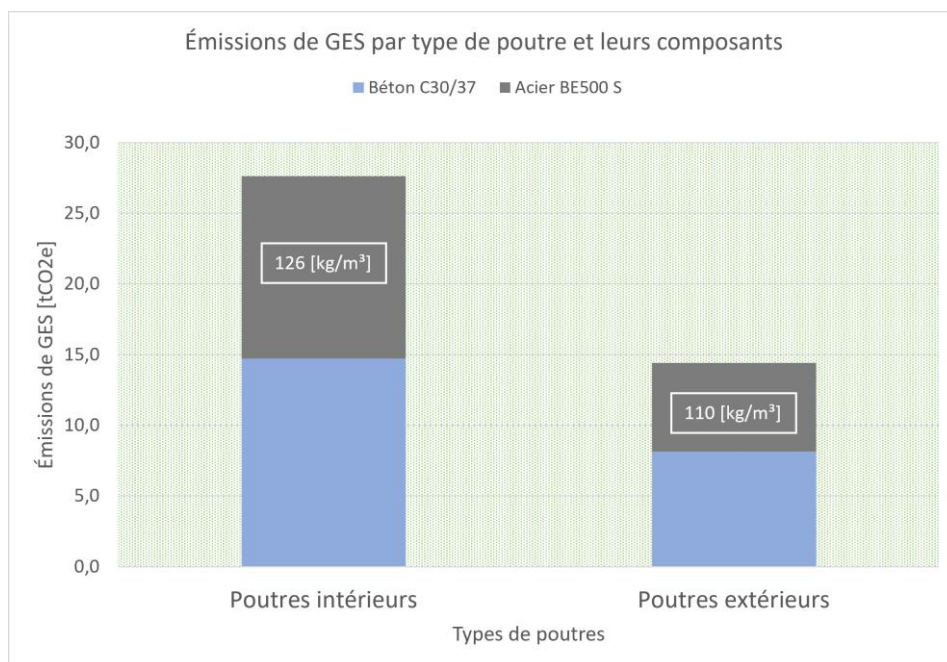


Figure 17 : Part d'émissions des GES des différentes poutres du bâtiment

Finalement nous avons les voiles qui représentent 10% et les colonnes 5% des impacts sur le changement climatique de la structure. Sur l'histogramme à la Figure 18, les émissions de GES dues aux différents éléments sont représentées, ainsi que la proportion de chacun de leurs composants, le béton et l'acier.

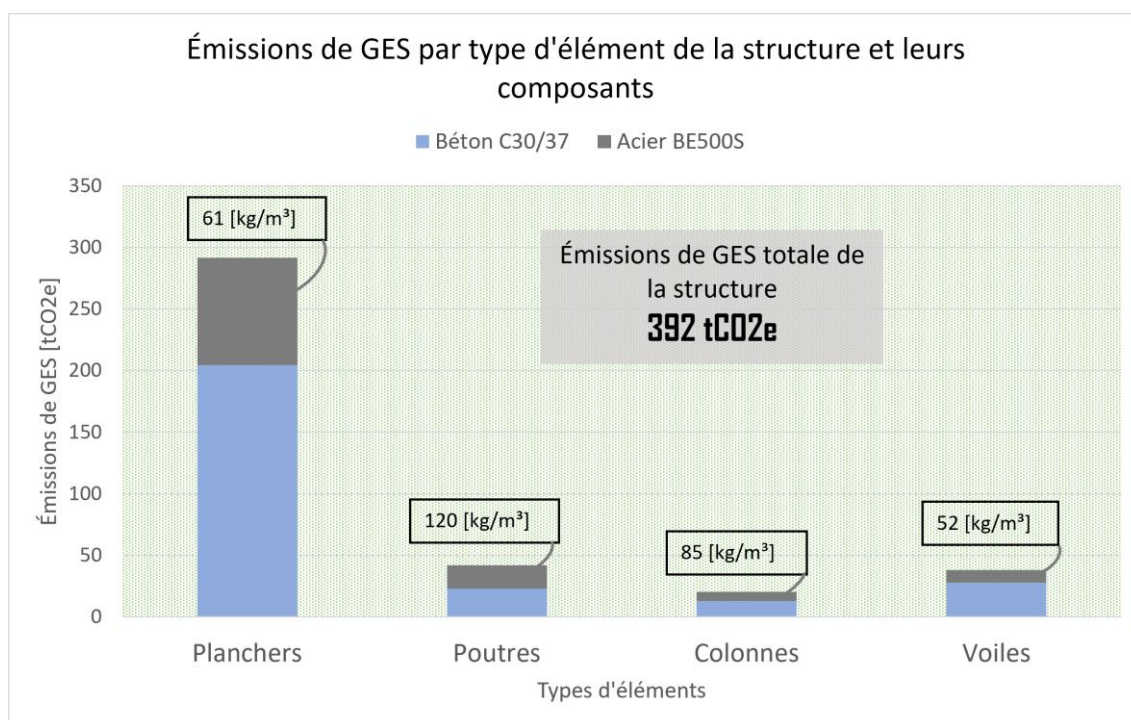


Figure 18 : Émissions de GES par éléments de la structure "bâtiment R+3"

Pour pouvoir comparer les éléments entre eux nous pouvons calculer l'impact par m^3 d'élément, pour faire cela nous prenons les émissions globales de l'élément que nous divisons par son volume ce qui nous donne un facteur d'impact.

Nous obtenons ainsi les facteurs suivants,

	Planchers	Poutres	Colonnes	Voiles
Facteur d'impact par volume d'élément [kgCO ₂ e/m ³]	593,2	764,6	663,7	565,5

Tableau 21 : Facteur d'impact d'émissions de GES par type d'élément

Nous observons donc que les poutres sont les plus coûteuses environnementalement parlant contrairement aux voiles de contreventement qui sont les moins impactant. Ces facteurs sont donc proportionnels à la concentration d'armatures dans les éléments. Par contre, si la classe de béton variaient d'un élément à l'autre ce ne serait plus le cas car les impacts des différentes classes ne sont pas les mêmes. Dans la base de données de EPiC on retrouve,

Matériaux	C25	C30	C40	BE 500 S
UF	[m ³]	[m ³]	[m ³]	[kg]
Émissions de GES [kgCO ₂ e]	361	416	491	2,9

Tableau 22 : Facteurs d'émissions de GES pour les différents matériaux²⁰

Une comparaison intéressante serait donc d'augmenter la classe de béton pour voir à quel point le gain de volume compenserait l'augmentation des GES émis pour cette classe de béton. Nous étudierons cette possibilité avec l'utilisation de notre algorithme dans la section **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

3.3.2 Impact des autres étapes du cycle de vie

Au-delà de la fabrication de la structure il y a toutes les autres étapes de cycle de vie qui impactent l'environnements. Il est donc intéressant d'estimer ces impacts également. Pour cela nous allons utiliser l'outil Totem dont nous avons parlé dans la section 0 qui va nous y aider.

3.3.2.1 Méthodologie

Étape 1 : Figure 19

Nous allons donc créer un bâtiment similaire au nôtre, du moins, au niveau de la géométrie. Pour rappel, l'outil Totem²¹ ne prend pas encore en compte les dimensions des éléments structuraux.

²⁰ (Crawford, R.H., Stephan, A., Prideaux, F. and Bontinck, P-A., 2020)

²¹ (Totem - Building, 2023)

Nous rentrons dans un premier temps les paramètres généraux du bâtiment :

- Fonction : Bureaux
- Nature des travaux : Nouveau bâtiment
- Surface de plancher utile : 2160 m²
- Volume chauffé : 7560 m³
- Nombre d'étages : 4

Comme vous le remarquez nous considérons que toute la surface de plancher de notre structure est utilisée et que son volume (3,5 mètres de hauteur/étage) est également intégralement chauffé par simplicité.

Paramètres généraux	Composition du bâtiment	Consommation d'énergie	Résultats
Nom du bâtiment:	Bâtiment		
Fonction/Typologie:	Bureau - Privé, utilisateur unique		
Client:	Sion Martin		
Adresse:			
Nature des travaux:	Nouveau bâtiment		
Année de construction (planifiée):	2024		
Surface de plancher utile (m²)*:	2160		
Volume chauffé (m³):	7560		
Nombre d'étages (incl. rez de chauss...):	4		
Nombre d'utilisateurs:			
Commentaires:			

Figure 19 : Étape 1 - Création d'un bâtiment dans Totem

Étape 2 : Figure 20

Ensuite nous sélectionnons les éléments du bâtiment en indiquant leur quantité d'unité fonctionnelle. Ici nous prendrons des éléments de la bibliothèque de Totem qui comprennent pour la plupart des composants d'isolation, d'étanchéité, de finitions, etc. Le but étant de simuler le bâtiment fini entièrement pour pouvoir évaluer l'impact le plus fidèlement à la réalité, surtout en ce qui concerne sa consommation durant son utilisation.

Nous choisissons donc, en essayant de rester fidèle le plus possible à nos précédents choix de dimensions, les éléments suivants :

- Plancher sur sol : « *Coulé sur site – Béton armé (150 mm) | Mousse PUR (130 mm) | Carreaux rigides céramique émaillée* » **540 m²**, $U = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Plancher d'étage : « *Enduit épais plâtre | Coulé sur site – béton armé (150mm) | Carreaux rigide céramique émaillée* » **1620 m²**
- Toiture : « *Feuille d'étanchéité EPDM | Panneau PUR | Coulé sur site – béton armé (150 mm)* » **540 m²**, $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Poutre : « *Section rectangulaire – préfabriquée – béton armé (400x600 mm)* » **432 m**
- Colonne « *Section carré – préfabriquée – béton armé (300x300 mm)* » **252 m**
- Voiles : « *Panneau de laine de roche (140 mm) | Coulé sur site – béton armé (200mm)* » **336 m²**, $U = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$

- Façades / mur-rideau : « *Profilé en bois (190x50 mm) / Double vitrage de sécurité (29 mm) / Panneau aluminium (2x2 mm) – XPS (25 mm)* » **1008 m²**, $U = 1,73 \text{ W/m}^2\text{K}$

Vous pourrez retrouver tous ces éléments, leur composition et leur impact par unité fonctionnelle dans l'annexe 7.2.2.

Vous noterez que nous avons rajouté des murs-rideaux, ceux-ci seront importants pour estimer l'impact des déperditions thermiques via les façades. Néanmoins nous avons négligé leur poids dans le dimensionnement des éléments. Vous remarquerez aussi que le plancher au sol, la toiture et les voiles sont isolés, cela nous permet de aussi d'évaluer les déperditions aux niveaux de ces éléments-là. Il est possible également de mettre des installations techniques et des ouvertures dans la composition du bâtiment mais nous nous limiterons à un modèle simplifié.

Nom	Type	Nombre	Impact des matériaux
> Plancher			[2]
> Mur			[2]
> Toiture			[1]
> Élément de structure			[2]
Ouverture			
Installation technique			
Éléments à l'extérieur du bâtiment			

Figure 20 : Étape 2 - Création d'un bâtiment dans Totem

Étape 3 : Figure 21

Vient la dernière étape avant l'analyse du bâtiment, c'est la consommation énergétique. Pour cela nous choisissons un système de ventilation, une étanchéité à l'air pour le bâtiment (la capacité à empêcher le passage non contrôlé de l'air entre l'intérieur et l'extérieur) que nous définissons sur la valeur PEB par défaut et un système de chauffage. Nous choisissons ici le système de pompe à chaleur qui est le moins énergivore des trois systèmes proposés (chaudière au gaz ou au mazout).

☒ Approche simplifiée (degrés-jours équivalents)

Ventilation

Type de système de ventilation: Ventilation naturelle ou mécanique sans récupération de chaleur

Étanchéité à l'air (v50): Valeur PEB par défaut (12 m³/h.m²)

Production de chaleur

Type de chauffage: Pompe à chaleur air-eau

Figure 21 : Étape 3 - Création d'un bâtiment dans Totem

3.3.2.2 Résultats

L'outil Totem nous donne donc les résultats de l'analyse de cycle de vie du bâtiment avec les différents paramètres que nous avons encodés. Cette ACV considère toutes les étapes du cycle de vie d'un bâtiment (voir 2.1.1), elle prend pour hypothèse que la durée de vie du bâtiment est de 60 ans et que passé ce délai le bâtiment est déconstruit/démoliti avec ses matériaux détruits ou recyclés.

Nous retrouvons donc les impacts décrits au Tableau 23, pour le modèle²² correspondant au maximum au bâtiment que nous avons dimensionné dans ce chapitre :

Indicateur de changement climatique Émissions de GES		
Étape du cycle de vie :	Par m ² de SPU [kgCO ₂ e/m ² SPU]	Pour l'entièreté du bâtiment [tCO ₂ e]
Toutes les étapes	674	1456
Production A1-A3	240	518
Transport jusqu'au chantier A4	15	32
Construction et installation A5	27	58
Maintenance B2	28	60
Remplacement Composant B4.1	72	156
Remplacement élément B4.2	0	0
Consommation d'énergie pour le chauffage B6.2	274	592
Démolition/ Déconstruction C1	4,3	9
Transport des déchets C2	4,3	9
Traitement des déchets C3	1,2	3
Élimination des déchets C4	6,6	14

Tableau 23 : Impact de chaque étape du cycle de vie du bâtiment R+3

Dans le Tableau 23, la Figure 22 et dans la Figure 23, les impacts dus aux étapes liées aux matériaux du bâtiment sont représentés en orange tandis que l'impact dû à l'énergie consommée du bâtiment est représenté en vert.

²² (Sion, 2023)

Nous remarquons sur la Figure 22, que les étapes les plus impactantes sont la production des matériaux (36%) et l'énergie (41%) utilisée durant la vie du bâtiment. Le transport et la construction du bâtiment (A4-A5) ne représente que 6%. Les étapes de maintenance et remplacement de composant équivalent à 15% elles concernent les composants des éléments qui ont une longévité de moins de 60 ans (les éléments structurels ne sont pas remplacés pendant la durée de vie du bâtiment). Et les 2 derniers pourcents concernent la fin de vie des matériaux.

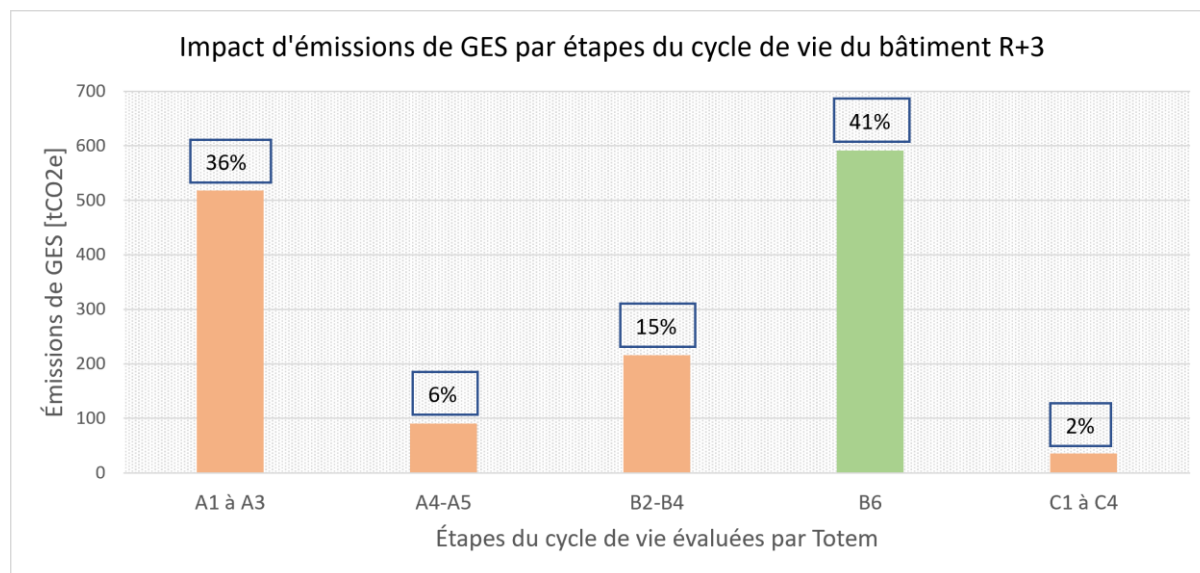


Figure 22 : Histogramme de l'impact des étapes du cycle de vie en terme d'émissions de GES

Si nous résumons ça entre l'impact dû aux étapes liées aux matériaux et l'impact dû à l'énergie utilisée durant la vie du bâtiment nous avons :

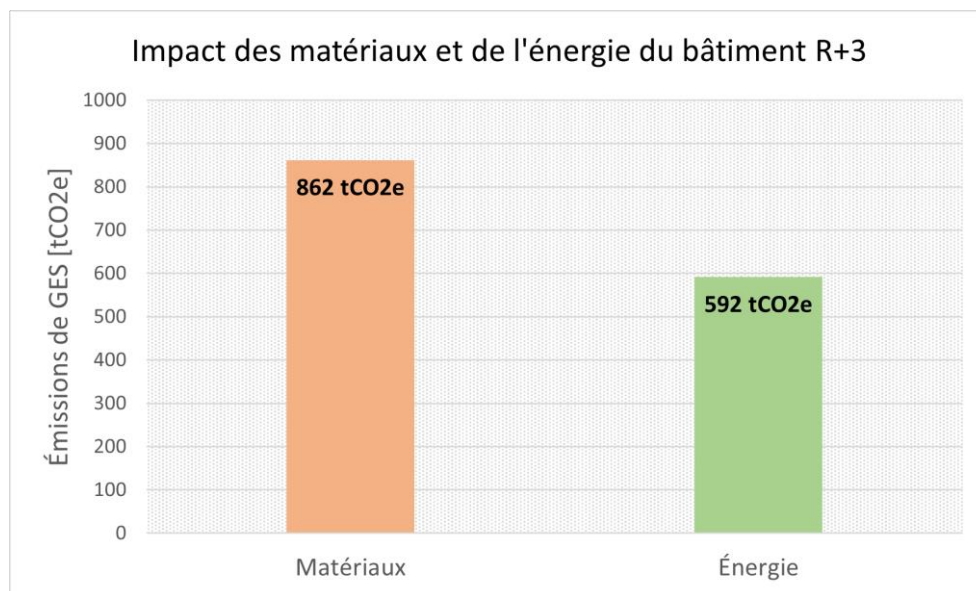


Figure 23 : Histogramme de l'impact des matériaux vs l'énergie du bâtiment en terme d'émissions de GES

En tenant en compte que l'énergie du bâtiment considérée est seulement celle provenant du système de chauffage (la pompe à chaleur) et représente déjà 41% de la totalité des émissions de GES, ce pourcentage représente 39835 kWh/an d'électricité.

Même si, dans la pratique toutes les techniques spéciales (électricité, eau potable, eau usée, ..) et les installations qui vont avec (pompes, conduites, câbles, sanitaires, ...) devraient être prises en compte, cela nous donne déjà une bonne idée de ce que représente un bâtiment de 2160 m² en terme d'impact sur le changement climatique.

3.3.3 Comparaison de l'ACV faite avec la base de données EPiC vs l'ACV faite via Totem

Si nous comparons les valeurs obtenues pour la phase de production des matériaux d'abord avec la base de données EPiC et ensuite avec notre modèle Totem, nous observons une belle différence. Cette étape représente, dans la première base de données, 394 tCO₂e avec notre dimensionnement contre 518 tCO₂e pour le modèle Totem. Toutefois, dans ce dernier modèle, si l'on retire les façades du calcul nous obtenons une émissions de GES de 395 tCO₂e comme résultats.

- Le premier élément qui crée cet écart est la différence de base de données des deux modèles. L'une, EPiC, est une base de donnée australienne, tandis que l'autre, Totem, travaille sur une base de donnée suisse Ecolnvent (voir section 2.2.3) et des scénarios adaptés au contexte belge. La première pousse sa précision au maximum dans l'évaluation des impacts de ses éléments (voir 2.2.3). Nous pouvons aussi imaginer, par exemple, que les données liées aux transports des matières premières ne sont pas les mêmes entre les bases.
- Ensuite vient la configuration des éléments, si nous comparons les impacts dans les deux environnements, au niveau de l'étape de production des matériaux, nous obtenons :

Indicateur de changement climatique Émissions de GES des éléments par m ² de SPU		
Éléments	Calculé avec la base de données EPiC [kgCO ₂ e/m ² SPU]	Calculé par Totem [kgCO ₂ e/m ² SPU]
Radier	19,9	32
Plancher d'étage	86,3	77
Toiture	28,8	23
Poutre	19,5	24
Colonne	9,5	5,2
Voiles	17,6	22
Façades	77	57

Tableau 24 : Comparaison des éléments évalués à l'aide d'EPiC et dans Totem au niveau de l'étape de production des matériaux

Certains éléments sont plus impactant du côté de notre dimensionnement avec EPiC et cela est souvent dû à des dimensions plus importantes ou à la quantité d'acier par élément. C'est effectivement là, que résidait le problème avec Totem nous ne pouvions pas modifier les dimensions des éléments structurels et leur concentration d'armatures. De l'autre côté Totem inclut des composants d'isolation, de finitions, d'étanchéité, etc, ce qui joue évidemment sur l'impact de production de ceux-ci. Si nous incluons les éléments de façades dans la comparaison nous obtenons des valeurs fort différentes, cela est sûrement dû aux bases de données qui divergent et peut-être

aussi à la compositions des éléments. Dans EPiC nous avons juste sélectionné, comme matériau, du double vitrage²³ qui recouvre les 1008 m². Tandis que dans Totem nous retrouvons toute la structure mur-rideau et donc il ne considère pas la surface comme continue avec seulement du verre, mais des panneaux de verre entre coupé de châssis en bois.

Quoi qu'il en soit, en ayant des bases de données qui divergent nous n'allions pas obtenir les mêmes valeurs. L'idée ici était d'apporter une évaluation complète du bâtiment pour pouvoir quantifier l'ordre de grandeurs des différentes étapes du cycle de vie de ce dernier et Totem nous l'a permis.

Par contre en terme de dimensionnement de la structure notre modèle nous permet d'être beaucoup plus précis avec la base de donnée australienne, et surtout de pouvoir l'inclure dans notre algorithme.

²³ Erreur ! Source du renvoi introuvable.

3.4 Conclusion intermédiaire

Pour rappel, le but de ce travail est de comparer différentes variantes de structures en béton armé pour une même superficie de planchers utiles (SPU) et de trouver une configuration optimale pour réduire au plus l'impact de changement climatique du bâtiment. Nous avons donc dans un premier temps évalué l'impact d'un bâtiment spécifique pour établir une méthodologie d'évaluation. Et nous pouvons maintenant en tirer quelques conclusions.

En ce qui concerne les impacts du dimensionnement de nos éléments nous remarquons que les planchers sont de loin les principaux acteurs dans l'émission de GES de notre structure. Il serait donc intéressant d'essayer de diminuer leur volume et pour cela faire varier les paramètres de la structure.

Avec notre deuxième ACV faite sur le site Totem, nous avons pu nous rendre compte des proportions des impacts des différentes étapes du cycle de vie. Notamment des deux principales : la production des matériaux et l'énergie consommée pour chauffer le bâtiment sur toute sa durée de vie. Nous remarquons par contre que les étapes liées à la maintenance/usage du bâtiment (B2-B4) ne concernent pas son ossature mais plutôt les finitions, parachèvements ou autres techniques spéciales. En effet la longévité des éléments structurels est considérée équivalente à celle du bâtiment, ils ne nécessiteront donc pas de réel entretien. Les étapes de transports, construction et démolition (A4-A5-CX) ne concernent quant à elles que 8% de l'émissions de GES dont, seule une partie concerne la structure du bâtiment. Nous négligerons donc les étapes liées à la maintenance, aux transports, à la construction et à la démolition qui ne sont pas les éléments clés de notre ACV dans la suite de ce travail.

En ce qui concerne la production de matériaux nous négligerons les éléments qui ne sont pas structurels car cela nécessiterait d'émettre encore plus d'hypothèses pour notre modèle et de choix arbitraires également. De plus une bonne partie des éléments non structurels sont proportionnels à la superficie de planchers qui restera identique dans nos comparaisons ces composants seront dès lors pas très impactant dans les résultats.

Une autre étape qui serait donc également intéressante à évaluer concerne la consommation d'énergie du bâtiment. Dans Totem cet impact représente le chauffage du bâtiment. Il est évalué sur base des pertes par transmission et des pertes par ventilation. Les pertes par ventilations sont liées au recyclage de l'air par des systèmes prévus à cet effet. Elles sont liées aussi au changement d'air via les ouvertures du bâtiment (son étanchéité). Ces pertes sont donc essentiellement proportionnelles au volume du bâtiment et ce dernier est un facteur qui restera inchangé entre les différentes configurations de la structure. Nous considérons, d'ailleurs, la même hauteur sous plafond pour chaque étage et avec une superficie totale identique nous aurons donc le même volume d'air. Par contre les pertes par transmission ou déperdition thermique seront liées à la surface de façade de nos bâtiments. Elles varieront avec la géométrie de la structure directement, il sera donc intéressant de les prendre en compte dans nos comparaisons.

4 Outil de modélisation paramétrique

Dans cette section, une présentation de l'algorithme, qui permet de créer différentes configurations de structure, sera faite. Dans un premier temps les hypothèses et limites du modèle seront définies. Ensuite les différentes parties de l'algorithme seront passées en revue.

Pour créer cet algorithme le plugin *Grasshopper* du logiciel de modélisation 3D, *Rhino 3D*, est utilisé. le choix de ce logiciel est résumé dans la section « État de l'art » au point 2.2.2. En résumé, Rhino 3D est un logiciel de qui permet la création de projets complexes, allant de la création d'une chaise à celle d'un bâtiment entier. Grasshopper permet une programmation visuelle en créant des algorithmes paramétriques. Cette approche visuelle repose sur l'assemblage et la connexion de boîtes, comme illustré dans la Figure 27 ici plus bas.

L'un des principaux avantages de cette approche est la flexibilité qu'elle offre. En modifiant simplement un paramètre d'entrée, il est possible d'adapter rapidement le modèle à un autre projet. Cela permet d'économiser du temps et de l'effort, car il n'est pas nécessaire de reconstruire l'ensemble du modèle à partir de zéro.

De plus, l'extension EPiC, intégrée à Grasshopper, nous permet d'ajouter une analyse de cycle de vie à notre outil. Cela nous permet d'obtenir directement des résultats liés aux différentes structures que nous étudions.

4.1 Définition du modèle paramétrique

Nous voulons mettre en place un modèle qui fonctionne structurellement de la même manière que le cas spécifique étudié au point 3.1. C'est-à-dire une structure composée de modules carrés eux-mêmes composés de : une dalle, 2 poutres et 4 colonnes. Cette composition permettra de faire varier les structures aisément en utilisant la même méthodologie de dimensionnement (voir Figure 24). Nous resterons donc sur des structures simples rectangulaires.



Figure 24 : Exemple de deux variantes de structures composées de "modules carrés" ayant la même surface de planchers utiles (SPU)

4.1.1 Hypothèses et limites du modèle

4.1.1.1 Paramètres - hypothèses

Pour définir correctement le modèle il faut choisir les paramètres que nous voulons faire varier et imposer les limites correspondantes à ces paramètres. Vous retrouverez tous les paramètres à la Figure 25.

En alignement avec le sujet de ce mémoire, "*Analyses de cycle de vie pour différentes variantes de bâtiments multiétagés en béton*", nous avons défini le nombre d'étages comme premier paramètre de notre modèle de structure de bâtiment. Nous avons fixé une limite inférieure à 3 étages, étant donné que nous considérons les bâtiments avec moins d'étages comme faisant partie d'une catégorie plus standard ou résidentielle. Comme limite supérieure nous fixons 10 étages car au-delà nous considérons rentrer encore dans une autre gamme de bâtiment de grande hauteur. Dans l'algorithme ce paramètre est noté *Nombre d'étages* ou *ne*.

Ensuite, nous établissons le nombre de modules le long de la longueur et de la largeur du bâtiment comme deuxième et troisième paramètres. Ceux-ci déterminent indirectement le nombre de colonnes présentes dans la structure, ainsi que sa géométrie générale, influençant si le bâtiment présentera une forme allongée ou plus carrée. Nous avons fixé une limite minimale de trois modules pour la longueur et la largeur, pour éviter encore une fois d'entrer dans la catégorie des bâtiments standards. De plus, nous avons établi que la longueur du bâtiment devrait toujours être supérieure ou égale à la largeur. Pour restreindre la complexité du modèle, et éviter la considération de bâtiments excessivement longs avec de multiples noyaux centraux, nous avons fixé une limite supérieure de quinze modules pour la longueur et dix modules pour la largeur. Dans l'algorithme ces paramètres sont notés *L* pour le nombre de module en longueur et *l* pour celui en largeur.

Le quatrième paramètre que nous avons défini concerne la longueur de la trame des modules. Les bâtiments que nous étudions sont destinés à des usages tels que des bureaux ou autres espaces de travail. Pour permettre une flexibilité dans l'aménagement de ces espaces, nous avons fixé une longueur de trame minimale de 4 mètres. De plus, en tenant compte de la grande taille des bâtiments et de la structure poutre-colonne, des portées plus courtes ne sont généralement pas envisagées. En termes de longueur maximale, nous avons établi une limite de 7 mètres, qui est déjà une valeur considérable, surtout pour des dalles coulées en place ou pré-dalles. Il est courant de considérer l'utilisation de hourdis pour des portées à partir de 6 mètres. Dans l'algorithme ce paramètre est noté *t*.

Le dernier paramètre "géométrique" que nous prenons en compte dans notre modèle est la hauteur de l'étage. Nous avons déterminé qu'elle peut varier de 3 à 4,5 mètres. Techniquement, une hauteur inférieure à 3 mètres ne laisserait pas assez de hauteur sous plafond une fois l'épaisseur des dalles, les finitions et les conduites techniques déduites. Quant à la limite supérieure, nous considérons qu'une hauteur supérieure à 4,5 mètres serait excessive compte tenu de l'usage prévu du bâtiment, 4,5 mètres représentant déjà une limite assez élevée. Dans l'algorithme ce paramètre est noté *hauteur d'étage*.

Figure 25 : Paramètres d'entrées du modèle Grasshopper

En plus de ces paramètres géométriques, notre modèle comprend également des paramètres de dimensionnement, spécifiquement les charges appliquées aux planchers et les résistances du béton.

Concernant les charges, nous estimons les charges permanentes à $g = 1,5 \text{ kN/m}^2$, censées représenter les finitions, les équipements spéciaux ou le mobilier du bâtiment. Il s'agit d'une valeur relativement élevée établie pour se situer du côté de la sécurité. Les charges variables, ici essentiellement les charges d'exploitation, sont fixées à $q = 3 \text{ kN/m}^2$, une valeur tirée du cours « LGCIV2011 Projet de bâtiment » qui se réfère à l'Eurocode 1 partie 1 définissant les charges d'exploitation de bureaux. Bien que ces charges puissent être modifiées dans notre modèle, elles resteront constantes pour les analyses réalisées dans ce travail. Dans l'algorithme ces paramètres sont notés g et q .

Enfin, le dernier paramètre concerne la classe de béton utilisée pour les différents éléments. Nous avons établi deux paramètres distincts pour cela : l'un pour la résistance du béton des dalles et poutres, l'autre pour les colonnes et les voiles. Cette distinction se justifie par le fait que, dans la pratique, les poutres et dalles sont coulées en une seule phase, tandis que les colonnes et voiles le sont en une autre. Cela nous donne la possibilité de modifier ces résistances indépendamment, permettant ainsi de comparer différentes configurations. Dans l'algorithme, ces paramètres sont notés $f_{ck,dalles,poutres}$ et $f_{ck,colonnes,voiles}$.

4.1.1.2 Voiles de contreventement - hypothèses

Pour ce qui est des voiles de contreventement, ils sont arrangés de la même manière que pour le bâtiment du cas spécifique (voir 3.2.4.1 pour plus de détails), c'est-à-dire deux voiles dans deux coins opposés du bâtiment. Toutefois, une condition est appliquée à la longueur du bâtiment : si elle excède 40 mètres, nous positionnons deux noyaux de contreventement composés de quatre voiles chacun aux coins du bâtiment (voir Figure 26). En effet, pour des bâtiments d'une telle longueur, un joint de dilatation est nécessaire, ce qui compromettrait un contreventement adéquat et suffisant des deux parties de la structure.

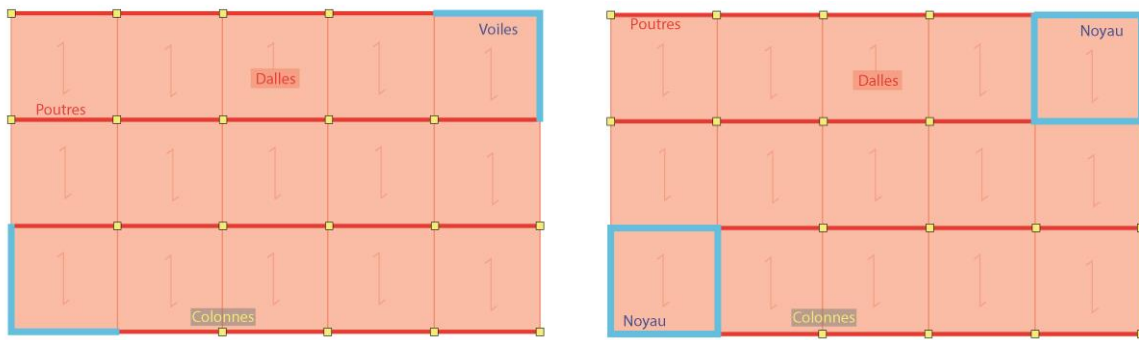


Figure 26 : Schéma du positionnement des voiles de contreventement pour moins de 40 m (à gauche) et pour plus de 40 m (à droite)

4.2 Algorithme - Grasshopper

L'algorithme se compose de quatre parties principales : les paramètres (en jaune sur la Figure 27), la géométrie du bâtiment (en orange sur la Figure 27), le dimensionnement des éléments (en bleu sur la Figure 27) et l'analyse de cycle de vie (en vert sur la Figure 27).

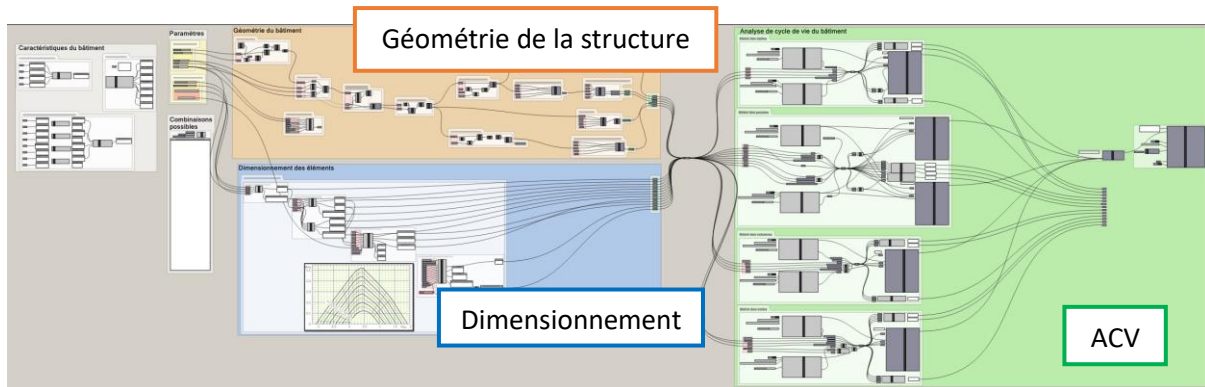


Figure 27 : Algorithme pour générer une structure en béton armé sur Grasshopper

L'algorithme fonctionne de la manière suivante : les paramètres d'entrée sont fournis à deux blocs distincts, l'un dédié à la formation de la géométrie du bâtiment et l'autre au dimensionnement des éléments. Le premier bloc génère la structure "filare" du bâtiment, tandis que le second détermine les dimensions de chaque élément. Cette structure filaire et ses dimensions sont ensuite acheminées vers le bloc d'ACV. C'est ici que EPiC est mobilisé pour fusionner ces deux ensembles de données, générant un métré de la structure et calculant son impact environnemental.

Dans la suite de cette section nous allons décrire les méthodologies suivies pour obtenir les résultats souhaités (structure filaire du bâtiment, dimensions des éléments, métré du bâtiment). Nous ne rentrerons pas trop en profondeur dans les détails du code mais vous pourrez retrouver les cellules et leur fonction en annexe 7.3. L'algorithme Grasshopper vous sera fourni en parallèle de ce travail.

4.2.1 Partie géométrie de la structure - Grasshopper

Tout d'abord, il est à noter que chaque partie de l'algorithme est composée de cellules qui ont chacune une fonction et permettent de fournir les informations nécessaires à la suivante. Dans chaque cellule, les paramètres d'entrée sont sur fond rosé. Lorsqu'une cellule fournit une donnée/composante finale, celle-ci est sur fond vert clair comme vous pouvez voir à la Figure 28.

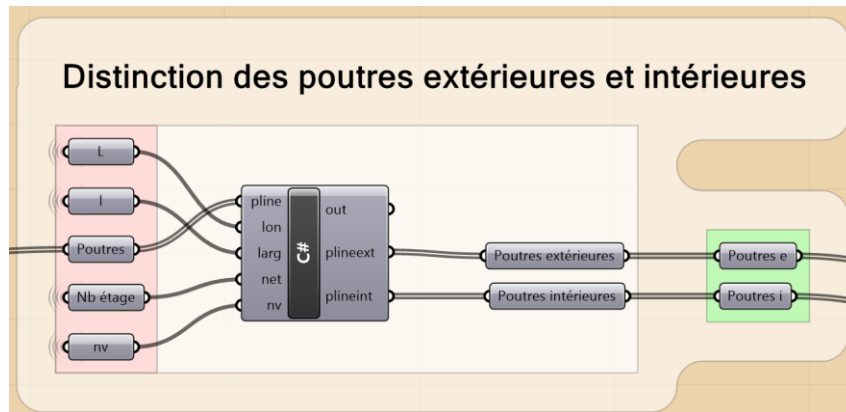


Figure 28 : Représentation d'une cellule qui prend des paramètres d'entrée (sur fond rosé) et fournit les lignes représentant les poutres (sur fond vert)

Ainsi, dans cette partie qui génère la structure filaire du bâtiment, nous partons des paramètres initiaux pour obtenir les lignes ou surfaces représentant les éléments de la structure. Vous retrouvez la structure globale de la partie géométrie à la Figure 29. Vous observez les 4 cellules finales qui nous donnent les dalles, les poutres, les voiles et les colonnes. Les poutres et colonnes sont représentées par des lignes, tandis que nous obtenons des surfaces pour représenter les dalles et voiles.

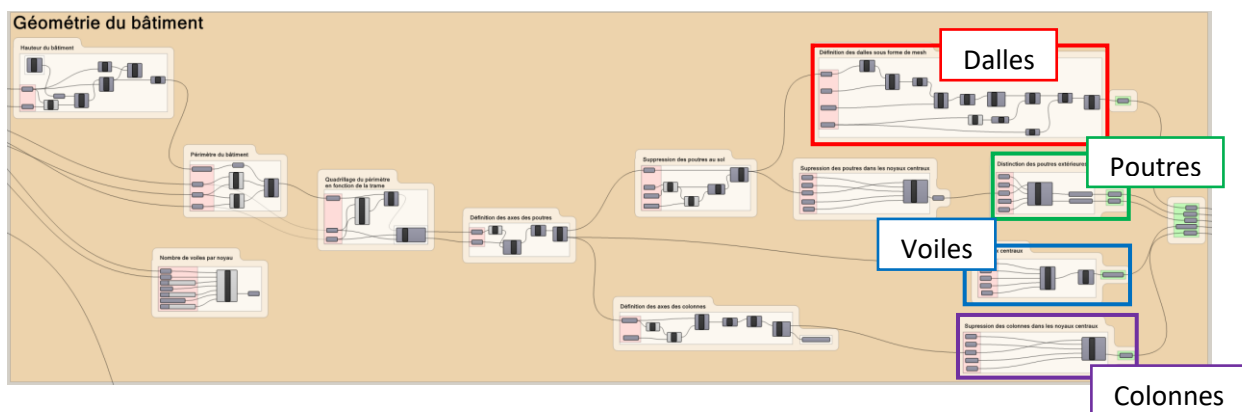
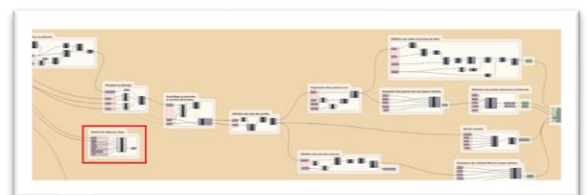


Figure 29 : Vue d'ensemble du bloc de la géométrie du bâtiment

4.2.1.1 Nombre de voiles par noyau

La partie géométrie du bâtiment débute avec la détermination du nombre de voiles dans les noyaux centraux en fonction du bâtiment. Comme expliqué à la section d'avant 4.1.1.2, nous avons deux voiles de part et d'autre de la géométrie du bâtiment sauf pour les bâtiments supérieurs à une longueur de 40 mètres. Cette première cellule détermine donc ce nombre de voiles par noyaux centraux à savoir $nv = 2$ ou 4 . Cette valeur nv sera utile dans la suite



de l'algorithme notamment pour dimensionner les voiles ou pour déterminer le nombre de poutres et de colonnes à supprimer (vu que les voiles endosseront le rôle de certains de ces éléments).

4.2.1.2 Maillage du périmètre du bâtiment

Ici, la partie géométrie du bâtiment débute en même tant que la détermination du nombre de voiles par le maillage du périmètre du bâtiment. Pour ce faire, une première cellule nommée *hauteur du bâtiment* crée autant de plans de construction que de nombre d'étages, tous étant superposés et espacés de la hauteur correspondant à la hauteur d'étage. Ensuite, vient la cellule *périmètre du bâtiment* qui, elle, crée sur chaque plan de construction un périmètre rectangulaire correspondant à celui du bâtiment. Enfin, la cellule *quadrillage du périmètre en fonction de la trame*, comme son nom l'indique, crée un maillage correspondant au nombre de module qu'il y a en longueur et en largeur avec la longueur de trame indiquée. Nous obtenons ainsi les maillages à la Figure 30.

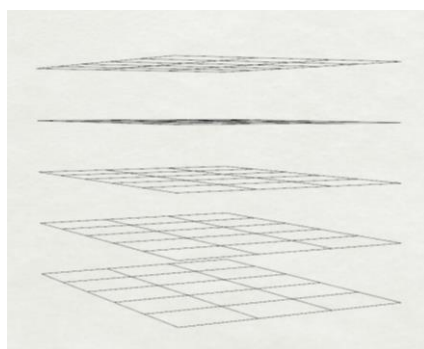
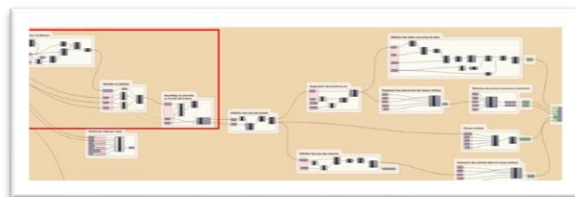
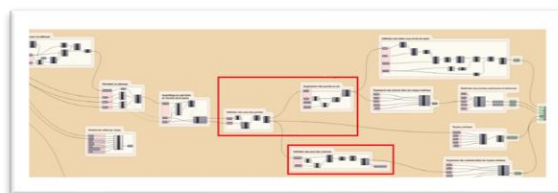


Figure 30 : Maillage du périmètre du bâtiment pour chaque étage

4.2.1.3 Définition des poutres et colonnes

Ensuite, après le maillage des différents étages, nous déterminons, dans la cellule *définition des axes des poutres*, les segments de lignes représentant les poutres et nous les isolons. Ensuite, ces segments de lignes vont en paramètre d'entrée de deux autres cellules : *suppression des poutres au sol* et *définition des axes des colonnes*. La première cellule retire de la liste de poutres existantes, les poutres qui ont été définies au sol. La seconde cellule relie les extrémités des poutres avec les extrémités des poutres de l'étage du dessous pour créer les lignes représentant les colonnes. Nous obtenons ainsi les axes des colonnes et poutres à la Figure 31.



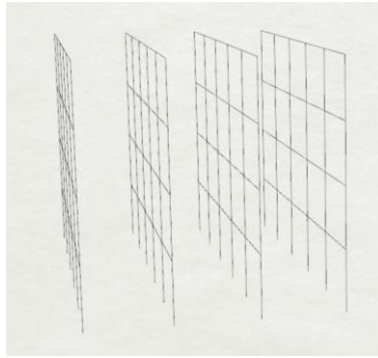


Figure 31 : Définition des poutres et colonnes dans la géométrie filaire du bâtiment

4.2.1.4 Suppression des poutres et colonnes superposées aux voiles de contreventement

Ici, les cellules *suppression des poutres dans les noyaux centraux* et *suppression des colonnes dans les noyaux centraux* retirent les poutres et les colonnes, qui sont comprises dans les voiles de contreventement situés aux deux coins du bâtiment, de leur liste initiale respective. Ceci est réalisé à l'aide de petits codes en C# que vous pourrez également retrouver en annexe. Enfin pour la dernière cellule *distinction des poutres extérieures et intérieures* scinde la liste contenant les lignes des poutres en deux avec d'une part les poutres extérieures et d'autre part les poutres intérieures. Nous obtenons donc les lignes des poutres et colonnes sans celles qui font doublons avec les voiles de contreventement à la Figure 32.

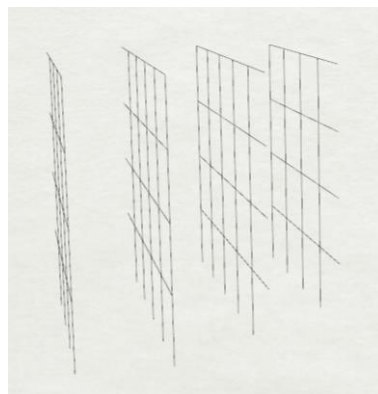
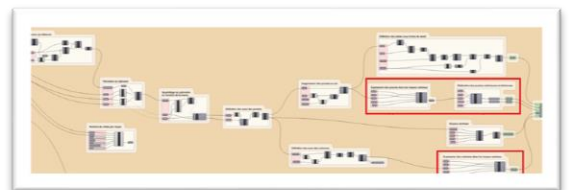
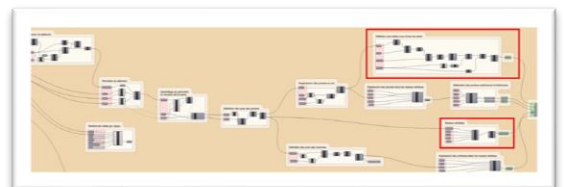


Figure 32 : Suppression des poutres et colonnes superposées avec les voiles de contreventement

4.2.1.5 Définition des dalles et noyaux centraux

Ces deux cellules créent les surfaces des voiles et dalles sur base des lignes de la cellule *définition des axes des poutres*. La première cellule *définition des dalles sous forme de mesh* nous donne donc la liste contenant toutes les surfaces des dalles. Et la seconde cellule *noyaux centraux* contient aussi un code en C# pour situer et créer les voiles dans la structure du bâtiment. Nous obtenons donc les dalles à gauche de la Figure 33 et les voiles de contreventement à droite de cette dernière.



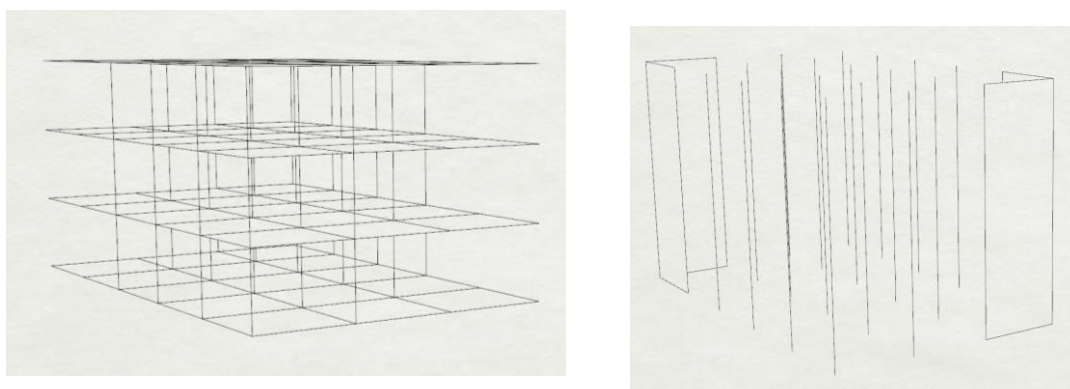


Figure 33 : Définition des dalles de la structure (à gauche) et des voiles de contreventement (à droite)

Nous obtenons au bout de toutes ces étapes, une série de listes de lignes et de surfaces correspondant aux éléments de la structure. La géométrie filaire assemblée nous donne un premier aperçu du bâtiment à la Figure 34.

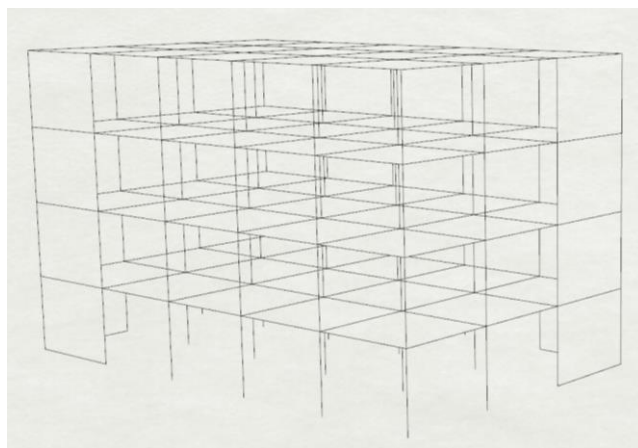


Figure 34 : Géométrie filaire de la structure du bâtiment

4.2.2 Partie dimensionnement - Grasshopper

Nous dimensionnons les éléments dans l'ordre logique des choses : 1 : Les dalles, 2 : Les poutres, 3 : Les colonnes et 4 : Les voiles. Effectivement, nous devons avoir les dimensions des éléments précédents pour évaluer les efforts repris par l'élément porteur. Il y a juste les voiles qui n'ont pas besoin des dimensions des colonnes pour être calculés. Vous trouvez l'allure général du bloc de dimensionnement de l'algorithme à la Figure 35. Pour le dimensionnement, nous avons utilisé des cellules codées en C#, vous retrouverez les codes de ces cellules en annexe 7.3.2.

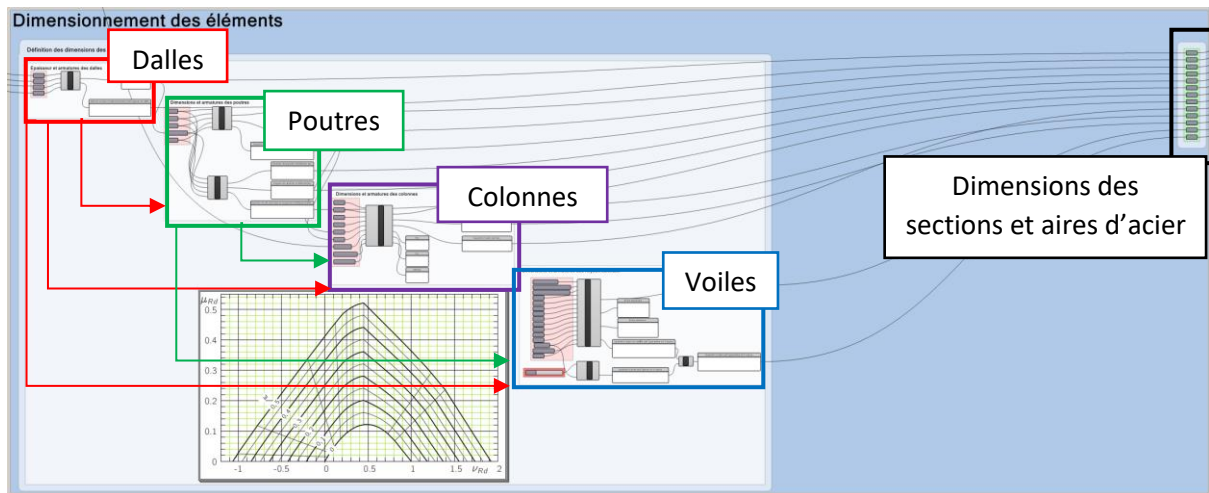


Figure 35 : Vue d'ensemble de la partie dimensionnement de l'algorithme Grasshopper

4.2.2.1 Dimensionnement des dalles – Grasshopper

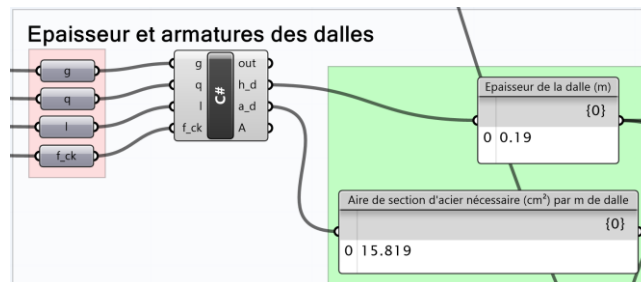


Figure 36 : Cellule de dimensionnement des dalles

La Figure 36 illustre la cellule dédiée au dimensionnement des dalles, qui intègre en tant que paramètres d'entrée les charges permanentes et variables g et q , la longueur de trame l et la résistance du béton pour les dalles f_{ck} .

Cette "boîte" écrite en C#, dimensionne les dalles suivant la même méthode utilisée pour le cas spécifique mentionné en section 3.2.1.2.

Pour rappel, le dimensionnement des dalles se fait en les considérant isostatiques et soumises à la flexion simple. Les vérifications de la résistance à la flexion (à l'ELU) et de la flèche (à l'ELS) sont faites. À l'ELU, les charges g et q sont pondérées avec des coefficients de 1,5 pour q et 1,35 pour g , tandis qu'à l'ELS elles sont pondérées avec un coefficient de 1. Elles ont une portée de longueur l et une résistance de béton f_{ck} .

Dans le but de déterminer l'aire effective de l'acier pour les armatures longitudinales dans la section, nous devons théoriquement identifier la combinaison appropriée du nombre d'armatures et de leurs diamètres respectifs qui correspond à l'aire calculée à travers le dimensionnement (en optant pour la limite supérieure de la valeur). Néanmoins, dans notre algorithme, nous adoptons une approximation pour prendre en compte cette valeur ajustée à la hausse. Nous augmentons d'une unité et arrondissons la valeur de l'aire d'acier calculée, exprimée en $[cm^2/m^2]$.

Les données de sortie de cette cellule sont l'épaisseur de la dalle h_d (en mètres) et la quantité d'armature par m^2 (en cm^2/m^2), cette dernière incluant les armatures longitudinales, transversales technologiques et le treillis 5x150x150 pour la fissuration en face supérieure de la dalle.

4.2.2.2 Dimensionnement des poutres - Grasshopper

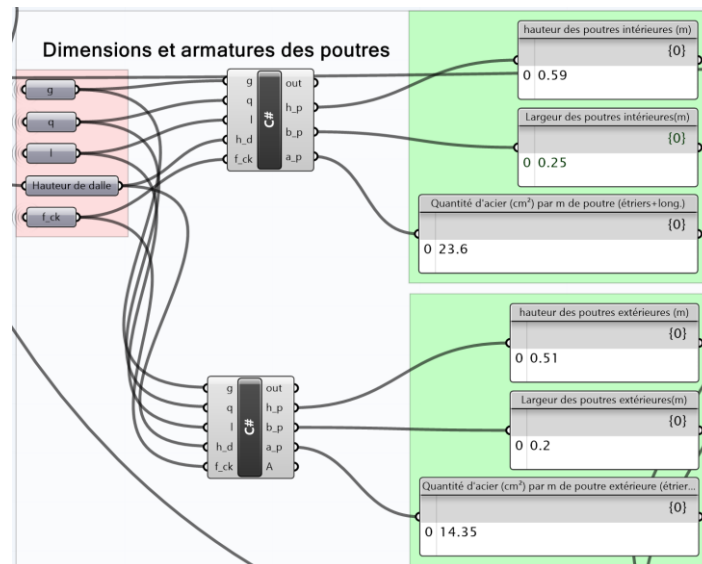


Figure 37 : Cellule de dimensionnement des poutres

La Figure 37 présente le processus de dimensionnement des poutres, celle-ci reprend les mêmes paramètres que précédemment, en ajoutant toutefois la hauteur de la dalle. Cette cellule est divisée en deux sections pour traiter séparément les poutres intérieures et extérieures. Les poutres extérieures p_e , situées en façade du bâtiment, subissent la moitié de la charge des poutres intérieures p_i , ces dernières étant situées à l'intérieur du bâtiment.

Le code C# respecte la même méthodologie de dimensionnement que pour le cas spécifique mentionné en section 3.2.2.2 .

Pour rappel, toutes ces poutres sont considérées comme isostatiques et en flexion simple. Elles ont la même portée que les dalles l et la même résistance de béton f_{ck} . Les p_e reprennent l'équivalent d'une demi dalle tandis que les p_i reprennent une dalle entière. Les vérifications de la résistance à la flexion (à l'ELU) et de la flèche (à l'ELS) sont faites. À l'ELU, les charges sont pondérées comme suit : q avec un coefficient de 1,5 et 1,35 pour g et le poids de la dalle, tandis qu'à l'ELS elles sont pondérées avec un coefficient de 1.

Encore un fois, dans le but de déterminer l'aire effective de l'acier pour les armatures longitudinales dans la section, nous devons théoriquement identifier la combinaison appropriée du nombre d'armatures et leurs diamètres, qui correspond à l'aire calculée lors du dimensionnement (en optant pour la limite supérieure de la valeur). Néanmoins, dans notre algorithme, nous adoptons une approximation pour prendre en compte cette valeur ajustée à la hausse. Nous augmentons d'une unité et arrondissons la valeur de l'aire d'acier calculée, exprimée en $[cm^2/m]$.

Les données en sortie de cette cellule sont la hauteur h_{px} et la largeur de poutre b_{px} (en mètres), et la quantité d'armature par mètre courant a_{px} (en cm^2/m) pour les éléments x : poutres intérieures i

ou extérieures e . Cette quantité d'armature comprend les armatures longitudinales ainsi que les étriers.

4.2.2.3 Dimensionnement des colonnes - Grasshopper

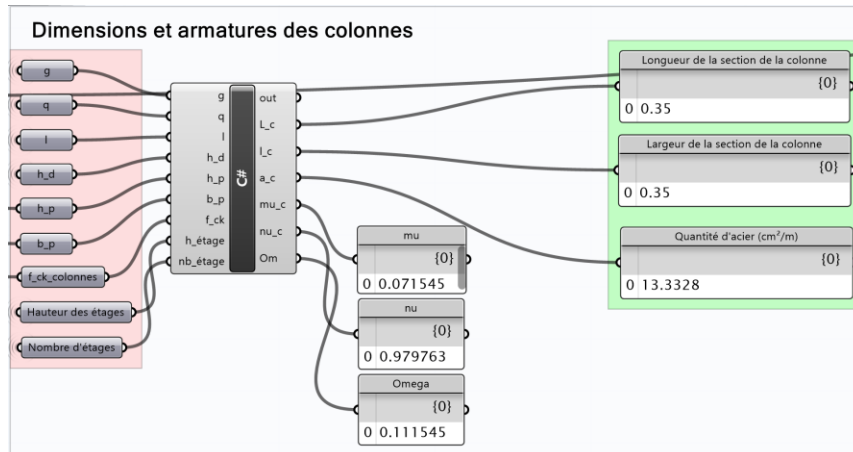


Figure 38 : Cellule de dimensionnement des colonnes

Comme illustré à la Figure 38, le dimensionnement des colonnes fait intervenir un ensemble de paramètres plus important que précédemment. Ceux-ci englobent les dimensions des poutres, la hauteur d'étage et le nombre d'étages, en plus des paramètres utilisés pour les poutres. Pour plus de précision, nous utilisons les dimensions des poutres intérieures afin de dimensionner les colonnes dans le cas de charge le plus critique.

Le code C# suit la même méthodologie de dimensionnement que pour le cas spécifique mentionné en section 3.2.3.2 .

Pour rappel, nous définissons initialement la section de colonne carrée en compression simple. Par la suite, les colonnes sont envisagées comme étant en flexion composée avec un moment découlant du cas de charge asymétrique (voir 3.2.3.2.3). Une vérification de la stabilité au flambement est également réalisée. Si les colonnes sont susceptibles d'être soumises aux effets du second ordre, le moment qui en résulte est ajouté au moment découlant du cas de charge asymétrique pour la vérification à la flexion composée.

Pour automatiser l'algorithme, nous estimons approximativement la valeur de ω , le ratio mécanique d'armature, en utilisant les valeurs trouvées dans le diagramme d'interaction (Figure 14 : Diagramme d'interactions pour les classe de béton C12 à C50 et l'acier BE500 S considérant une section symétrique rectangulaire). En effet, en considérant que la valeur du moment réduit μ varie et que celle de l'effort normal v est fixée à 1, nous obtenons une valeur approchée de ω (Figure 39). Nous pouvons supposer que $v \approx 1$ car nous dimensionnons l'aire de la section, à la compression simple, ce qui implique que :

$$\frac{N_{Ed}}{b_c^2} \approx f_{cd}^* \text{ et donc que } v = \frac{N_{Ed}}{b_c^2 \cdot f_{cd}^*} \approx 1$$

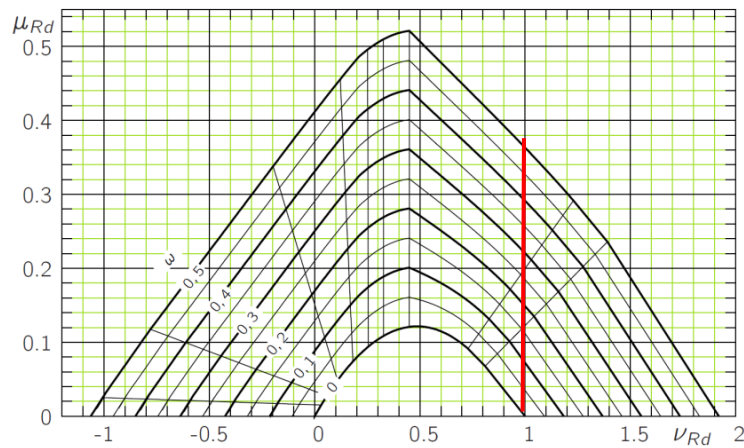


Figure 39 : Valeur de ω en fonction de $\nu_{Rd} = 1$ et μ_{Rd} via le diagramme d'interaction Figure 14

Une fois la valeur de ω trouvée nous pouvons déterminer l'aire de la section d'armature longitudinale des colonnes pour reprendre le moment.

Pour déterminer l'aire effective de l'acier pour les armatures longitudinales dans la section, nous devons théoriquement identifier la combinaison appropriée du nombre d'armatures et de leurs diamètres respectifs qui correspond à l'aire calculée à travers le dimensionnement (en optant pour la limite supérieure de la valeur). Néanmoins, dans notre algorithme, nous adoptons une approximation pour prendre en compte cette valeur ajustée à la hausse. Nous augmentons d'une unité et arrondissons la valeur de l'aire d'acier calculée, exprimée en $[cm^2/m]$.

Les données en sortie de cette cellule sont la largeur b_c de la section de colonne et la quantité d'armature par mètre courant a_c (en cm^2/m). Cette quantité d'armature comprend les armatures longitudinales ainsi que des étriers, des $\phi 6$ tous les 25 cm.

4.2.2.4 Dimensionnement des voiles - Grasshopper

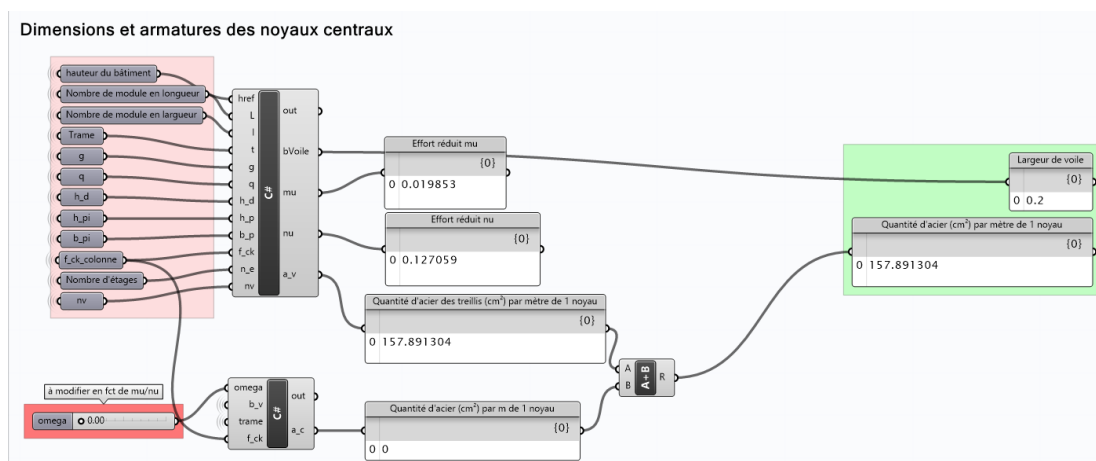


Figure 40 : Cellule de dimensionnement des voiles de contreventement

Comme vous pouvez voir dans la Figure 40, le processus de dimensionnement des voiles implique un plus grand nombre de paramètres que les étapes précédentes. Ces paramètres comprennent le

nombre de voiles par noyau nv , la hauteur totale du bâtiment, le nombre de modules en longueur et en largeur du bâtiment, ainsi que les paramètres déjà utilisés pour les colonnes.

Le code C# adhère à la même approche de dimensionnement que celle mentionnée pour le cas spécifique dans la section 3.2.4.2 .

Il est important de rappeler que les voiles ont une hauteur de section $h_v = l$ (où l est la longueur de trame) constante pour faciliter leur intégration dans la géométrie du bâtiment. Leur largeur initiale b_v est de 0,2m, représentant le minimum mis en œuvre en pratique. Ils sont ensuite dimensionnés avec une charge de vent minimale de $q_v = 1kN/m^2$. Les paramètres tels que la hauteur totale du bâtiment, le nombre de modules en longueur et en largeur et la longueur de trame l servent à calculer la surface de la façade exposée aux forces du vent. Nous vérifions donc que le voile peut résister à la flexion composée, résultant du moment dû au vent et de l'effort normal résultant des dalles et poutres qu'il supporte.

Nous obtenons ainsi les efforts réduits et nous devons déterminer le ω correspondant. Ici, nous ne pouvons pas estimer automatiquement cette valeur (comme pour les colonnes 4.2.2.3) car les deux efforts réduits varient. Il serait possible de déterminer automatiquement la valeur de ω en incorporant les formules analytiques correspondant au diagramme d'interaction (*Figure 14 : Diagramme d'interactions pour les classe de béton C12 à C50 et l'acier BE500 S considérant une section symétrique rectangulaire*). Cependant, cela s'avère assez complexe à mettre en place, nous décidons donc de déterminer manuellement la valeur de ω dans l'algorithme en fonction des efforts réduits trouvés. C'est un point d'amélioration potentiel pour ce travail.

Une fois la valeur de ω trouvée, nous pouvons déterminer la surface des armatures longitudinale des colonnes pour résister au moment. Nous utiliserons des treillis 8x200x200 en face supérieure et inférieure du voile ainsi que des étriers ϕ 6 tous les 20 cm pour la fissuration et pour garantir une bonne répartition des efforts.

Ici aussi, pour déterminer l'aire effective de l'acier pour les armatures longitudinales dans la section, nous devons théoriquement identifier la combinaison appropriée du nombre d'armatures et de leurs diamètres respectifs qui correspond à l'aire calculée à travers le dimensionnement (en optant pour la limite supérieure de la valeur). Néanmoins, dans notre algorithme, nous adoptons une approximation pour prendre en compte cette valeur ajustée à la hausse. Nous augmentons d'une unité et arrondissons la valeur de l'aire d'acier calculée, exprimée en $[cm^2/m^2]$.

Les résultats générés par cette cellule incluent la largeur b_v de la section du voile et la quantité d'armature par mètre linéaire de noyau a_n (en cm^2/m). En d'autres termes, il s'agit de la quantité d'armatures que l'on trouve sur la surface $nv \cdot (l \cdot b_v)$, cette valeur doit donc être multipliée par la hauteur totale du bâtiment pour obtenir la quantité totale d'armatures dans un noyau. Cette quantité d'armature englobe les armatures longitudinales, les étriers et les deux treillis situés à la face supérieure et inférieure du voile.

4.2.3 Partie analyse de cycle de vie - Grasshopper

Une bonne partie des cellules présentes dans cette partie de l'algorithme sont issues de l'environnement EPiC, nous les détaillerons dans la suite de cette section.

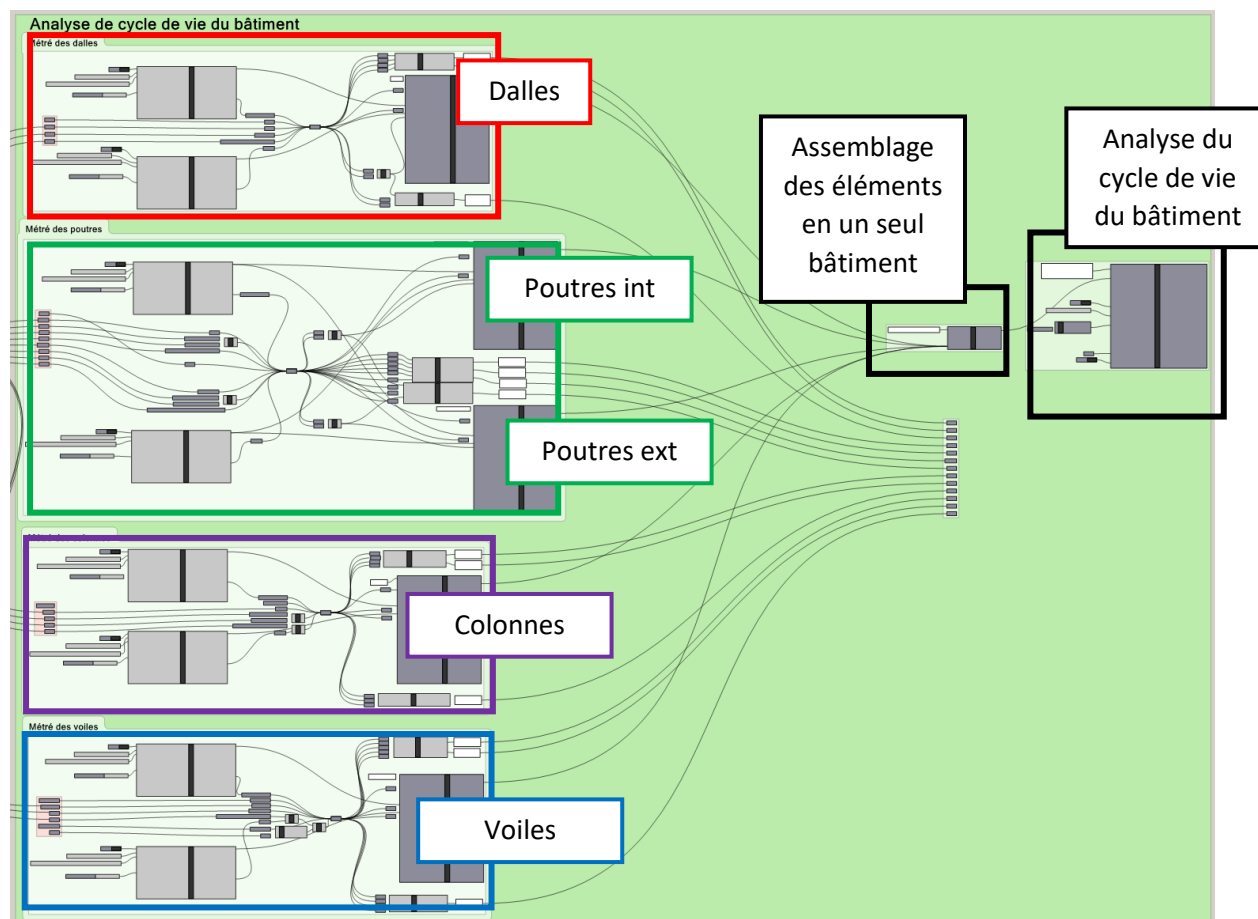


Figure 41 : Vue d'ensemble du bloc générant l'analyse de cycle de vie du bâtiment

Nous pouvons observer le cheminement de la partie de l'algorithme qui génère l'analyse de cycle de vie du bâtiment à la Figure 41. Les différents éléments sont créés en combinant leur géométrie avec leurs dimensions. Ensuite, ceux-ci sont assemblés pour créer le bâtiment et enfin, l'analyse de cycle de vie est générée.

4.2.3.1 Création d'un élément – EPiC

Ces cellules de « création » des éléments prennent pour paramètres : les éléments géométriques obtenus dans le premier bloc de l'algorithme (en orange sur la Figure 27 : Algorithme pour générer une structure en béton armé sur Grasshopper), les dimensions et quantité d'acier des sections obtenues dans le deuxième bloc de dimensionnement (en bleu sur la Figure 27) et certains paramètres initiaux comme la longueur de trame.

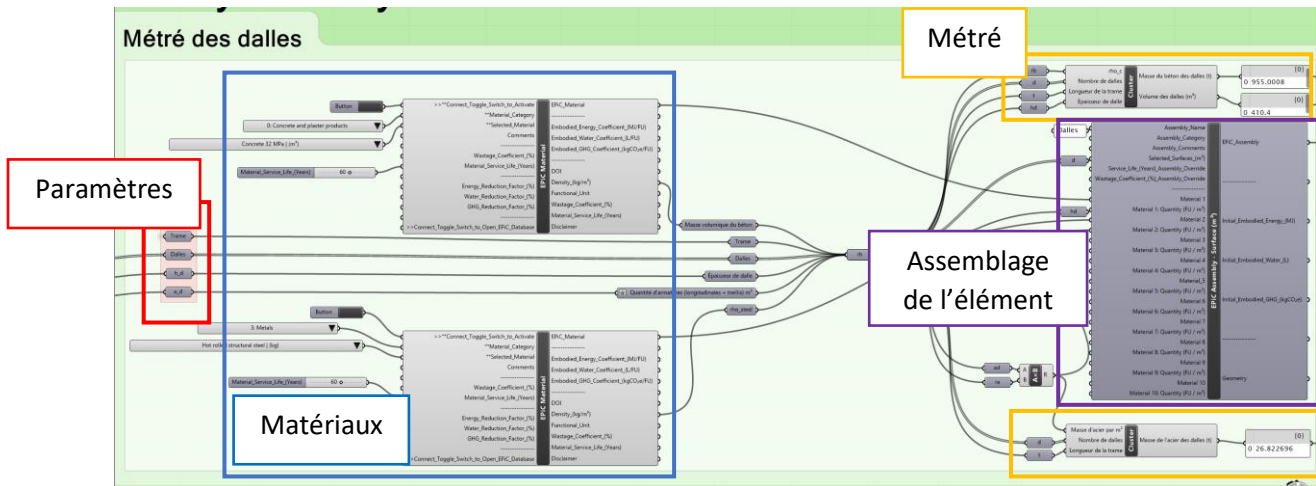


Figure 42 : Cellule de "création" des éléments, ici les dalles

4.2.3.1.1 Matériaux des composants

Le choix des matériaux suit ensuite, avec des boîtes provenant des éléments Grasshopper de EPiC. Ces boîtes permettent de sélectionner directement les matériaux dans la base de données EPiC. Elle permettent aussi d'obtenir les caractéristiques associées, comme la masse volumique des matériaux ou les indicateurs environnementaux EPiC de ces matériaux. Un coefficient de déchet associé au matériau peut également être connecté, ce qui indique un pourcentage supplémentaire de matériau à prendre en compte dans l'évaluation des impacts. Par exemple, pour le béton, EPiC définit par défaut une valeur de 10% supplémentaire comme coefficient de déchets, ce qui est une estimation basée sur les déchets produits sur le chantier. La durée de vie des matériaux peut également être définie dans les paramètres d'entrée de la boîte.

4.2.3.1.2 Assemblage des composants

Après avoir défini tous les matériaux : dans notre cas de structure en béton armé nous avons une boîte pour le béton et une boîte pour l'acier. Nous pouvons relier le tout à la boîte d'assemblage de l'élément. En fonction de l'élément à créer il faut choisir une boîte avec une unité fonctionnelle adéquate. On fixe en paramètre les matériaux sélectionnés, les éléments géométriques correspondant et les dimensions de ceux-ci en fonction de l'unité fonctionnelle de l'élément. Il est également possible de définir la longévité de l'élément ainsi que son nom.

Dans notre exemple de dalle, nous avons une boîte dont l'unité fonctionnelle est le m^2 vu que nous connectons des éléments de surfaces. Nous connectons d'abord les surfaces des dalles définies dans le premier bloc *géométrie du bâtiment* 4.2.1. Ensuite nous connectons un premier matériau correspondant au béton « C32 »²⁴ au niveau du matériau 1 de la boîte d'assemblage. Nous connectons la hauteur de dalle correspondant à h_d m^3 de béton par m^2 de l'élément. Pour le matériau 2, nous connectons l'acier « Hot rolled structural steel » ainsi que la quantité d'acier (en kg vu que c'est l'unité du matériau en question) pour les dalles au m^2 . Une petite conversion est faite pour passer de l'aire d'armature a_d exprimée en cm^2/m^2 à la masse d'acier $m_{a,d}$ exprimée en kg/m^2 , avec la masse volumique de cet acier définie à $\rho_s = 7850 \text{ kg/m}^3$ dans EPiC,

²⁴ (Crawford R.H., Stephan A., Prideaux, F., Bontinck P-A., 2020)

$$m_{a,d} = \rho_s \cdot a_d \cdot 10^4$$

Celle-ci est réalisée dans une boîte avant d’être connectée à l’assemblage de l’élément.

Les métré en jaune sur la Figure 42 sont des boîtes pour calculer les quantités d’acier et de béton et les faire apparaître au début de l’algorithme. Elles ne servent pas à proprement parler, elles sont simplement utiles pour informer l’utilisateur de l’algorithme et qu’il ait directement le métré du bâtiment lorsqu’il modifie les paramètres d’entrée de l’algorithme.

4.2.3.2 Assemblage et analyse de cycle de vie du bâtiment - EPiC

Une fois tous les éléments définis, ils sont assemblés entre eux pour former un bâtiment. Ce bâtiment est connecté à la boîte d’analyse de EPiC qui va évaluer le bâtiment avec les indicateurs d’impacts environnementaux d’EPiC. Ces valeurs sont mises sous forme de graphe directement dans Rhino 3D pour que l’utilisateur ait un aperçu direct de l’impact de son bâtiment (voir Figure 43).

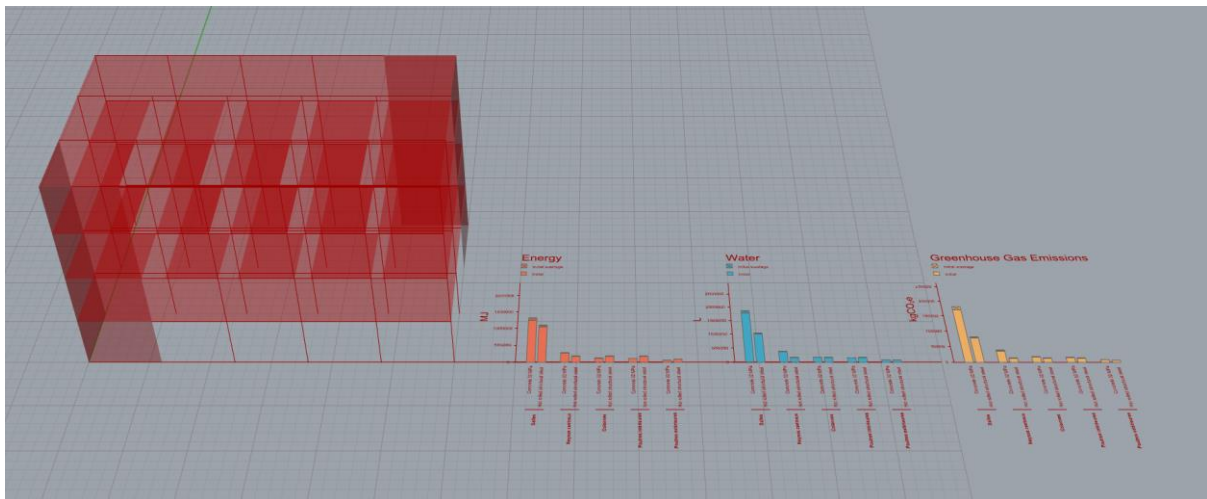


Figure 43 : Résultats de l'analyse de cycle de vie sur Grasshopper

Le graphe représentant l’impact de la consommation d’énergie est en orange, celui sur la consommation d’eau est en bleu et celui sur les émissions de gaz à effet de serre est en jaune. Pour chaque indicateur nous pouvons afficher l’impact total du bâtiment, l’impact par matériaux, l’impact par élément ou encore l’impact par éléments et leurs matériaux comme vous pouvez voir à la Figure 44.

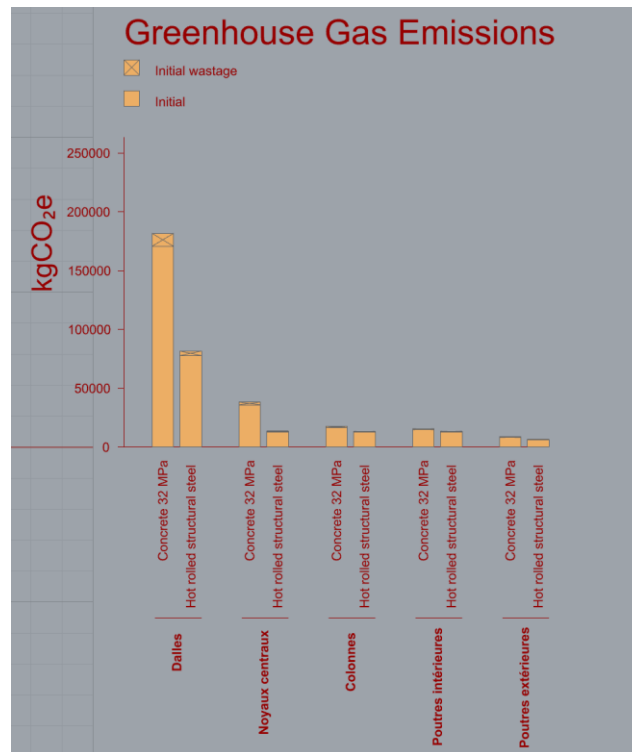


Figure 44 : Graphe de l'impact des émissions de gaz à effet de serre dû aux éléments et leurs matériaux

Nous pouvons également sortir un rapport Excel sur l'évaluation du bâtiment avec tous les impact environnementaux par élément et par matériaux et aussi les quantité de matériau totales par élément.

5 Analyses de variantes de structure pour une même SPU

Dans cette section, nous allons effectuer des analyses du cycle de vie pour différentes variantes de structure. Comme mentionné dans la conclusion intermédiaire du cas spécifique 3.4, ces analyses se concentrent sur la phase de production des matériaux (A1-A3, voir section 2.1.1) ainsi que sur une partie de la phase d'utilisation du bâtiment (B6). En effet, lors de l'évaluation du cycle de vie d'une structure de bâtiment, ces deux phases sont les plus significatives en termes d'émissions de gaz à effet de serre (GES). Les autres étapes du cycle de vie ont un impact relativement mineur sur cet indicateur et/ou sont proportionnelles à la surface de plancher utile du bâtiment. Par conséquent, elles ne sont pas particulièrement pertinentes pour la comparaison des différentes structures, car leur influence sur les résultats sera minime.

5.1 Hypothèses des analyses de variantes de structure pour une même SPU

Les analyses dans cette partie sont donc faites sur base des étapes de production des matériaux (A1-A3) et celle de consommation d'énergie (B6.2) liée aux pertes de chaleur par transmission.

Analyse de la production des éléments

Pour l'analyse de l'étape de production des matériaux nous utiliseront l'algorithme qui a été détaillé dans la partie 4.

Un détail, que nous n'avons pas pris en compte dans le cas spécifique, est la quantité de matériaux gaspillés lors de la mise en place. Avec Totem ces déchets qui sont dus à la mise en place sur chantier sont répertoriés et quantifiés dans l'analyse de cette étape spécifique (A5). Il n'y avait donc pas d'intérêt de l'introduire dans la comparaison entre les résultats de l'ACV d'EPiC et ceux de Totem étant donné que nous évaluons seulement les étapes de production à ce moment-là (voir 3.3.3). Nous ne pouvions donc pas le considérer dans les résultats d'EPiC alors qu'il n'était pas compris dans ceux de Totem.

Maintenant nous allons comparer les structures entre elles avec les données d'EPiC. Il serait donc judicieux d'inclure les quantités gaspillées. Elles sont directement proportionnelles au volume de matière que nous utilisons et dès lors nous accentuerons les différences entre les métrés d'une structure à l'autre. EPiC considère 10% de perte sur chantier pour le béton et 5% de perte pour l'acier.

Cependant le métré de la structure est surévalué car les éléments sont considérés dans leur intégralité et ils se superposent donc les uns aux autres : les dalles sont comprises dans les poutres qui, elles, le sont dans les colonnes la matière est donc comptabilisée 2 voir 3 fois à certains endroits. Le calcul de ce surplus a été fait sur plusieurs structures il équivaut entre 3,5 et 4% du volume total de chacune d'entre elles. Nous considérons donc une moyenne de 3,75% de surplus de béton et nous imposons donc dans notre modèle un gaspillage de 6,25% pour celui-ci. Ainsi nous atteignons les 10% de gaspillage préconisé par EPiC. Pour la quantité d'acier ces doublons ne sont pas considérés comme étant du surplus car les armatures des éléments doivent se superposer pour avoir une bonne continuité des efforts entre les éléments. Nous appliquons donc l'intégralité des 5% de gaspillage pour ce matériau.

Aussi nous nous concentrerons seulement sur la production des éléments structurels qui sont repris et dimensionnés dans notre algorithme. Tous les autres éléments : d'isolation, de façade, etc sont négligés dans les analyses qui suivent.

Analyse de l'utilisation du bâtiment

Comme nous avons observé l'importance de l'utilisation de l'énergie durant la vie d'un bâtiment parallèlement à la production de celui-ci (voir 3.3.2), nous allons la prendre en compte et donc l'estimer dans les analyses qui suivent.

Comme expliqué au point 3.4, la phase d'utilisation du bâtiment B6 représente le chauffage du bâtiment dans Totem. Celui-ci est évalué sur base des pertes par transmissions et des pertes par ventilation. Les pertes de ventilation sont essentiellement proportionnelles au volume du bâtiment et ce dernier est un facteur qui restera inchangé entre les différentes configurations de la structure. Tandis que les pertes par transmissions ou déperditions thermiques seront, elles, liées à la surface de façade de nos bâtiments. Celles-ci varieront donc avec la géométrie de la structure, il est donc intéressant de les prendre en compte dans nos comparaisons.

Les hypothèses qui sont considérées dans Totem²⁵ seront reprises dans les analyses qui suivent également :

- La durée de vie du bâtiment est de 60 ans.
- Le système de chauffage considéré est une pompe à chaleur avec un rendement de 2,9. Soit 2,9 kWh de chauffage produit pour 1 kWh d'électricité consommé.
- La base annuelle de temps de chauffage est de 1200 degrés-jours équivalents. Soit 1 degré-jour équivaut à un jour où la température extérieure est inférieure de 1 degré par rapport à celle à l'intérieur. Si nous considérons 150 jours de chauffage sur l'année et que la température moyenne extérieure est de 10 °C et de 18 °C à l'intérieur sur cette période, cela équivaudrait à 1200 degré-jour : $150j \cdot (18 - 10)^{\circ}C = 1200 \text{ degrés-jours}$.
- Le coefficient de transmission thermique des façades utilisées dans le cas spécifique 3.3.2.1 est de $U = 1,73 \text{ W/m}^2K$ (voir 7.2.2)
- Le coefficient de transmission thermique de la toiture utilisée dans le cas spécifique 3.3.2.1 est de $U = 0,24 \text{ W/m}^2K$ (voir 7.2.2)
- Le coefficient de transmission thermique du radier utilisé dans le cas spécifique 3.3.2.1 est de $U = 0,2 \text{ W/m}^2K$ (voir 7.2.2)
- Le coefficient de transmission thermique des voiles utilisés dans le cas spécifique 3.3.2.1 est de $U = 0,24 \text{ W/m}^2K$ (voir 7.2.2)

Nous considérons aussi tout le volume du bâtiment comme chauffé. Dès lors l'entièreté de l'enveloppe du bâtiment engendrera des pertes par transmission.

Connaissant tous ces facteurs les pertes par transmissions Q_t sont définies comme suit²⁶ :

$$Q_t = U \cdot S \cdot \Delta K \cdot h$$

Avec S , la surface de déperdition en $[m^2]$, ΔK la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur en $[K]$ et h le nombre d'heures de chauffage.

En utilisant les degrés-jours on pose, $\Delta K \cdot h = 1200 \text{ degrés-jours} \cdot 24h = 8 K \cdot 150 \cdot 24h$

Si nous reprenons les superficies des surfaces de déperdition du cas spécifique 3.3.2.1 nous obtenons au niveau des :

²⁵ (Totem - building, 2023)

²⁶ (Build Green, 2023)

- Surfaces au sol : $Q_{t,r} = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 540 \text{ m}^2 \cdot 1200 \text{ degrés-jours} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1000} = 3110 \text{ kWh}$
- Surface de la toiture : $Q_{t,t} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 540 \text{ m}^2 \cdot 1200 \text{ degrés-jours} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1000} = 3732 \text{ kWh}$
- Surfaces des façades : $Q_{t,f} = 1,73 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 1008 \text{ m}^2 \cdot 1200 \text{ degrés-jours} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1000} = 50223 \text{ kWh}$
- Surfaces des voiles : $Q_{t,v} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K} \cdot 336 \text{ m}^2 \cdot 1200 \text{ degrés-jours} \cdot \frac{24 \text{ h}}{1000} = 2322 \text{ kWh}$

Nous remarquons que les façades sont sources de 85% des déperditions du bâtiment. Nous considérerons quand même les autres surfaces de déperditions qui représentent tout de même 15% du total de pertes.

Ce total de déperdition équivaut à $Q_{t,tot} = 59388 \text{ kWh}$ sur une année. Pour compenser ces pertes la pompe à chaleur va devoir produire cette même quantité de chauffage. Avec son rendement de 2,9, le système de chauffage consommera l'équivalent de 20478 kWh d'électricité.

Durant les derniers 12 mois, à compter de mai 2023, le kWh d'électricité en Belgique²⁷ avait un impact moyen sur le changement climatique de $0,146 \text{ kgCO}_2\text{e}$. Nous prendrons donc cette valeur comme référence pour estimer l'impact d'émission de GES des déperditions thermiques. Cette partie de la consommation d'énergie annuelle représente donc $3 \text{ tCO}_2\text{e}$, si nous considérons cela sur toute la durée de vie du bâtiment, 60 ans, cela représente $179 \text{ tCO}_2\text{e}$.

Ces pertes représentent 1/3 des $592 \text{ tCO}_2\text{e}$ évaluées par totem au point 3.3.2.2, qui elles représentent pour rappel l'ensemble de la consommation d'énergie de chauffage comprenant les pertes par transmissions et par ventilation du bâtiment. Nous ne pouvons pas réellement comparer les 2 valeurs car elles ne sont pas issues des méthodes de calcul utilisées par le logiciel Totem. Néanmoins, cela permet d'avoir une idée indicative de l'impact des pertes par transmission.

Cette méthode de calcul est donc utilisée pour évaluer les pertes d'énergie liées aux différentes géométries des variantes de structure dans les analyses qui suivent.

5.2 Analyses des variantes de structure pour une SPU de 2160 m²

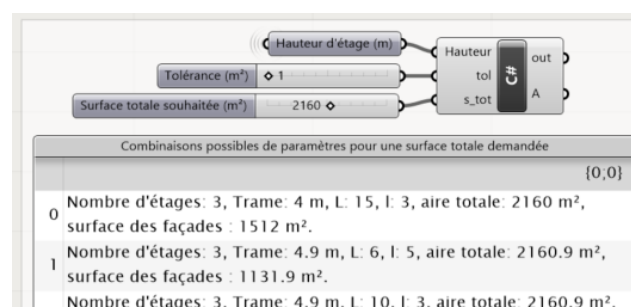


Figure 45 : Cellule des différentes combinaisons possibles pour une même surface de plancher utile (SPU) - Grasshopper

Une première comparaison est faite pour les structures qui ont la même surfaces de planchers utiles que le bâtiment R+3 du cas spécial de la partie 3 du travail.

²⁷ (Electricity maps, 2023)

À l'aide d'un petit code en C# (voir annexe 7.3.4) inclus dans l'algorithme Grasshopper (voir Figure 45) nous pouvons déterminer les différentes variantes de structure possible pour avoir une SPU de 2160 m². Une tolérance de 1 m² est accordée ici afin d'avoir une précision des résultats significative. 10 combinaisons sont trouvées :

	ne [/]	t [m]	L [/]	l [/]	nv [/]	SPU [m ²]	SF [m ²]
Configuration 1	4	6	5	3	2	2160	1008
Configuration 2	3	4	9	5	2	2160	1008
Configuration 3	3	4	15	3	4	2160	1344
Configuration 4	3	4,9	6	5	2	2161	926
Configuration 5	3	4,9	10	3	4	2161	1132
Configuration 6	5	4	9	3	2	2160	1400
Configuration 7	5	4,9	6	3	2	2161	1201
Configuration 8	6	4,9	5	3	2	2161	1235
Configuration 9	9	4	5	3	2	2160	1512
Configuration 10	10	4,9	3	3	2	2161	1372

Tableau 25 : Différentes combinaisons de structure qui ont 2160 m² de SPU

Avec ne le nombre d'étage, t la longueur de trame, L et l le nombre de module en longueur et largeur du bâtiment respectivement, nv le nombre de voiles par noyau de contreventement, SPU la surface de plancher utile et SF la surface des façades. Les autres paramètres sont constants pour toutes les configuration à savoir : la hauteur d'étage $h_e = 3,5\text{ m}$ la résistance de béton pour tous les éléments est $f_{ck} = 30\text{MPa}$, et les charges permanentes et variables appliquées aux dalles sont respectivement $g = 1,5\text{kN/m}^2$ et $q = 3\text{kN/m}^2$.

Vous pourrez retrouver toutes les dimensions et détails des structures en annexe 7.4.1.

Vous trouverez à la Figure 46 le graphe représentant les impacts de la production de la structure (étapes A1-A3 du cycle de vie) ainsi que les impacts de la consommation d'énergie due aux déperditions (étape B6.2 du cycle de vie) de chacune de ces configurations. Leurs représentations 3D sont également disponible sur cette Figure 46.

Émissions de GES totales dues aux différentes variantes de structure pour une même surface de plancher utile de 2160 m²

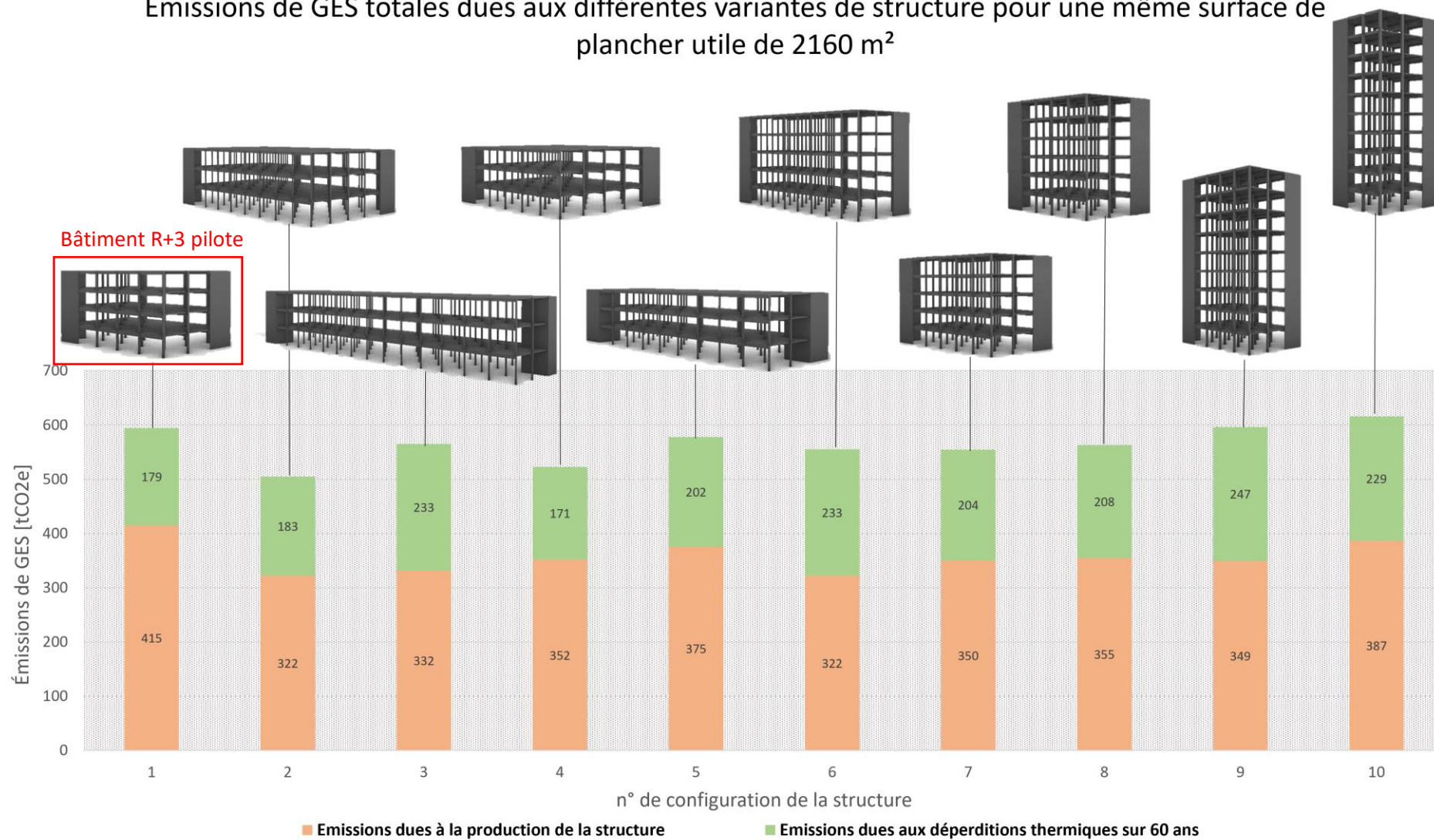


Figure 46 : Graphe représentant les émissions de GES totales par variantes de la structure pour une même surface de plancher utile 2160 m²

Nous remarquons tout de suite sur la Figure 46 que le cas spécifique (configuration n°1) évalué dans la partie 3 du travail, est loin d'être la configuration idéale. Cela est dû à la production de la structure qui équivaut à 415 tCO_2e . Vous noterez que dans la partie 3 l'impact des émissions de GES de la production de la structure était de 392 tCO_2e . Ceci est dû à la contribution du gaspillage sur chantier qui implique une production supplémentaire.

Cette valeur d'émissions de GES pour la production de la structure est d'ailleurs la plus élevée de toutes les configurations. Cependant elle est contrebalancée par la consommation d'énergie durant la vie du bâtiment qui est relativement faible comparée aux autres structures.

La configuration optimal est la n°2 elle impacte peu les deux étapes de cycle de vie.

En observant les modèles 3D sur la Figure 46, un premier constat peut être fait. Les bâtiments les plus compacts et ayant de petites portées ont le moins d'impact. Ceux les plus élancés que ce soit en longueur ou en hauteur ont un impact plus conséquent. Ceux avec de plus grande portée, comme le bâtiment pilote, ont également un impact important.

Pour rentrer plus en détails dans les comparaisons des variantes, nous définissons des paramètres qui représentent les caractéristiques principales des structures :

- $f_{GES,tot}$ l'indicateur d'émissions de GES de la structure exprimé en $kgCO_2e/m^2 \text{ SPU}$ pour la production des éléments et l'énergie de compensation des pertes par déperditions.
- C le coefficient de compacité du bâtiment. C'est le rapport entre la superficie de l'enveloppe totale de déperdition (ici : les façades, voiles de contreventement, la toiture et le radier) et la superficie de plancher utile. Plus ce coefficient est petit plus le bâtiment est compact, à l'inverse plus il est grand plus la surface de déperdition est grande.
- C_f le coefficient de compacité évalué sur base des façades. C'est le rapport entre la superficie des façade en mur-rideau et la superficie de plancher utile. Ce rapport peut-être intéressant car ce sont les murs-rideaux qui ont le plus grand coefficient de transmission thermique U .
- V_b le rapport entre le volume de béton et le volume totale de la structure. Celui-ci permet d'évaluer directement l'impact des matériaux.
- t la longueur de trame.
- ne le nombre d'étages.

Ces paramètres permettent de qualifier directement les différentes configurations. Ils permettent de comprendre d'où viennent les émissions et de comparer les différentes variantes facilement. Ci-dessous vous retrouverez des commentaires pour chaque paramètre.

5.2.1 Paramètre volumétrique V_b

Ce paramètre sert à quantifier la proportion de volume de matière par rapport au volume total du bâtiment. Il sera donc normalement représentatif des émissions de GES dues à la production de la structure. Dans le Tableau 26 nous classons les configurations du plus petit au plus grand paramètre volumétrique et nous affichons également les émissions de GES dues à la production de la structure par m^2 de SPU, nous nommerons cet indicateur $f_{GES,str}$.

	V_b [%]	$f_{GES, str}$ [kgCO ₂ e /m ² SPU]	t [m]	ne [/]
Configuration 6	6,53%	149	4	5
Configuration 2	6,60%	149	4	3
Configuration 3	7,07%	159	4	3
Configuration 7	7,07%	162	4,9	5
Configuration 9	7,09%	162	4	9
Configuration 4	7,10%	163	4,9	3
Configuration 8	7,19%	164	4,9	6
Configuration 5	7,63%	174	4,9	3
Configuration 10	7,95%	179	4,9	10
Configuration 1	8,52%	192	6	4

Tableau 26 : Classement des configurations de structure (SPU 2160 m²) en fonction du paramètre volumétrique V_b

Trame

Nous remarquons tout de suite que plus la longueur de trame est grande plus l'impact sur le volume du bâtiment est important. Effectivement cette portée influe beaucoup sur le volume de la structure car la hauteur des dalles augmente considérablement avec elle. Dans le cas de grande portée le facteur dimensionnant pour ces éléments est la flèche. Les dalles résisteraient à la rupture avec des hauteurs plus petites mais les déformations de celles-ci seraient trop importantes. C'est l'état limite de service qui est le facteur limitant avec de telle portée.

Nombre d'étages

Nous remarquons que la configuration n°9 a une longueur de trame plus petite mais un grand V_b , ici cela est dû au nombre d'étages. Effectivement, avec des plus hautes structures la quantité de voiles de contreventement augmente aussi.

Si on compare la configuration 6 qui a 5 étages, à la configuration 2 ayant 3, leurs impacts s'équilibrent. Effectivement l'augmentation de la hauteur des voiles de la n°6 est compensée par la surface de toiture qui est réduite. La structure n°2 a 720 m² de toiture contre 432 m² pour la structure 6.

Finalement Nous observons que ce paramètre est bien représentatif de l'indicateur $f_{GES, str}$. Cependant il n'est pas directement proportionnel, en prenant par exemple les configurations 3 et 7 nous remarquons qu'elles ont le même paramètre V_b mais pourtant la 7^e consomme $3 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2\text{SPU}$ en plus que la 3^e. Ceci s'explique par la concentration d'acier des éléments qui n'est pas la même pour les 2 configurations.

Concentration d'armatures dans :	Configuration 3	Configuration 7	
Dalles	56	65	[kg/m ³]
Poutres	134	121	
Colonnes	187	97	
Voiles	52	52	
Totale	66	70	

Tableau 27 : Concentration en armatures des éléments de la structure n°3 et n°7 (SPU 2160m²)

La concentration moyenne d'armature est plus élevée pour la configuration 7. Les différences entre les concentrations des éléments peuvent s'expliquer comme suit :

- Pour les dalles la différence se fait au niveau de la longueur de trame. La n°3 a une longueur de trame de 4 m. Alors qu'une épaisseur de dalle de 12 cm pourrait suffire, l'épaisseur minimal est de 14 cm ce qui induit une concentration un peu plus petite. Pour la 7^e configuration on a une portée de 4,9 m. Le moment de flexion sera donc plus grand et les armatures plus importantes. Dès lors que les dalles ne font que 15 cm de hauteur, la concentration est plus élevée. Nous avons aussi les radier qui rentrent en compte dans le total de dalles, ils ont une plus petite concentration d'armature. Vu que la surface au sol est plus importante pour la structure n°3 la moyenne de concentration d'armature des dalles est plus basse.
- Pour les poutres la portée étant plus grande pour la 7^e configuration, les sections des poutres sont plus importantes mais l'aire d'acier n'augmente pas autant et la concentration reste donc plus petite pour cette configuration.
- Les colonnes quant à elles sont beaucoup plus fine pour la structure n°3, 0,19cm, car elle ne compte que 3 étages. Avec une aire d'armature de $8,6\text{cm}^2/\text{m}$ la concentration est plus élevée. Tandis que pour l'autre structure qui contient 5 étages (voir

	V_b [%]	$f_{GES, str}$ [kgCO ₂ e / m ² SPU]	t [m]	ne [l]
Configuration 6	6,53%	149	4	5
Configuration 2	6,60%	149	4	3
Configuration 3	7,07%	159	4	3
Configuration 7	7,07%	162	4,9	5

Configuration 9	7,09%	162	4	9
Configuration 4	7,10%	163	4,9	3
Configuration 8	7,19%	164	4,9	6
Configuration 5	7,63%	174	4,9	3
Configuration 10	7,95%	179	4,9	10
Configuration 1	8,52%	192	6	4

- Tableau 26) la section de colonne est de 0,3 cm avec $11,11\text{cm}^2/\text{m}$ ce qui induit une concentration en armature plus faible.
- Les voiles quant à eux ont la même concentration d'armature. Cela est dû au fait qu'ils n'ont pas d'armature spécifique nécessaire mais seulement les armatures minimales nécessaires (treillis + étriers voir 3.2.4.2.3).

Pour améliorer ce paramètre volumétrique une idée serait de pondérer les volumes des différents éléments par leur concentration d'armatures. Ils apporteraient alors plus de précision sur l'impact de la structure. Cependant il est déjà assez représentatif de l'impact de la structure que pour s'y attarder d'avantage.

5.2.2 Paramètre de compacité C et C_f

Le paramètre C représente la compacité du bâtiment. Plus ce paramètre est petit plus le bâtiment est compact, c'est-à-dire qu'il contient un grand volume dans une petite « enveloppe ». Dans le cas des variantes de structure ce paramètre est intéressant pour représenter la superficie des surfaces de déperdition thermique. Ici, il est évalué non pas avec le volume du bâtiment, mais avec la surface de plancher utile, le volume n'étant pas une variable de notre comparaison. Il est donc normalement un bon indicateur pour évaluer les impacts d'émissions de GES pour l'étape de vie du bâtiment, ou plus précisément l'impact des déperditions thermiques du bâtiment.

Le paramètre C_f , quant à lui, représente la surface de façade en mur-rideau par rapport au plancher utile. Effectivement il peut être intéressant car les déperditions auront surtout lieu à ces endroits car le coefficient de transmission thermique est bien plus élevé que ceux des autres surfaces (sol, toit ou voiles). Nous trouvons les paramètres comme suit :

$$C = \frac{S_t + S_r + S_v + S_f}{SPU} \text{ et } C_f = \frac{S_f}{SPU}$$

Dans le Tableau 28 et le Tableau 29, nous déterminons quel paramètre est plus déterminant nous comparons les classements des variantes de structure triées en fonction de ces variables par rapport à l'indicateur d'émissions de GES pour l'étape de consommation d'énergie du bâtiment évalué par m^2 de SPU, $f_{\text{GES},\text{energie}}$.

C	$f_{\text{GES},\text{energie}}$
-----	---------------------------------

C_f	$f_{\text{GES},\text{energie}}$
-------	---------------------------------

	[/]	$[kgCO_2e/m^2 SPU]$
Configuration 4	0,86	79
Configuration 1	0,87	83
Configuration 2	0,88	85
Configuration 7	0,91	95
Configuration 8	0,93	96
Configuration 5	0,95	94
Configuration 6	0,98	108
Configuration 3	1,03	108
Configuration 9	1,04	114
Configuration 10	1,05	106

Tableau 28 : Classement des variantes de structure (SPU 2160m²) en fonction du paramètre de compacité C

	[/]	$[kgCO_2e/m^2 SPU]$
Configuration 4	0,43	79
Configuration 1	0,47	83
Configuration 2	0,47	85
Configuration 5	0,52	94
Configuration 7	0,56	95
Configuration 8	0,57	96
Configuration 3	0,62	108
Configuration 10	0,63	106
Configuration 6	0,65	108
Configuration 9	0,7	114

Tableau 29 : Classement des variantes de structure (SPU 2160m²) en fonction du paramètre de compacité des façades C_f

Les deux paramètres sont assez représentatifs de l'indicateur $f_{GES,energie}$. Cependant le paramètre de compacité C_f est plus précis que le paramètre de compacité global C . Effectivement les parois n'ayant pas les mêmes coefficients de transmission U il est logique que le paramètre de compacité global ne soit pas le plus précis. Pour pousser la précision au maximum de ce paramètre, une option serait de le calculer en pondérant les surfaces des parois par leur coefficient U .

Ici pour notre type de bâtiment, le paramètre C_f est déjà assez représentatif il ne serait pas très utile de préciser le paramètre C de la sorte. De plus les façades représentent un bon pourcentage de l'enveloppe et la différence entre le U des façades et des autres parois est assez conséquent.

5.2.3 Récapitulatif des variantes et de leurs paramètres

Voici donc un tableau contenant tous les paramètres cités précédemment. Les configurations sont classées des moins impactantes en terme d'émission de GES aux plus impactantes.

	$f_{GES,tot}$ [kgCO ₂ e/m ² SPU]	SS [m ²]	C [/]	C_f [/]	V_b [%]	t [m]	ne [/]
Configuration 2	234	720	0,88	0,47	6,6%	4,0	3

Configuration 4	242	720	0,86	0,43	7,1%	4,9	3
Configuration 6	257	432	0,98	0,65	6,5%	4,0	5
Configuration 7	257	432	0,91	0,56	7,1%	4,9	5
Configuration 8	261	360	0,93	0,57	7,2%	4,9	6
Configuration 3	267	720	1,03	0,62	7,1%	4,0	3
Configuration 5	267	720	0,95	0,52	7,6%	4,9	3
Configuration 1	275	540	0,87	0,47	8,5%	6,0	4
Configuration 9	276	240	1,04	0,70	7,1%	4,0	9
Configuration 10	285	216	1,05	0,63	7,9%	4,9	10

Tableau 30: Caractéristiques des variantes de structure (pour une SPU de 2160 m²) classées de la moins à la Nombre plus émissive de GES

Le tout est donc d'avoir le bon compromis entre compacité et volume de la structure pour avoir le moins d'impact possible. Ici la configuration n°2 affiche un très bon rapport volumétrique V_b et une bonne compacité. Ce n'est pourtant pas la meilleure dans ces 2 catégories.

De manière générale il est mieux d'avoir une structure économique en terme de quantité car la structure reste quand même l'impact dominant entre les différentes variantes.

Effectivement en regardant la configuration n°6 nous observons qu'elle a le meilleur paramètre volumétrique, tandis qu'elle a des paramètres de compacité assez décevants. Son C_f est même le deuxième moins bon des 10 configurations. Pourtant elle est classée comme 3^{ème} structure moins impactante en terme d'émission de GES.

À l'inverse la configuration n°1 a beau avoir un très bon paramètre de compacité C_f (le deuxième meilleur) avec son paramètre V_b qui est le plus élevé elle prend la 8^{ème} place.

Pour terminer sur les paramètres géométrique de la structure, globalement les grandes portées de dalles finissent à l'arrière du classement. Excepté pour les configurations n°3 et n°9 qui ont des petites longueurs de trame mais qui ont une compacité trop élevée. Ce qui rejoint le fait que le paramètre volumétrique domine plus que la compacité.

Et en ce qui concerne le nombre d'étages on remarque plus ou moins la même chose plus il est élevé moins la configuration est optimale, à par pour les configurations 5 et 6 où la compacité des bâtiments compense.

5.3 Analyses des variantes de structure pour une SPU de 3000 m²

Pour pouvoir confirmer nos observations dans l'analyse des variantes pour une surface de plancher de 2160 m², nous allons maintenant nous pencher sur une autre série de variantes pour une SPU de 3000 m². Dans le Tableau 31, vous trouverez les différentes configurations pour une surface de plancher utile de 3000 m².

	ne [/]	t [m]	L [/]	l [/]	nv [/]	SPU [m ²]	SF [m ²]
Configuration 1	3	5	8	5	2	3000	1155
Configuration 2	3	6,9	7	3	4	2999	1159
Configuration 3	4	5	6	5	2	3000	1260
Configuration 4	4	5	10	3	4	3000	1540
Configuration 5	5	4,9	5	5	2	3001	1372
Configuration 6	6	4,3	9	3	2	2995	1806
Configuration 7	6	5	5	4	2	3000	1470
Configuration 8	7	6,9	3	3	2	2999	1352
Configuration 9	8	5	5	3	2	3000	1680
Configuration 10	10	5	4	3	2	3000	1750

Tableau 31 : Différentes combinaisons de structure qui ont 3000 m² de SPU

Avec ne le nombre d'étage, t la longueur de trame, L et l le nombre de module en longueur et largeur du bâtiment respectivement, nv le nombre de voiles par noyau de contreventement, SPU la surface de plancher utile et SF la surface des façades. Les autres paramètres sont constants pour toutes les configurations à savoir : la hauteur d'étage $h_e = 3,5 \text{ m}$ la résistance de béton pour tous les éléments est $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$, et les charges permanentes et variables appliquées aux dalles sont respectivement $g = 1,5 \text{ kN/m}^2$ et $q = 3 \text{ kN/m}^2$.

Vous pourrez retrouver toutes les dimensions et détails des structures en annexe 7.4.2.

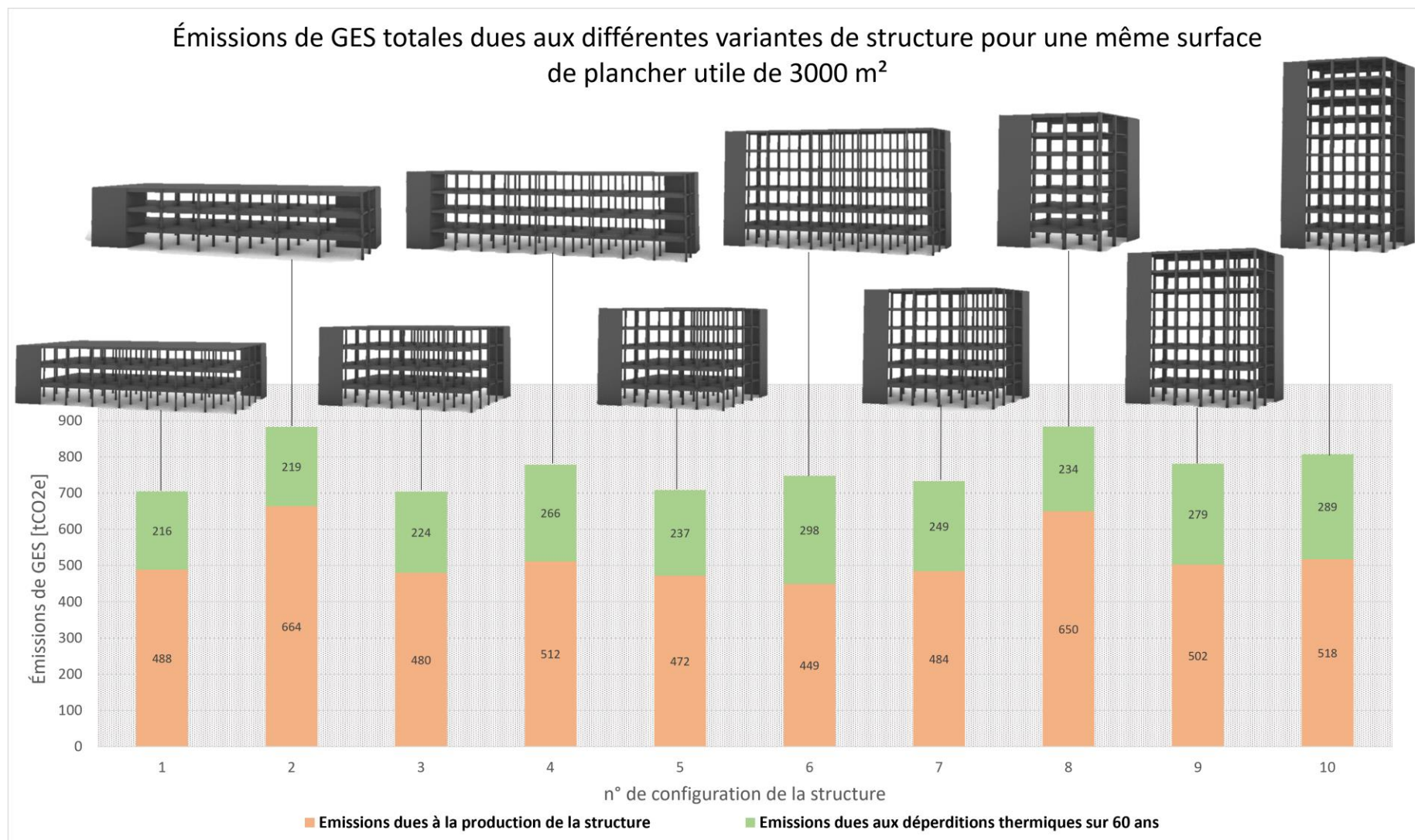


Figure 47 : Graphe représentant les émissions de GES totales par variantes de la structure pour une même surface de plancher utile 3000 m²

	$f_{GES,tot}$ [kgCO ₂ e /m ² SPU]	SS [m ²]	C [/]	C _f [/]	V _b [%]	t [m]	ne [/]
Configuration 1	235	1000	0,79	0,39	7%	5,0	3
Configuration 3	235	750	0,76	0,42	6,8%	5,0	4
Configuration 5	236	600	0,77	0,46	6,6%	4,9	5
Configuration 7	244	500	0,80	0,49	6,9%	5,0	6
Configuration 6	249	499	0,89	0,60	6,5%	4,3	6
Configuration 4	259	750	0,86	0,51	7,3%	5,0	4
Configuration 9	260	375	0,87	0,56	7,2%	5,0	8
Configuration 10	269	300	0,92	0,58	7,5%	5,0	10
Configuration 2	294	1000	0,82	0,39	9,9%	6,9	3
Configuration 8	295	428	0,82	0,45	9,7%	6,9	7

Tableau 32 : Caractéristiques des variantes de structure (pour une SPU de 3000 m²) classées de la moins à la plus émissive de GES

Dans le Tableau 32, nous observons que le paramètre volumétrique est toujours prédominant pour les structures avec une SPU de 3000 m². Effectivement les pourcentages les plus élevés se retrouvent dans le bas du classement malgré des paramètres de compacité assez faibles. La configuration 2 en est une belle illustration, nous remarquons également que son paramètre volumétrique va de pair avec sa grande longueur de trame.

À l'inverse la configuration 6 qui a le pire paramètre de compacité s'en sort dans le milieu du classement avec son indice volumétrique qui est le meilleur du classement.

La tendance de l'impact du nombre d'étages est toujours la même, plus il y a d'étages plus l'impact d'émission de GES est grand. Malgré quelques outsiders comme les configurations n°4 et 2 qui sont désavantagées par la longueur de leur structure. Effectivement elles font toutes deux plus de 40 m et sont donc composées de deux noyaux de contreventement « complet » (avec 4 voiles par noyaux). Ceci met en évidence aussi l'impact de ces noyaux de contreventement sur l'indicateur environnemental de leur bâtiment.

Sur le Tableau 33 et le Tableau 34 nous avons classé encore une fois les différentes configurations selon leurs deux paramètres caractéristiques V_b et C_f.

	V_b [%]	$f_{GES,str}$ [kgCO ₂ e/ m ² SPU]	$f_{GES,tot}$ [kgCO ₂ e/ m ² SPU]
Config. 6	6,50%	150	249
Config. 5	6,60%	157	236
Config. 3	6,80%	160	235
Config. 7	6,90%	161	244
Config. 1	7,00%	163	235
Config. 9	7,20%	167	260
Config. 4	7,30%	171	259
Config. 10	7,50%	173	269
Config. 8	9,70%	217	295
Config. 2	9,90%	221	294

Tableau 33 : Classement des configurations de structure (SPU 3000 m²) en fonction du paramètre volumétrique V_b

	C_f [/]	C [/]	$f_{GES,ener}$ [kgCO ₂ e/ m ² SPU]	$f_{GES,tot}$ [kgCO ₂ e/ m ² SPU]
Config. 1	0,39	0,79	72	235
Config. 2	0,39	0,82	73	294
Config. 3	0,42	0,76	75	235
Config. 8	0,45	0,82	78	295
Config. 5	0,46	0,77	79	236
Config. 7	0,49	0,8	83	244
Config. 4	0,51	0,86	89	259
Config. 9	0,56	0,87	93	260
Config. 10	0,58	0,92	96	269
Config. 6	0,6	0,89	100	249

Tableau 34 : Classement des configurations de structure (SPU 3000m²) en fonction du paramètre de compacité des façades C_f

Encore une fois ces deux classements mettent en avant la légère prédominance du paramètre volumétrique V_b sur le paramètre de compacité C_f . De fait si nous observons les 5 premiers éléments de chaque classement, nous observons que ceux du classement selon V_b se retrouvent également dans les 5 premiers du classement « général » prenant en compte les deux facteurs d'impact $f_{GES,str}$ et $f_{GES,ener}$ (Tableau 32). Tandis que dans les 5 premiers du classement avec C_f nous retrouvons les deux derniers éléments du classement « général » qui sont aussi les deux derniers du classement selon V_b .

Ce paramètre C_f n'en reste pas moins un indicateur influent sur l'impact environnemental dans ces comparaisons. En regardant les 5 premiers éléments du Tableau 32 nous observons des paramètres volumétriques assez proches les uns des autres et c'est le paramètre de compacité des surfaces C_f qui tranche entre les 5. Il place d'ailleurs le paramètre volumétrique le plus élevé des 5 au sommet du classement.

5.4 Conclusion intermédiaire

Pour conclure cette partie d'analyse de plusieurs variantes de structure, il est important d'appuyer les observations que nous avons pu faire sur les deux paramètres caractéristiques de l'impact environnemental d'une structure.

Pour rappel nous avons remarqué que les grandes étapes de cycle de vie qui influent sur l'impact d'une configuration de structure par rapport à une autre pour une même surface de plancher utile, sont la production des matériaux et la consommation d'énergie durant l'utilisation du bâtiment tout au long de sa vie. Nous avons donc évalué les indicateurs de changement climatique, ou d'émissions de gaz à effet de serre de ces différentes configurations.

Le paramètre qui représente cette première étape de production est le paramètre volumétrique V_b de la structure. Il permet de voir directement quelle est la proportion de volume de la structure du bâtiment par rapport à son volume total. Lors de l'analyse des variantes, il en est ressorti que ce paramètre était lié étroitement à la longueur de trame ou autrement dit, la portée de dalle et poutre.

Pour illustrer cela de manière un peu plus forte, nous rassemblons les données des deux séries de variantes de structure (voir section 5.2 et 5.3). Ceci est possible car les paramètres et émissions de GES liés aux structures sont exprimés par m^2SPU . Ces variantes sont classées de la moins impactante à la plus impactante en terme d'émissions de GES. Nous isolons le paramètre volumétrique V_b et un paramètre lié à la longueur de trame. Pour comparer les deux paramètres sur le même graphe nous avons multiplié V_b par 10 et divisé la trame par 10, ainsi nous obtenons le même ordre de grandeur.

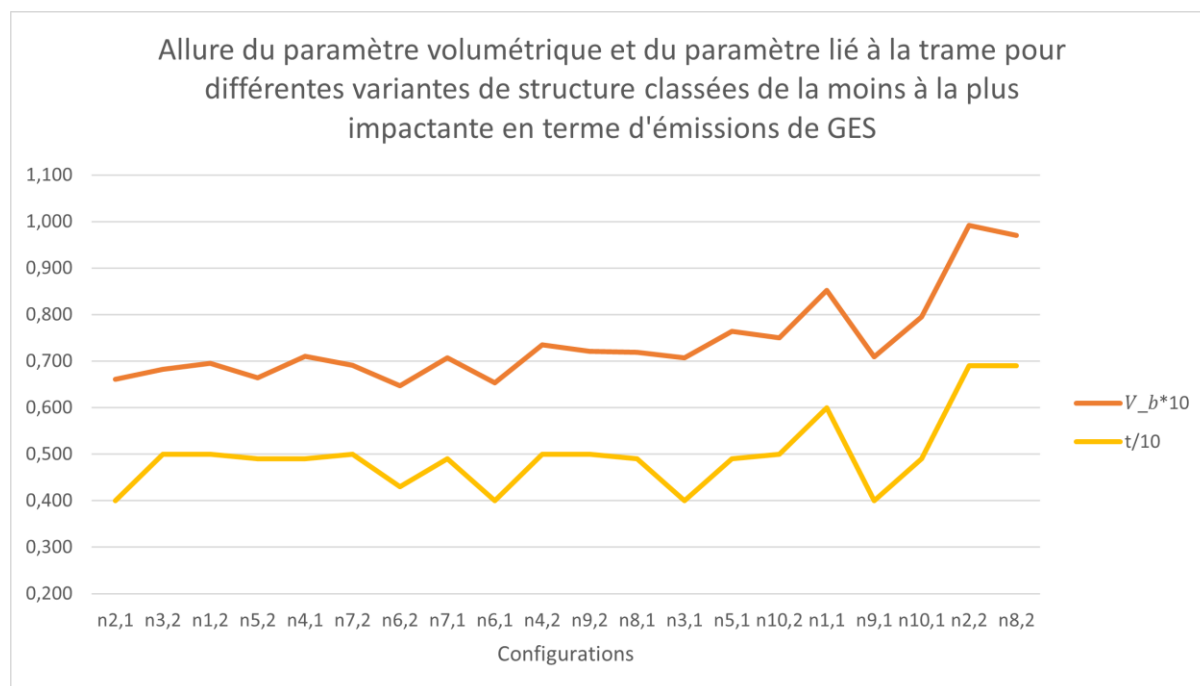


Figure 48 : Allure du paramètre volumétrique et du paramètre lié à la trame pour différentes variantes de structure classées de la moins à la plus impactante en terme d'émissions de GES

Avec les configurations de structure notées $n_{x,y}$, avec x le numéro de la configuration et y le numéro de la série de variantes de structure. La série 1 réfère à l'ensemble des configurations pour les SPU de 2160 m² (voir section 5.2) et la série 2 à celle pour les SPU de 3000m² (voir section 5.3).

D'un coup d'œil il est possible d'observer que le paramètre volumétrique suit relativement la même courbe que le paramètre lié à la trame. Ceci montre bien que la trame a un réel impact sur le volume de la structure générale et donc sur les émissions de GES. Les deux courbes ne se suivent pas parfaitement non plus d'autres facteurs entrent en compte dans le volume de la structure. Notamment le nombre d'étage qui influe sur le volume des colonnes et des voiles de contreventement. Ou la longueur du bâtiment qui peut aussi influencer sur la quantité de voiles de contreventement également. Néanmoins ces facteurs sont moins proportionnels au volume de la structure. C'est la trame qui est l'élément prédominant pour la détermination de ce volume.

Il est à noter que ce paramètre volumétrique n'est pas directement proportionnel aux émissions de GES. Effectivement, comme souligné à la section 5.2.1, la concentration d'armatures des éléments a aussi un impact direct sur les émissions également. Cette concentration varie d'une structure à l'autre et peut faire varier de façon modérée l'impact du volume de la structure sur l'indicateur environnemental de celle-ci. Mais le paramètre volumétrique reste une bonne représentation de l'impact de la production de sa structure sur les émissions de GES.

Le deuxième paramètre qui représente cette fois une partie de l'impact de la consommation d'énergie durant l'utilisation du bâtiment tout au long de sa vie, est le paramètre de compacité des façades du bâtiment, C_f . Ce paramètre représente la surface de façades en mur-rideau par rapport à la surface de plancher utile (SPU). Plus il est petit, moins il y a de surfaces de façade, moins il y a de déperditions énergétiques et moins le bâtiment devra consommer durant sa vie. Ce paramètre est plus représentatif que son confrère, le paramètre de compacité totale du bâtiment, C . En effet, comme nous l'avons exposé à la section 5.2.2, ce dernier prend en compte toute l'enveloppe du bâtiment. Cependant les surfaces de façades représentent une belle proportion de l'enveloppe totale (+/- 50%) et, les façades ont un coefficient de transmission thermique beaucoup plus élevé que les autres parois (+/- 9 fois plus grand), ceci fait que le paramètre de compacité des façades est plus représentatif que le paramètre « global » de compacité.

Le paramètre de compacité des façades est donc utilisé pour représenter les émissions de GES dues à la consommation d'énergie du bâtiment dans la comparaison des variantes de structure.

Pour comparer l'impact environnemental global de différentes variantes de structure entre elles, il est intéressant de comparer le couple de paramètres pour chacune des structures. Vous retrouverez sur la Figure 49 les deux paramètres pour chaque configuration qui sont classées de la plus, à la moins impactante en terme d'émissions de GES.

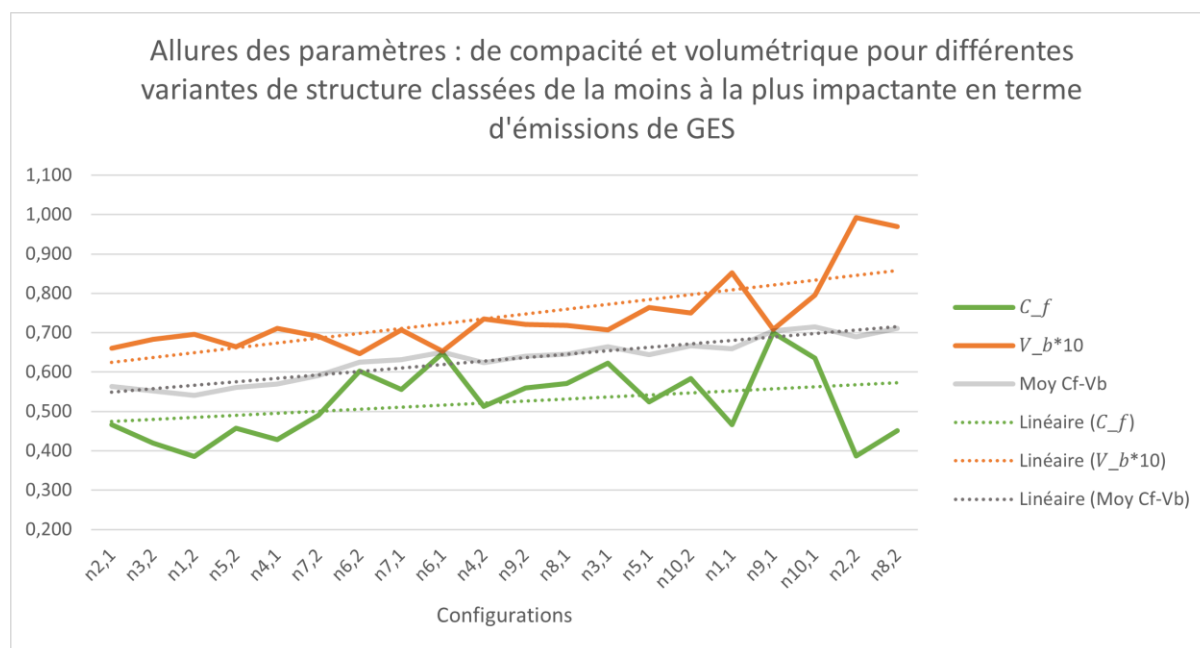


Figure 49 : Allures des paramètres : de compacité C_f et volumétrie V_b pour différentes variantes de structure classées de la moins, à la plus impactante en terme d'émissions de GES

La numérotation des configurations suit la même logique que pour celle de la Figure 48.

Le premier constat qui peut être fait c'est que les 2 courbes représentant le paramètre volumétrie V_b (en orange sur la Figure 49) et le paramètre de compacité des façades (en vert sur la Figure 49) sont en quelque sorte en « opposition de phase ». Ce que nous voulons dire par là c'est que si un des deux paramètres est plus élevé pour une structure, alors le deuxième paramètre sera plus faible et inversement.

Le deuxième constat qui peut être fait est que les tendances des deux courbes (en pointillés sur la Figure 49) ont une pente positive. Ce qui veut dire que ces paramètres augmentent en fonction du classement des configurations et donc en fonction de l'augmentation de l'impact environnemental des structures. Ceci prouve encore bien que les deux paramètres sont bien représentatifs de l'indicateur de changement climatique de chacune des structures.

En effectuant une moyenne de ces deux paramètres nous obtenons la courbe grise sur la Figure 49. Cette courbe est plus ou moins constamment croissante. Cette moyenne se révèle donc être représentative de l'impact global de la structure. Elle n'est, par contre, qu'une valeur indicative mais n'est pas assez précise pour une comparaison des structures basée uniquement sur elle. Effectivement nous observons des pentes négatives à certains endroits, si nous nous fions donc seulement à cette moyenne le classement des configurations ne serait pas le même.

Cela montre que ces paramètres sont de bons indicateurs mais nous ne pouvons pas nous fier uniquement à eux car comme nous l'avons précédemment expliqué plus haut, ces paramètres ne prennent que certaines caractéristiques des structures en compte et donc leur précision n'est pas la plus élevée non plus.

6 Discussion et conclusion

Le but de ce mémoire était d'évaluer l'impact sur le changement climatique de bâtiments en structure béton multiétagés et de trouver la configuration optimale pour une surface de plancher utile donnée en diminuant au maximum cet impact environnemental.

La structure de ce travail représente la méthodologie suivie tout au long de cette étude pour élaborer au mieux une méthode d'évaluation.

Dans un premier temps, nous nous sommes penchés sur un cas spécifique. Ce bâtiment « pilote » a permis, tout d'abord, de fixer une partie des hypothèses liées aux configurations étudiées, c'est-à-dire des structures parallélépipèdes rectangles, composées de modules carrés, eux-mêmes composés d'une dalle coulée en place, de deux poutres et 4 colonnes. Ces structures sont contreventées par 4 ou 8 voiles en fonction de la longueur du bâtiment. Elles comptent au minimum 3 étages

Ensuite ce bâtiment « pilote » a permis de déterminer une méthode de dimensionnement des ossatures en béton armé. Pour cela le cours de Mr. Cap²⁸ a été une bonne source d'inspiration tout comme la partie de Mr. Latteur dans le cours « *Projet bâtiment* »²⁹.

Une fois cette méthode de dimensionnement mise en place nous avons pu réaliser une première analyse de cycle de vie (ACV) du bâtiment « pilote » avec la base de donnée EPiC³⁰. Cette première ACV a été réalisée en considérant seulement l'étape de production des matériaux et, a donc été exécutée sur base du métré de la structure.

Les premiers résultats sont apparus concernant l'impact des éléments de la structure « pilote » : Les planchers correspondent à 74% des émissions de gaz à effet de serre (GES) (c'est assez considérable et c'est là qu'il faut jouer pour diminuer l'impact global), les poutres représentent 11%, les voiles 10% et les colonnes 5%.

Le constat est que l'impact des éléments structurels est fortement lié, mais pas directement proportionnel, au volume de ceux-ci. Il faut prendre en considération la concentration d'armature des éléments pour obtenir leurs émissions de GES précises. Dans le Tableau 35 vous retrouverez la moyenne d'impact par m³ d'élément, calculée sur la série de 10 configurations de structure (voir section 5.2) ayant une surface de plancher utile identique de 2160 m².

Le Tableau 35 met en évidence la différence d'impact entre les différents éléments en fonction de leur concentration d'armatures d'acier.

²⁸ (Cap)

²⁹ (P. Latteur, T. Vandenberghe, D. Zastavni, 2019)

³⁰ (Crawford R.H., Stephan A., Prideaux, F., Bontinck P-A., 2020)

	Volume Moyen [m³]	Masse d'acier moyenne [t]	Masse totale moyenne [t]	Concentration d'armatures moyenne [kg/m³]	Émissions de GES par m³ de structure [kgCO2e/m³ str]
Planchers	401	24,6	957	61,3	594
Poutres	37	4,6	90	125,8	781
Colonnes	36	3,7	87	105,2	721
Voiles	74	4,0	175	54,3	573
Structure totale	547	36,9	1309	67,6	612

Tableau 35 : Émissions de GES par m³ d'élément structurel, calculées sur base d'une moyenne de 10 configurations de structure avec 2160m² SPU

Pour ce cas spécifique du bâtiment « pilote », nous avons ensuite fait une ACV complète de celui-ci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie. Cette analyse a été faite sur Totem, un outil qui permet de faire des ACV assez détaillée. Le désavantage de ce logiciel est que les dimensions des éléments sont limitées à celles répertoriées dans sa bibliothèque.

Cependant cette analyse nous a aidé à identifier les différentes étapes du cycle de vie d'un bâtiment les plus impactantes pour l'environnement. Les deux impacts majeurs sont liés aux étapes de production des matériaux (A1-A3 voir les différentes étapes section 2.1.1) et à la consommation d'énergie pour le chauffage (B6.2), qui représentent respectivement 36 et 41% des émissions totales de GES, alors que Le transport et la construction du bâtiment (A4-A5) ne représentent que 6%. Les étapes de maintenance et remplacement de composants équivalent à 15% sur la durée de vie du bâtiment, cependant elles ne concernent que les composants des éléments qui ont une longévité de moins de 60 ans (la durée de vie du bâtiment) et ne s'appliquent donc pas aux éléments structurels. Les derniers 2% d'émission de GES sont dus à la fin de vie des matériaux (C1-4).

Cela nous a permis de cibler les étapes du cycle de vie que nous allons évaluer pour nos comparaisons, à savoir la production des matériaux et la consommation d'énergie pour le chauffage du bâtiment.

Dans un second temps, nous avons développé un algorithme comportant la méthodologie de dimensionnement de la structure ainsi que la base de données EPiC nous permettant de faire l'ACV du bâtiment. Cet algorithme est un outil paramétrique qui modélise la géométrie du bâtiment, le dimensionne et évalue son cycle de vie. Il permet donc de trouver les paramètres idéaux d'une structure pour une surface de plancher utile donnée.

Les paramètres que nous avons fait varier dans ce travail sont : la longueur de trame des modules composant la structure, le nombre d'étages et le nombre de module en longueur et en largeur du bâtiment. La hauteur d'étage, les charges appliquées et les classes de bétons des éléments sont également des paramètres d'entrée de l'algorithme mais nous ne les avons pas fait varier dans cette étude.

À ces analyses sur l'étape de production des matériaux, nous ajoutons celles sur l'étape de consommation d'énergie pour le chauffage, qui provient des pertes thermiques par ventilation et des pertes thermiques par transmission. La hauteur d'étage et donc le volume du bâtiment étant le même pour les différentes configurations, seules les pertes thermiques par transmission sont à évaluer.

Pour comparer ces différentes variantes de structure nous avons défini certains paramètres caractéristiques du bâtiment. Les deux paramètres les plus représentatifs de l'impact environnemental de la structure sont le paramètre volumétrique du bâtiment V_b et le paramètre de compacité des façades C_f . V_b représente le rapport entre le volume de la structure et le volume total du bâtiment et permet donc d'évaluer assez fidèlement l'impact d'émissions de GES dû à la production de la structure. Le second paramètre, C_f , représente quant à lui le rapport entre les surfaces de mur-rideau du bâtiment et la surface de plancher utile de celui-ci. Ce paramètre permet de représenter la consommation d'énergie du bâtiment due aux déperditions thermiques des parois.

Les constats suivants sont sortis de l'analyse comparative. Le paramètre qui influe le plus sur l'impact environnemental global de la structure est le paramètre volumétrique. Effectivement si celui-ci est trop élevé la configuration de la structure n'est pas optimale. Dans les limites des bâtiments étudiées dans ce travail, un paramètre V_b est considéré comme faible pour des valeurs entre 6,5% (paramètre le plus petit observé) et 7,3%. Au-delà, l'impact environnemental sera élevé quelque soit le paramètre de compacité associé.

Le paramètre de compacité C_f influe aussi sur l'impact environnemental global de la structure. Si l'on veut trouver une configuration optimale, il faudra nécessairement que ce paramètre soit bon également. Un bon coefficient de compacité des façades se trouve entre 0,39 (paramètre minimal trouvé) et 0,6. À l'inverse, un paramètre C_f bas ne signifie pas un impérativement un impact environnemental modéré ou petit pour la structure.

En résumé, les limites de l'étude se confinent aux projets de bâtiments multiétagés, en structure béton de relativement grande envergure (1000 à 4000 m² de SPU).

Pour réduire l'impact environnemental de ce type de bâtiment, on préfère un paramètre volumétrique V_b faible, qui implique un volume de la structure minimal. Pour y parvenir il faut limiter l'épaisseur des planchers, qui représente $\frac{3}{4}$ du volume total de la structure en moyenne et donc réduire la longueur de la trame. Cela réduit considérablement le volume de la structure malgré un nombre de colonnes plus élevé pour une même surface de plancher utile. Un nombre d'étages plus faible réduit le volume des colonnes et surtout des voiles de contreventement.

Ensuite pour diminuer toutes déperditions thermiques, une compacité réduite des façades C_f est nécessaire. Pour ce faire encore une fois, un nombre limité d'étages est préférable. Cela réduit la surface des façades même s'il augmente la surface au sol et de toiture. Ces deux derniers éléments ont des coefficients de transmission thermique bien plus faibles que les façades et donc les déperditions sont moindres. Un périmètre de bâtiment le plus carré possible est aussi un paramètre qui jouera en la faveur de l'efficacité énergétique, car plus la structure est allongée plus il y a de parois de déperditions.

Ces comparaisons prennent en compte des paramètres fixes comme la hauteur d'étage, ici de 3,5 mètres. De manière générale, il vaut mieux avoir des hauteurs sous plafond les plus petites possibles pour diminuer le volume d'air à chauffer au maximum. Dans ces comparaisons les pertes par ventilation n'ont pas été prises en compte car elles sont quasiment les mêmes pour une même surface

de plancher utile, mêmes si elles représentent une part importante de la consommation d'énergie totale due au chauffage (quasiment 2/3 pour le bâtiment « pilote » en section 3.3.2.2).

Les hypothèses de notre modèle ne sont cependant pas les plus optimales. Tout d'abord nous avons négligé la production des façades et des matériaux isolants dans nos ACV. Ceux-ci ont un gros impact sur les émissions de GES (voir Tableau 24) d'une structure. Dans notre analyse comparative ils pourraient influencer sur les résultats. Néanmoins, les configurations les plus optimales de notre étude sont celles avec des paramètres de compacité C_f les plus faibles, rajouter la production des façades et isolants ne feraient normalement que renforcer les résultats obtenus.

Le poids propre des murs-rideaux en façade devrait avoir un impact négatif sur les bâtiments avec beaucoup d'étages s'il était pris en compte car il augmenterait les charges sur les colonnes et donc leur dimensions. Encore une fois cela ne devrait pas trop changer nos résultats.

La classe de béton était fixée à un C30/37. Nous pourrions faire jouer ce paramètre pour essayer de diminuer le volume de la structure, cependant son influence serait limitée. En effet, plus la classe de béton est haute plus son impact est grand, il faudrait donc que le volume diminue assez pour compenser l'impact élevé de la classe. Pour des grandes portées de plancher, l'élément dimensionnant est leur flèche. Hors cette flèche (voir 3.2.1.2.2) ne dépend pas de la résistance du béton mais de son module d'élasticité que nous considérons fixe à 10 *GPa* pour n'importe quelle classe de béton. Dès lors le volume de dalle reste inchangé ou presque quelque soit la classe de béton. Les seuls éléments qui pourraient diminuer de volume, sont les colonnes mais comme nous l'avons vu plus haut, celles-ci ne représentent que 5% des impacts environnementaux de la structure.

Un paramètre limitant est la longueur des voiles de contreventement. Effectivement, pour rester dans la simplicité du modèle, cette longueur est définie comme étant équivalente à celle de la trame des modules. Cependant ces voiles sont la plupart du temps surdimensionnés et on observe donc des épaisseurs et concentration d'armature identique entre les configurations. Diminuer leur longueur serait plus judicieux et beaucoup moins impactant pour leur structure car ils représentent quand même en moyenne 13% du volume total (pour la moyenne des configurations de structure avec 2160 m² SPU).

Nous avons aussi considéré une structure en béton armé, coulée sur place. Une bonne solution pour diminuer le volume des planchers serait d'utiliser des hourdis préfabriqués. Ceux-ci ont l'avantage d'être constitués d'alvéoles et donc d'avoir moins de volume de matière. Ils peuvent être également précontraints ce qui réduit considérablement la flèche des planchers et donc l'épaisseur des éléments aussi.

En ce qui concerne les éléments de la structure, nous remarquons des concentration d'armatures plutôt dans la fourchette basse de ce que l'on retrouve en réalité. En pratique les bureaux d'étude mettent plus d'armatures minimales dans les éléments pour prendre une plus grande marge de sécurité.

Les pistes d'améliorations ou de continuité de l'étude sont nombreuses puisque notre modèle pourrait prendre de multiples autres paramètres en compte.

Une première piste intéressante à étudier, serait d'améliorer les modèles paramétriques notamment au niveau de la position du noyau central et de ses dimensions. Cet élément pourrait potentiellement changer les résultats de nos analyses. Par ailleurs, Intégrer des hourdis dans notre modèle permettrait

d'étudier des bâtiments avec plus de grandes portées et d'identifier des configurations encore plus optimal en matière d'impact environnemental.

Faire varier la forme des modules pourrait également être un paramètre intéressant et permettrait plus de possibilités de configurations.

Une seconde piste utile pour ce mémoire serait de considérer un nouveau matériau dans l'algorithme. Il serait en effet intéressant de comparer les structures en béton avec une structure remplissant les mêmes caractéristiques géométriques et en termes d'isolation, constituée d'un autre matériau.

Le bois semble être une alternative pour réduire l'impact environnementale de la construction. Pour des bâtiments de grande envergures, multiétagés, le bois lamellé-collé, CLT, offre également de bonnes caractéristiques mécaniques.

En réalité, il « suffirait » d'ajouter une partie « dimensionnement » dans notre algorithme (voir section 494.2) pour y inclure les éléments en bois. Le reste du code ne devrait être pas trop modifié. Nous pourrions connecter la géométrie et les dimensions des éléments en bois à une nouvelle cellule EPiC pour générer l'ACV du bâtiment avec ce matériau. Et en parallèle nous pouvons garder la cellule EPiC existante pour obtenir les résultats avec le béton comme matériau. Ainsi il serait possible d'afficher le résultat des deux types de bâtiments (béton et bois) en simultanément et pouvoir les comparer en terme d'émissions de GES.

Un paramètre supplémentaire au quel il faudrait porter attention serait l'uniformité des coefficients de transmission des parois car si nous voulons comparer ces deux solutions (béton et bois), il faut que les bâtiments aient les mêmes caractéristiques. Comme les éléments de CLT sont des panneaux pleins il faudrait dès lors remplir les parois de la structure béton avec des matériaux ayant le même coefficient U .

Dans tous les cas ce serait un travail fort intéressant à faire pour chiffrer les bienfaits du bois qui est sur le devant de la scène en cette période de crise climatique.

Nous terminerons ce travail de fin d'étude avec une comparaison intéressante : Les émissions totales de GES du bâtiment pilote évaluées à la section 3.3.2.2 par Totem, reviennent à 1454 tCO_2e . Cette valeur représente l'impact du bâtiment de 2160 m^2 (un bâtiment de 30 m de long, 18 m de large et 14 m de haut avec 4 étages) sur toute sa durée de vie, à savoir 60 ans. En considérant l'emprunte carbone moyenne d'une personne habitant sur terre équivalente à 4,4 tCO_2e/an .³¹ L'impact de ce bâtiment équivaldrait seulement à celui de 5,5 personnes vivant sur cette même période.

³¹ (Vert, 2022)

7 Annexes

7.1 Dimensionnement

7.1.1 Calcul de l'élanement d'une colonne

Voici comment nous déterminons l'élanement λ_{lim} en suivant le cours³² de Mr. Cap.

Les effets du second ordre peuvent être négligés si l'élanement λ est inférieur à λ_{lim} .

$$\lambda = \frac{I_0}{i} \leq \lambda_{lim} = \frac{20 \cdot A \cdot B \cdot C}{\sqrt{n}}$$

λ est le coefficient d'élanement

l_0 est la longueur efficace (longueur de flambement)

i est le rayon de giration de la section non-fissurée; $i = \sqrt{I_c/A_c}$

n est l'effort normal réduit; $n = N_{Ed}/(A_c \cdot f_{cd}^*)$

$A = 1/(1 + 0,2 \cdot \varphi_{ef})$; si φ_{ef} n'est pas connu $A = 0,7$

φ_{ef} est le coefficient de fluage effectif

$B = \sqrt{1 + 2\omega}$; si ω n'est pas connu $B = 1,1$

ω est le ratio mécanique d'armatures $\omega = (A_s/A_c) \cdot (f_{yd}/f_{cd})$

$C = 1,7 - r_m$; si r_m n'est pas connu $C = 0,7$

$r_m = M_{01}/M_{02}$; rapport des moments d'extrémité tel que $|M_{02}| \geq |M_{01}|$

$r_m = 1$ ($C = 0,7$) si l'élément est non-contreventé ou si les moments de flexions sont dus de manière prépondérante à des charges transversales ou aux imperfections.

7.1.2 Calcul de l'excentricité du second ordre

e_i correspond à l'excentricité due aux imperfections géométriques.

On la détermine avec la relation suivante,

$$e_i = \theta_i \frac{L_0}{2} \text{ avec } \theta_i = \frac{2}{\sqrt{L}} \frac{1}{200}$$

Avec θ_i l'inclinaison qui représente les imperfections, L la longueur de la colonne et L_0 la longueur de flambement. On obtient,

$$\theta_i = 0,0055 \text{ et } e_i = 0,0064 \text{ m}$$

e_2 correspond à l'excentricité due au second ordre. On la détermine avec la relation suivante,

³² (Cap)

$$e_2 = \frac{1}{r} \frac{L_0^2}{c}$$

On retrouve,

$$\frac{1}{r} = k_r k_\varphi \frac{1}{r_0}$$

- $\frac{1}{r_0} = \frac{2\varepsilon_{yd}}{0,9d}$ on prendra $d = b_c - e = 0,31\text{m}$ et $\varepsilon_{yd} = \frac{f_{yd}}{E} = 0,00217$.
On trouve donc $\frac{1}{r_0} = 0,0156$
- $K_r = \frac{1+\omega-\nu}{0,6+\omega} \leq 1$ Ne connaissant pas A_s nous ne pouvons pas déterminer le ratio d'armature ω nous prenons $k_r = 1$ ce qui est du côté de la sécurité.
- $k_\varphi = 1 + \beta \cdot \varphi_{eff}$
 - $\beta = 0,35 + \frac{f_{ck}}{200} - \frac{\lambda}{150} = 0,347$
 - $\varphi_{eff} = 1,28$ le coefficient de fluage effectif

On trouve, $k_\varphi = 1,445$

On trouve, $\frac{1}{r} = 0,0225$

Et donc,

$$e_2 = 0,0122 \text{ m}$$

Calcul du coefficient de fluage effectif φ_{eff} :

Il s'obtient via la relation suivante,

$$\varphi_{eff} = \frac{M_{0qp}}{M_{0Ed}} \varphi(\infty, |t_0)$$

Où M_{0Ed} est le moment du premier ordre (à l'ELU) et vaut :

$$M_{0Ed} = M_0 + N_{Ed} \cdot e_i = 14,175 \text{ kNm} + 2050 \text{ kN} \cdot 0,006 \text{ m} = 27,23 \text{ kNm}$$

Où M_{0qp} est le moment du premier ordre sous charges quasi-permanentes et vaut :

$$M_{0qp} = M_{Eqp} + N_{Eqp} \cdot e_i = 2,835 \text{ kNm} + 1168 \text{ kN} \cdot 0,006 \text{ m} = 10,27 \text{ kNm}$$

M_0 et M_{Eqp} sont les moments dus au cas de charge asymétrique à l'ELU et l'ELS quasi permanent. On les calcule en partant du postulat que la charge variable n'est répartie que sur l'une des deux poutres posée sur la colonne, ce qui crée un moment en considérant la moitié de la largeur de la colonne comme bras de levier.

$$\text{On a à l'ELU, } M_0 = Q_{exp,ELU} \cdot \frac{b_c}{2} = 14,175 \text{ kNm}$$

$$\text{Avec } Q_{exp,ELU} = q_{exp} \cdot L_t \cdot 1,5 \cdot \frac{L_p}{2} = 3 \text{ kN/m}^2 \cdot 6 \text{ m} \cdot 1,5 \cdot 3 \text{ m} = 81 \text{ kN}$$

Avec L_t la longueur de la trame, L_p la longueur de la poutre, 1,5 le coefficient à l'ELU et q_{exp} la charge d'exploitation

À l'ELS qp on a comme coefficient pour les charges d'exploitation pour des bureaux $\psi_{2,1} = 0,3$.

On trouve donc, $M_{Eqp} = Q_{exp,ELSqp} \cdot \frac{b_c}{2} = 2,835 \text{ kNm}$

Avec $Q_{exp,ELSqp} = q_{exp} \cdot L_t \cdot 0,3 \cdot \frac{L_p}{2} = 3 \text{ kN/m}^2 \cdot 6 \text{ m} \cdot 0,3 \cdot 3 \text{ m} = 16,2 \text{ kN}$

Où $\varphi(\infty, | t_0)$ le coefficient de fluage conventionnel à long terme. L'EN1992³³ définit ces coefficients de fluage en fonction de la classe du béton (C30/37), t_0 l'âge du béton au moment du chargement, RH l'humidité relative, h_0 le rayon moyen de la pièce $h_0 = 2 \cdot A_c / u = 0,17 \sim 0,15 \text{ m}$.

Ici via le tableau de l'EN1992 on trouve $\varphi(\infty, | t_0) = 3,4$.

On trouve finalement le coefficient de fluage effectif,

$$\varphi_{eff} = \frac{M_{0qp}}{M_{0Ed}} \varphi(\infty, | t_0) = \frac{10,27 \text{ kNm}}{27,23 \text{ kNm}} \cdot 3,4 = 1,28$$

7.1.3 Sollicitation due au vent selon l'EN1991-1-4

Calcul des sollicitations dues au vent ³⁴

[basé sur EN1991-1-4:2005(F) et NBN_EN_1991-1-4_ANB:2010(F)]

Vitesse de référence du vent :

La valeur de base de la vitesse de référence du vent, $v_{b,0}$ [m/s] est la vitesse moyenne sur 10 minutes à 10 m au-dessus d'un terrain de catégorie II (rase campagne) pour une période de retour de 50 ans.

La vitesse de référence du vent doit être calculée à partir de l'expression :

$$v_b = C_{DIR} \cdot C_{SEAS} \cdot v_{b,0} \text{ [m/s]}$$

Avec :

$v_{b,0}$ la valeur de base de la vitesse de référence du vent

C_{DIR} le coefficient de direction

C_{SEAS} le coefficient pour construction temporaire

Vitesse moyenne du vent :

$$v_m(z) = c_r(z) c_o(z) \cdot v_b$$

$c_o(z)$ le coefficient orographique. Terrain plat → 1

$c_r(z)$ le coefficient de rugosité du terrain

z hauteur au-dessus du sol [m]

³³ (Cap) Slide 22 de EN1992 – EPL – 1x2

³⁴ (Latteur, 2019) Synthèse du calcul des sollicitations dues au vent selon l'EN1991-1-4

Coefficient de rugosité du terrain :

Le coefficient de rugosité du terrain $c_r(z)$ est fonction de la hauteur de la construction et de la rugosité du terrain environnant celle-ci. Il couvre la variation de la vitesse moyenne du vent.

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{pour } z_{\min} < z \leq z_{\max} = 200 \text{ m}$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{pour } z \leq z_{\min}$$

Avec :

k_r le facteur de terrain = $0,19 (z_0/z_{0,II})^{0,07}$.

z la hauteur de la construction

z_0 longueur de rugosité du terrain

$z_{\min}$ hauteur min dépendant de la catégorie de terrain

Tableau 4.1 — Catégories et paramètres de terrain

Catégorie de terrain	z_0 [m]	$z_{\min}$ [m]
0 Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer	0,003	1
I Lacs ou zone plate et horizontale à végétation négligeable et libre de tous obstacles	0,01	1
II Zone à végétation basse telle que de l'herbe, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments) séparés les uns des autres d'au moins 20 fois leur hauteur	0,05	2
III Zone avec une couverture végétale régulière ou des bâtiments, ou avec des obstacles isolés séparés d'au plus 20 fois leur hauteur (par exemple des villages, des zones suburbaines, des forêts permanentes)	0,3	5
IV Zone dont au moins 15 % de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m	1,0	10

Turbulence du vent :

L'intensité de la turbulence $I_v(z)$ à la hauteur z est définie comme l'écart type de la turbulence divisé par la vitesse moyenne du vent.

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \text{ pour } z_{\min} < z \leq z_{\max}$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{pour } z \leq z_{\min}$$

Avec :

k_l coefficient de turbulence = 1.

Pression dynamique de pointe :

La pression dynamique de pointe $q_p(z)$ à la hauteur z , est induite par la vitesse moyenne et les fluctuations rapides de vitesse

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b(z) = (1 + 7I_v(z)) \frac{1}{2} \rho v_m^2(z)$$

Avec :

$$c_e(z) \text{ coefficient d'exposition} \quad c_e(z) = c_r^2(z) c_0^2(z) (1 + 7I_v(z))$$

$$q_b(z) \text{ pression dynamique de référence} \quad q_b(z) = \frac{1}{2} \rho v_b^2(z)$$

$$q_m(z) \text{ pression dynamique moyenne} \quad q_m(z) = \frac{1}{2} \rho v_m^2(z) = \frac{1}{2} \rho c_r^2(z) c_0^2(z) v_b^2(z)$$

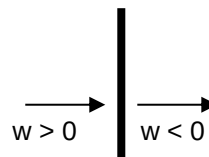
$$\rho \text{ la masse volumique de l'air} \quad = 1,25 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Pression du vent sur les parois d'un bâtiment :

Convention de signe :

Pression vers la paroi > 0

Pression vers l'extérieur de la paroi < 0



Pression aérodynamique extérieure :

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe}$$

Avec : $q_p(z_e)$ la pression dynamique de pointe du vent [N/m²]

z_e est la hauteur de référence pour la pression extérieure [m]

c_{pe} le coefficient de pression extérieure (variable selon la forme du bâtiment, la direction du vent et les zones du bâtiment)

Pression aérodynamique intérieure :

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi}$$

Avec : $q_p(z_i)$ la pression dynamique de pointe du vent [N/m²]

z_i est la hauteur de référence pour la pression intérieure [m]

c_{pi} le coefficient de pression intérieure (variable en fonction du pourcentage d'ouverture des parois du bâtiments)

Pressions nettes sur une paroi :

$$w_{net} = w_e - w_i$$

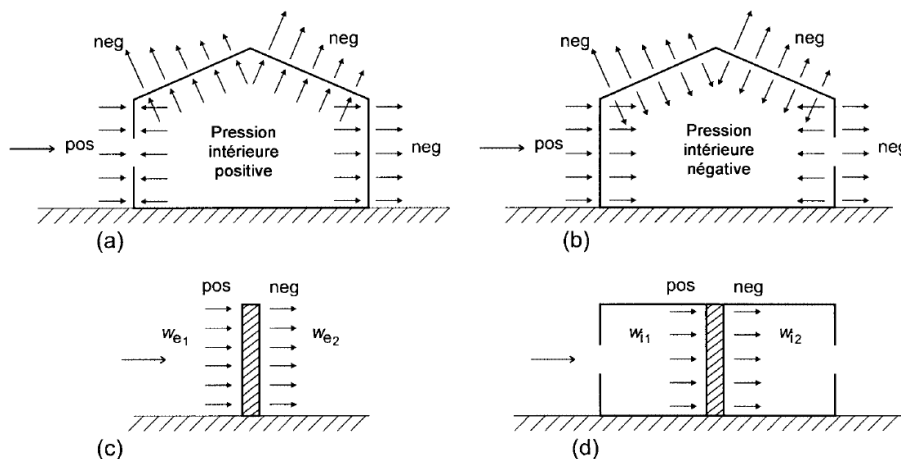


Figure 5.1 — Pression exercée sur les surfaces

Coefficient de pression intérieure - EN1991 – p53

Hypothèses : bâtiment fermé, avec ou sans cloisonnement intérieur

Les coefficients de pression interne les plus défavorables sont de 0,2 et -0,3.

La hauteur de référence z_i qu'il convient d'utiliser pour les pressions intérieures est égale à la hauteur de référence z_e pour les pressions extérieures exercées sur les faces qui contribuent, par leurs ouvertures, à la création de la pression intérieure. Lorsqu'il existe plusieurs ouvertures, il est recommandé d'utiliser la plus grande valeur de z_e pour déterminer z_i .

Les coefficients de pression extérieure c_{pe} applicables aux bâtiments et aux parties de bâtiments dépendent de la dimension de la surface chargée A , qui est la surface de la construction produisant l'action du vent dans la section à calculer. Les coefficients de pression extérieure sont donnés pour des surfaces chargées A de 1 m^2 et 10 m^2 dans les tableaux relatifs aux configurations de bâtiment appropriées ; ils sont notés $c_{pe,1}$ pour les coefficients locaux, et $c_{pe,10}$ pour les coefficients globaux, respectivement.

7.2 Analyses de cycles de vie

7.2.1 Base de données EPiC

7.2.1.1 Matériaux EPiC : « Concrete 32 MPa »

Concrete 32 MPa

Concrete is a composite material combining sand or other fine aggregates, coarse aggregates, a binder and water. Portland cement is the most commonly used binder, however other binders, such as polymers, may also be used. Supplementary Cementitious Materials (SCM) such as Fly Ash and Ground, Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS), are also commonly used as a part replacement for Portland cement. Additives, such as plasticisers can be added to the mix to control concrete properties, such as workability. Concrete is usually combined with steel reinforcement to improve tensile strength.

Concrete is one of the most commonly used construction materials. It is highly durable and is thus typically used for structural elements in buildings and infrastructure projects. Concrete can be manufactured to meet a variety of strength grades. Concrete 32 MPa is commonly used in commercial and civil construction, for structural piling, floor slabs, external walls, paths and roads, where increased durability, weather-resistance and load-bearing capacity are required.

Category Concrete and Plaster Products

Type Concrete

Functional unit m³

Specific heat 880 J/(kg·K)

Density 2 327 kg/m³

Common uses

Floor slabs, suspended slabs, precast wall panels, in situ loadbearing walls, structural piling, roads, footpaths

Process name

Concrete 32 MPa, at batching plant/AU U

Input-output sector

Cement, Lime and Ready-Mixed Concrete Manufacturing

Further information

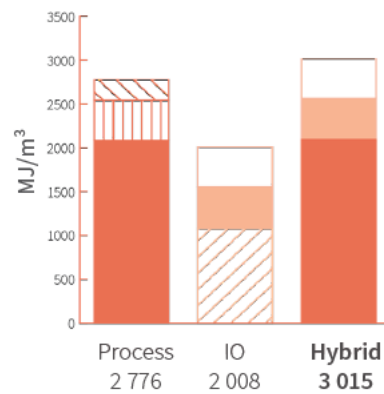
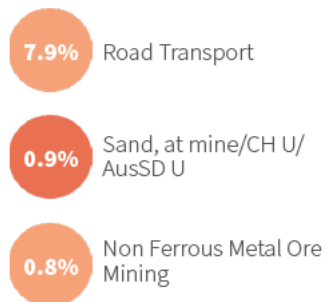
doi.org/10.26188/5da550538b369

Material variations	Unit	Energy (MJ/unit)	Water (L/unit)	GHG emissions (kgCO ₂ e/unit)
Concrete 32 MPa	m ³	3 015	4 300	416
Concrete 32 MPa - 30% fly ash	m ³	2 484	4 066	314
Concrete 32 MPa - 30% GGBFS	m ³	2 704	4 103	331

Figure 50 : Description du matériaux "Concrete 32 MPa" de la base de données EPiC³⁵

³⁵ (Crawford R.H., Stephan A., Prideaux, F., Bontinck P-A., 2020)

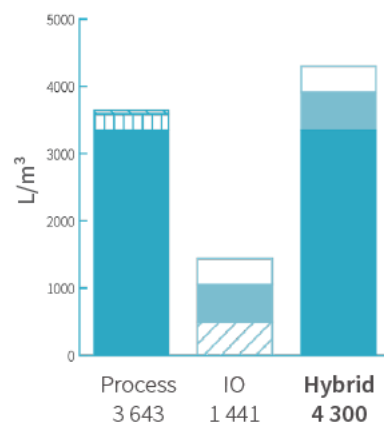
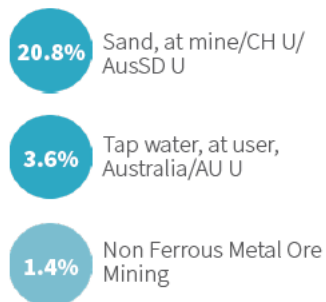
TOP THREE INPUTS



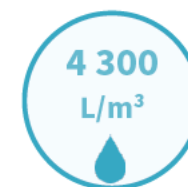
ENERGY



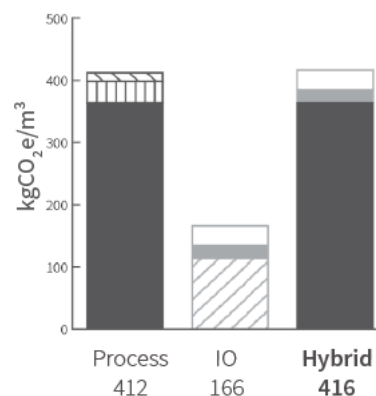
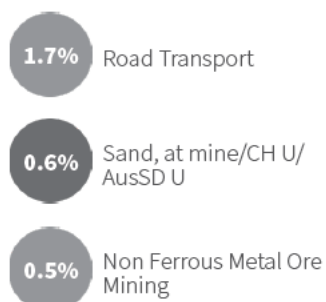
TOP THREE INPUTS



WATER



TOP THREE INPUTS



GREENHOUSE GAS EMISSIONS

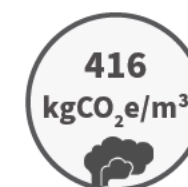


Figure 51 : Données du matériaux "Concrete 32 MPa" de la base de données EPiC³⁶

³⁶ (Crawford R.H., Stephan A., Prideaux, F., Bontinck P-A., 2020)

kg Hot rolled structural steel

Steel is a ferrous metal and is an alloy of iron and carbon, as well as potential other elements. It has a very high tensile strength. Steel has been used in the construction industry for over a century.

The core material for making steel is iron, which is found in iron ore. Iron is extracted from iron ore in blast furnaces through the smelting process, while controlling for the content of carbon. The molten steel is usually further processed before being cast for its final use.

Steel is commonly used in the construction industry, mainly as a structural material. Hot rolled structural steel is used to produce a range of structural elements, such as reinforcement bars, I-beams and railroad tracks.

Category Metals

Type Steel

Functional unit kg

Specific heat 490 J/(kg·K)

Density 7 850 kg/m³

Common uses
Reinforcement bars, beams, railroad tracks

Process name
Steel hot rolled (custom)

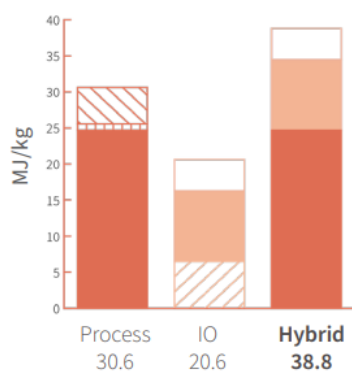
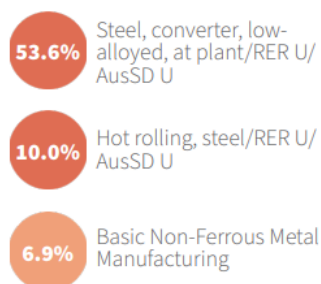
Input-output sector
Structural Metal Product Manufacturing

Further information
doi.org/10.26188/5da55550a40e9

Material variations	Unit	Energy (MJ/unit)	Water (L/unit)	GHG emissions (kgCO ₂ e/unit)
Hot rolled structural steel	kg	38.8	37.1	2.9
Steel reinforcement bar - 6 mm dia.	m	8.6	8.2	0.6
Steel reinforcement bar - 8 mm dia.	m	15.3	14.6	1.1
Steel reinforcement bar - 12 mm dia.	m	34.5	32.9	2.6

Figure 52 : Description du matériaux "Hot rolled structural steel" de la base de données EPiC

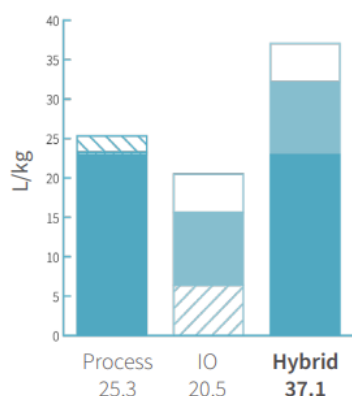
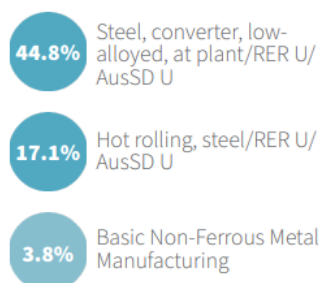
TOP THREE INPUTS



ENERGY



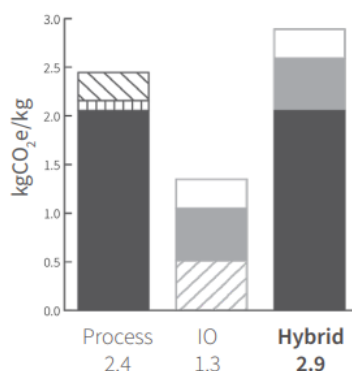
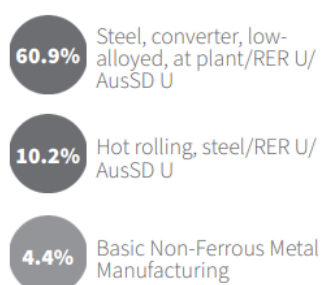
TOP THREE INPUTS



WATER



TOP THREE INPUTS



GREENHOUSE GAS EMISSIONS

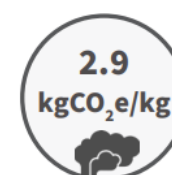


Figure 53 : Données du matériaux "Hot rolled structural steel" de la base de données EPIC³⁷

³⁷ (Crawford R.H., Stephan A., Prideaux, F., Bontinck P-A., 2020)

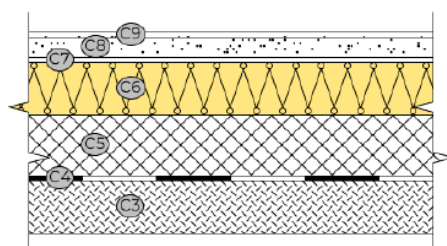
7.2.2 Éléments Totem, bâtiment R+3³⁸

Composition du bâtiment

Composition du bâtiment							
	Nom	Type	Statut	Durée de vie	Valeur U [W/m²K]	Nombre	Impact des matériaux [mPt]
	Plancher						
	Plancher sur sol (13.)+						
	Radier	PS_Coulé sur site_Béton armé_BIB_Neuf_01	Nouveau	≥ 60 ans	0.2	540 m²	14297
	Plancher d'étage (23.)+						
	Mur						
	Mur extérieur (21.)+						
	Voiles	ME_Coulé sur site_Béton armé_BIB_Neuf_02	Nouveau	≥ 60 ans	0.24	336 m²	9082
	Mur-rideau (21.4)+						
	Façades	MR_Profilé_Bois dur_BIB_Neuf_01	Nouveau	≥ 60 ans	1.73	1008 m²	30026
	Toiture						
	Toiture plate (27.1)+						
	Toiture	TP_Coulé sur site_Béton armé_BIB_Neuf_03	Nouveau	≥ 60 ans	0.24	540 m²	6644
	Élément de structure						
	Colonne (28./2)						
	Colonnes	Co_Section carrée - prefab_Béton armé_BIB_Neuf_01	Nouveau	≥ 60 ans		252 m	1070
	Poutre (28./3)						
	Poutres	Co_Section rectangulaire - prefab_Béton armé_BIB_Neuf_02	Nouveau	≥ 60 ans		432 m	4889

7.2.2.1 Plancher sur sol³⁹

PS_Coulé sur site_Béton armé_BIB_Neuf_01



Catégorie:	Plancher sur sol	Référence:	(13.)+
Score environnemental:	31 mPt/UF	Valeur U:	0.2 W/m²K
Épaisseur:	0.47 m		

Composant(s)			
C9	Finition de sol Revêtement		
	Carreaux rigides Céramique émaillée (300x300x10 mm) Collé		
	Nouveau	≥ 60 ans	↓ 0.01 m
			R 0.012 m²K/W
C8	Finition de sol Structure portante		
	Chape Ciment (50 mm)		
	Nouveau	≥ 60 ans	↓ 0.05 m
			R 0.037 m²K/W
C7	Finition de sol Structure portante		
	Treillis Armatures en acier (50x50 Ø 2 mm) A combiner avec une chape		
	Nouveau	≥ 60 ans	↓ 0.002 m
			N.A.
C6	Finition de sol Isolation thermique		
	Mousse PUR (130 mm) Sur dalle		

283/287

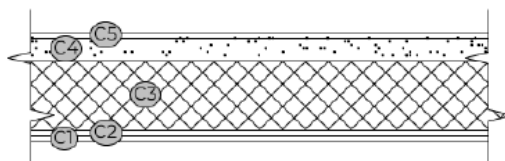
³⁸ Vous retrouverez ces éléments dans la bibliothèque de Totem (Totem - Building, 2023) et la configuration du bâtiment et ses résultats ici (Sion, 2023)

³⁹ Vous retrouverez cet élément dans la bibliothèque de Totem (Totem - Building, 2023)

	Nouveau	Σ ≥ 60 ans	↓ 0.13 m	λ 0.028 W/mK	R 4.6 m²K/W
	Plancher sur sol Dalle				
C5	∞	Coulé sur site Béton armé (150 mm)			
	Nouveau	Σ ≥ 60 ans	↓ 0.15 m		R 0.088 m²K/W
	Plancher sur sol Etanchéité à l'eau				
C4	∞	Feuille d'étanchéité PE (0.2 mm) Pose libre avec chevauchement			
	Nouveau	Σ ≥ 60 ans	↓ 0.0002 m		N.A.
	Plancher sur sol Couche de nivellement				
C3	∞	Remblais Sable compacté (0.13 m³) Mécanique			
	Nouveau	Σ ≥ 60 ans	↓ 0.13 m		N.A.
	Plancher sur sol Nivellement				
C2	∞	Processus de nivellement Sol (m²) Manuel			
	Nouveau	Σ ≥ 60 ans	↓ 1 m²		N.A.
	Plancher sur sol Excavation				
C1	∞	Processus d'excavation Sol (0.3 m³) Mécanique Sans transport			
	Nouveau	Σ ≥ 60 ans	↓ 0.3 m		N.A.
Total			↓ 0.47 m		U 0.2 W/m²K

7.2.2.2 Plancher d'étage⁴⁰

PE_Coulé sur site_Béton armé_BIB_Neuf_01



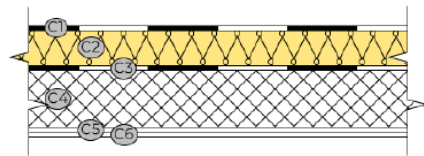
Catégorie:	Plancher d'étage	Référence:	(23.)+
Score environnemental:	21 mPt/UF	Valeur U:	2 W/m²K
Épaisseur:	0.22 m		

Composant(s)					
	Finition de sol Revêtement				
C5	∞	Carreaux rigides Céramique émaillée (300x300x10 mm) Collé			
	Nouveau	Σ ≥ 60 ans	↓ 0.01 m		R 0.012 m²K/W
	Finition de sol Structure portante				
C4	∞	Chape Ciment (50 mm)			
	Nouveau	Σ ≥ 60 ans	↓ 0.05 m		R 0.037 m²K/W
	Plancher Dalle				
C3	∞	Coulé sur site Béton armé (150 mm)			
	Nouveau	Σ ≥ 60 ans	↓ 0.15 m		R 0.088 m²K/W
	Finition de plafond Revêtement				
C2	∞	Enduit épais Plâtre (12 mm)			
	Nouveau	Σ 40 ans	↓ 0.012 m		R 0.023 m²K/W
	Finition de plafond Traitement du revêtement				
C1	∞	Films Peinture acrylique Sur enduit en plâtre			
	Nouveau	Σ 10 ans	↓ 0.0001 m		N.A.
Total			↓ 0.22 m		U 2 W/m²K

⁴⁰ Vous retrouverez cet élément dans la bibliothèque de Totem (Totem - Building, 2023)

7.2.2.3 Toiture⁴¹

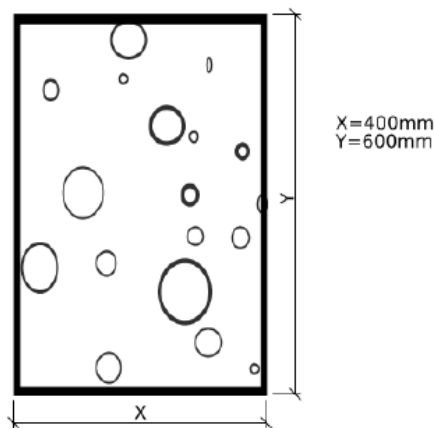
TP_Coulé sur site_Béton armé_BIB_Neuf_03



Catégorie:	Toiture plate	Référence:	(27.1)+
Score environnemental:	19 mPt/UF	Valeur U:	0.24 W/m²K
Epaisseur:	0.26 m		
Composant(s)			
C1	Finition de toiture Revêtement - surfaces horizontales Feuille d'étanchéité EPDM (1.2 mm) Partiellement collé Nouveau Σ ≥ 30 ans ↓ 0.0012 m R 0.0048 m²K/W		
C2	Finition de toiture Isolation thermique - forme de pente Panneau PUR - couche en fibre de verre bitumineux (75-113 mm - moyenne 94 mm) Pose libre A lester Nouveau Σ ≥ 60 ans ↓ 0.094 m λ 0.024 W/mK R 3.9 m²K/W		
C3	Finition de toiture Pare-vapeur Feuille d'étanchéité Bitume - renforcé de fibres de verre (3 mm) Pose libre Nouveau Σ ≥ 60 ans ↓ 0.003 m R 0.013 m²K/W		
C4	Toiture plate Dalle Coulé sur site Béton armé (150 mm) Nouveau Σ ≥ 60 ans ↓ 0.15 m R 0.088 m²K/W		
C5	Finition de plafond Revêtement Enduit épais Plâtre (12 mm) Nouveau Σ ≥ 40 ans ↓ 0.012 m R 0.023 m²K/W		
C6	Finition de plafond Traitement du revêtement Films Peinture acrylique Sur enduit en plâtre Nouveau Σ ≥ 10 ans ↓ 0.0001 m N.A. U 0.24 W/m²K		
Total			

7.2.2.4 Poutre⁴²

Co_Section rectangulaire - prefab_Béton armé_BIB_Neuf_02

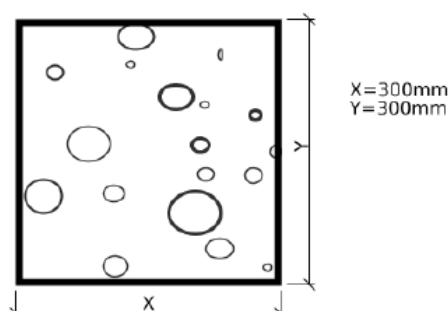


Catégorie:	Poutre	Référence:	(28./3)
Score environnemental:	11 mPt/UF		
Composant(s)			
C1	Ossature Poutre Section rectangulaire - prefab Béton armé (400x600 mm) Nouveau Σ ≥ 60 ans ↓ 0.6 m N.A.		

⁴¹ Vous retrouverez cet élément dans la bibliothèque de Totem (Totem - Building, 2023)
⁴² Vous retrouverez cet élément dans la bibliothèque de Totem (Totem - Building, 2023)

7.2.2.5 Colonne⁴³

Co_Section carrée - prefab_Béton armé_BIB_Neuf_01

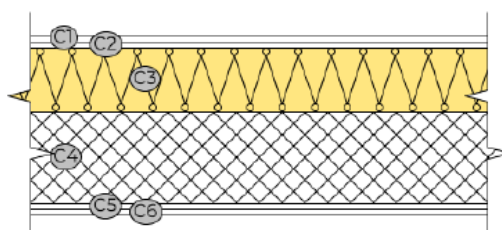


Catégorie: **Colonne** Référence: **(28./2)**
Score environnemental: **4.2 mPt/UF**

Composant(s)				
C1	Ossature Colonne Section carrée - prefab Béton armé (300x300 mm) Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.3 m		N.A.

7.2.2.6 Voiles⁴⁴

ME_Coulé sur site_Béton armé_BIB_Neuf_02



Catégorie: **Mur extérieur** Référence: **(21.)+**
Score environnemental: **33 mPt/UF** Valeur U: **0.24 W/m²K**
Epaisseur: **0.37 m**

Composant(s)				
C1	Mur - finition extérieure Revêtement Carreaux rigides Pierre calcaire (600x300x15 mm) Collé Importé Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.015 m		R 0.0065 m²K/W
C2	Mur - finition extérieure Structure portante Enduit épais Enduit de base renforcée (6 mm) À combiner avec des plaquettes ou des carreaux Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.006 m		N.A.
C3	Mur - finition extérieure Isolation thermique Panneau Laine de roche (140 mm) Collé et fixé avec des chevilles À combiner avec des plaquettes ou des carreaux Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.14 m	λ 0.036 W/mK	R 3.9 m²K/W
C4	Mur extérieur - porteur Partie primaire Coulé sur site Béton armé (200 mm) Nouveau	Σ ≥ 60 ans ↓ 0.2 m		R 0.12 m²K/W
C5	Mur - finition intérieure Revêtement Enduit épais Plâtre (12 mm) Nouveau	Σ 40 ans ↓ 0.012 m		R 0.023 m²K/W
C6	Mur - finition intérieure Traitement du revêtement Films Peinture acrylique Sur enduit en plâtre Nouveau	Σ 10 ans ↓ 0.0001 m		N.A.
Total		↓ 0.37 m		U 0.24 W/m²K

⁴³ Vous retrouverez cet élément dans la bibliothèque de Totem (Totem - Building, 2023)

⁴⁴ Vous retrouverez cet élément dans la bibliothèque de Totem (Totem - Building, 2023)

7.2.2.7 Façades⁴⁵

MR_Profilé_Bois dur_BIB_Neuf_01



Catégorie:	Mur-rideau	Référence:	(21.4)+
Score environnemental:	75 mPt/UF	Valeur U:	1.73 W/m²K
Epaisseur:	0.19 m		

Composant(s)		
C1	Couche composée	R 0.41 m²K/W
a. 11.2%	Mur rideau Ossature	
	Profilé Bois dur (190x50 mm) Vissé Traité - déchets non dangereux Mix belge Nouveau ≥ 60 ans 0.19 m	
b. 88.8%	Mur rideau Remplissage de châssis	
	Vitre Double vitrage de sécurité (29 mm) Nouveau 30 ans 0.029 m	
c. 88.8%	Mur rideau Remplissage de châssis	
	Panneau Aluminium (2x 2 mm) - XPS (25 mm) Nouveau 30 ans 0.029 m	

7.3 Algorithme Grasshopper

7.3.1 Géométrie filaire

L'algorithme Grasshopper sera finalement fourni à part pour éviter de surcharger le document.

7.3.2 Dimensionnement

L'algorithme Grasshopper sera finalement fourni à part pour éviter de surcharger le document.

7.3.3 Analyse de cycle de vie

L'algorithme Grasshopper sera finalement fourni à part pour éviter de surcharger le document.

7.3.4 Série de combinaisons possibles de structure pour une SPU donnée

L'algorithme Grasshopper sera finalement fourni à part pour éviter de surcharger le document.

⁴⁵ Vous retrouverez cet élément dans la bibliothèque de Totem (Totem - Building, 2023)

7.4 Variantes de structures

7.4.1 Variantes pour 2160 m²

7.4.1.1 Configuration 1

Pramètres d'entrée		Configuration 1		2160-SF1008-NE4-HE3,5-L5-l3-T6-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2					
N_étage	4	Nom de l'élément	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément		Ratio m_a/V_tot
h_étage	3,5	Dalles	60	h_d	0,19 [m]	36 [m²]	V_b_d	410,4 [m³]	65
L	5			a_d	15,82 [cm²/m²]		M_a_d	26824 [kg]	
l	3	Poutres intérieures	40	h_pi	0,59 [m]	6 [m]	V_b_pi	35,4 [m³]	120
Trame	6			b_pi	0,25 [m]		M_a_pi	4446 [kg]	
g	1,5			a_pi	23,6 [cm²/m]				
q	3	Poutres extérieures	32	h_pe	0,51 [m]	6 [m]	V_b_pe	19,6 [m³]	120
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,2 [m]		M_a_pe	2163 [kg]	
f_ck_c	30			a_pe	14,35 [cm²/m]				
nv/noyaux	2	Colonnes	72	b_c	0,35 [m]	3,5 [m]	V_b_c	30,9 [m³]	85
				a_c	13,33 [cm²/m]		M_a_c	2637 [kg]	
Nombre de m² total 2160 [m²]		Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	84 [m²]	V_b_pe	67,2 [m³]	52
				a_v	13,13 [cm²/m²]		M_a_pe	3463 [kg]	
Surface de façade 1008 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	540 [m²]	V_b_r	81 [m³]	40
				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	3200 [kg]	

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	491,4	/	217199	308624	142,9		
	BE500 s	/	30,0	91426				
Poutres	C30/37	55,0	/	24303	44428	20,6		
	BE500 s	/	6,6	20125				
Colonnes	C30/37	30,9	/	13645	21674	10,0		
	BE500 s	/	2,6	8029				
Voiles	C30/37	67,2	/	29702	40248	18,6		
	BE500 s	/	3,5	10545				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	644	43	415	1550,00	179	192	275	0,47
Configuration 1		2160-SF1008-NE4-HE3,5-L5-l3-T6-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.1.2 Configuration 2

Pramètres d'entrée			Configuration 2		2160-SF1008-NE3-HE3,5-L9-I5-T4-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2							
N_étage	3		Nom de l'élément	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément			Ratio m_a/V_tot	
h_étage	3,5		Dalles	135	h_d	0,14 [m]	16 [m²]	V_b_d	302,4 [m³]		62	
L	9				a_d	11,02 [cm²/m²]		M_a_d	18686 [kg]			
l	5		Poutres intéri	108	h_pi	0,4 [m]	4 [m]	V_b_pi	25,92 [m³]		136	
Trame	4				b_pi	0,15 [m]		M_a_pi	3578 [kg]			
g	1,5				a_pi	10,55 [cm²/m]						
q	3		Poutres extéri	48	h_pe	0,31 [m]	4 [m]	V_b_pe	8,9 [m³]			
f_ck_d,p,v	30				b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	1158 [kg]			
f_ck_c	30				a_pe	7,68 [cm²/m]						
nv/noyaux	2		Colonnes	162	b_c	0,19 [m]	3,5 [m]	V_b_c	20,5 [m³]		187	
		a_c			8,62 [cm²/m]	M_a_c		3837 [kg]				
Nombre de m² total			Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	42 [m²]	V_b_pe	33,6 [m³]		52	
2160 [m²]					a_v	13,2 [cm²/m²]		M_a_pe	1741 [kg]			
Surface de façade			Radier	1	h_r	0,15 [m]	720 [m²]	V_b_r	108 [m³]		40	
1008 [m²]					a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	4267 [kg]			

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	410,4	/	181397	251288	116,3		
	BE500 s	/	23,0	69891				
Poutres	C30/37	34,8	/	15403	29822	13,8		
	BE500 s	/	4,7	14419				
Colonnes	C30/37	20,5	/	9047	20730	9,6		
	BE500 s	/	3,8	11683				
Voiles	C30/37	33,6	/	14851	20152	9,3		
	BE500 s	/	1,7	5301				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	499	33	322	1201,21	183	149	234	0,47
Configuration 2		2160-SF1008-NE3-HE3,5-L9-I5-T4-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.1.3 Configuration 3

Pramètres d'entrée		Configuration 3		2160-SF1344-NE3-HE3,5-L15-l3-T4-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV4							
N_étage	3	Nom de l'élément	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément		Ratio m_a/V_tot		
h_étage	3,5						V_b_d	302,4 [m³]			
L	15	Dalles	135	h_d	0,14 [m]	16 [m²]	M_a_d	18686 [kg]	62		
l	3			a_d	11,02 [cm²/m²]		M_a_d	18686 [kg]			
Trame	4	Poutres intérieures	84	h_pi	0,4 [m]	4 [m]	V_b_pi	20,16 [m³]	134		
g	1,5			b_pi	0,15 [m]		M_a_pi	2783 [kg]			
q	3			a_pi	10,55 [cm²/m]		M_a_pi	2783 [kg]			
f_ck_d,p,v	30	Poutres extérieures	84	h_pe	0,31 [m]	4 [m]	V_b_pe	15,6 [m³]			
f_ck_c	30			b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	2026 [kg]			
				a_pe	7,68 [cm²/m]		M_a_pe	2026 [kg]			
nv/noyaux	4	Colonnes	168	b_c	0,19 [m]	3,5 [m]	V_b_c	21,2 [m³]	187		
				a_c	8,62 [cm²/m]		M_a_c	3979 [kg]			
Nombre de m² total 2160 [m²]		Voiles de contreventement	8	b_v	0,2 [m]	42 [m²]	V_b_pe	67,2 [m³]	52		
				a_v	13,195 [cm²/m²]		M_a_pe	3480 [kg]			
Surface de façade 1344 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	720 [m²]	V_b_r	108 [m³]	40		
				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	4267 [kg]			

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37 BE500 s	410,4 /	/ 23,0	181397 69891	251288	116,3		
Poutres	C30/37 BE500 s	35,8 /	/ 4,8	15817 14641	30458	14,1		
Colonnes	C30/37 BE500 s	21,2 /	/ 4,0	9382 12116	21498	10,0		
Voiles	C30/37 BE500 s	67,2 /	/ 3,5	29702 10598	40300	18,7		
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	535	35	344	1286,17	233	159	267	0,62
Configuration 3		2160-SF1344-NE3-HE3,5-L15-l3-T4-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV4						

7.4.1.4 Configuration 4

Pramètres d'entrée		Configuration 4		2160,9-SF926,1-NE3-HE3,5-L6-IS-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2									
N_étage	3	Nom de l'élér	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément		Volume/masse total par élément			Ratio m_a/V_tot		
h_étage	3,5							V_b_d	324,1 [m³]				
L	6	Dalles	90	h_d	0,15 [m]	24,01 [m²]		M_a_d	22764 [kg]		70		
l	5	a_d	13,42 [cm²/m²]	M_a_d	22764 [kg]								
Trame	4,9	Poutres intér	72	h_pi	0,47 [m]	4,9 [m]		V_b_pi	33,1632 [m³]		122		
g	1,5			b_pi	0,2 [m]			M_a_pi	4093 [kg]				
q	3			a_pi	14,78 [cm²/m]			M_a_pi	4093 [kg]				
f_ck_d,p,v	30	Poutres extér	30	h_pe	0,41 [m]	4,9 [m]		V_b_pe	9,0 [m³]		148		
f_ck_c	30			b_pe	0,15 [m]			M_a_pe	1048 [kg]				
				a_pe	9,08 [cm²/m]			M_a_pe	1048 [kg]				
nv/noyaux	2	Colonnes	108	b_c	0,24 [m]	3,5 [m]		V_b_c	21,8 [m³]		148		
				a_c	10,84 [cm²/m]			M_a_c	3217 [kg]				
Nombre de m² total		Voiles de contrevente ment	4	b_v	0,2 [m]	51,45 [m²]		V_b_pe	41,16 [m³]		52		
2161 [m²]				a_v	13,1744898 [cm²/m²]			M_a_pe	2128 [kg]				
Surface de façade		Radier	1	h_r	0,15 [m]	720,3 [m²]		V_b_r	108,045 [m³]		40		
926,1 [m²]				a_r	7,55 [cm²/m²]			M_a_r	4269 [kg]				

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	432,2	/	191024	273340	126,5		
	BE500 s	/	27,0	82317				
Poutres	C30/37	42,2	/	18654	34309	15,9		
	BE500 s	/	5,1	15655				
Colonnes	C30/37	21,8	/	9624	19418	9,0		
	BE500 s	/	3,2	9794				
Voiles	C30/37	41,16	/	18193	24674	11,4		
	BE500 s	/	2,1	6481				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	537	38	352	1292,65	171	163	242	0,43
Configuration 4		2160,9-SF926,1-NE3-HE3,5-L6-I5-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.1.5 Configuration 5

Pramètres d'entrée		Configuration 5		2160,9-SF1131,9-NE3-HE3,5-L10-I3-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV4									
N_étage	3	Nom de l'élément	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément			Ratio m_a/V_tot			
h_étage	3,5	Dalles	90	h_d	0,15 [m]	24,01 [m²]	V_b_d	324,1 [m³]	70				
L	10	a_d	13,42 [cm²/m²]	M_a_d	22764 [kg]								
l	3	Poutres intéri	54	h_pi	0,47 [m]	4,9 [m]	V_b_pi	24,8724 [m³]	120				
Trame	4,9			b_pi	0,2 [m]		M_a_pi	3070 [kg]					
g	1,5			a_pi	14,78 [cm²/m]								
q	3	Poutres extér	54	h_pe	0,41 [m]	4,9 [m]	V_b_pe	16,3 [m³]	148				
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	1886 [kg]					
f_ck_c	30			a_pe	9,08 [cm²/m]								
nv/noyaux	4	Colonnes	108	b_c	0,24 [m]	3,5 [m]	V_b_c	21,8 [m³]	148				
				a_c	10,84 [cm²/m]		M_a_c	3217 [kg]					
Nombre de m² total 2161 [m²]		Voiles de contreventement	8	b_v	0,2 [m]	51,45 [m²]	V_b_pe	82,32 [m³]	52				
				a_v	13,1744898 [cm²/m²]		M_a_pe	4257 [kg]					
Surface de façade 1131,9 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	720,3 [m²]	V_b_r	108,045 [m³]	40				
				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	4269 [kg]					

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	432,2	/	191024	273340	126,5		
	BE500 s	/	27,0	82317				
Poutres	C30/37	41,1	/	18186	33277	15,4		
	BE500 s	/	5,0	15091				
Colonnes	C30/37	21,8	/	9624	19418	9,0		
	BE500 s	/	3,2	9794				
Voiles	C30/37	82,32	/	36385	49347	22,8		
	BE500 s	/	4,3	12962				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	577	39	375	1389,25	202	174	267	0,52
Configuration 5		2160,9-SF1131,9-NE3-HE3,5-L10-l3-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV4						

7.4.1.6 Configuration 6

Pramètres d'entrée			Configuration 6		2160-SF1400-NE5-HE3,5-L9-I3-T4-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2									
N_étage	5		Nom de l'élément	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément			Ratio m_a/V_tot			
h_étage	3,5													
L	9		Dalles	135	h_d	0,14 [m]	16 [m²]	V_b_d	302,4 [m³]		62			
l	3				a_d	11,02 [cm²/m²]		M_a_d	18686 [kg]					
Trame	4		Poutres intéri	90	h_pi	0,4 [m]	4 [m]	V_b_pi	21,6 [m³]		135			
g	1,5				b_pi	0,15 [m]		M_a_pi	2981 [kg]					
q	3				a_pi	10,55 [cm²/m]								
f_ck_d,p,v	30		Poutres extéri	80	h_pe	0,31 [m]	4 [m]	V_b_pe	14,9 [m³]		135			
f_ck_c	30				b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	1929 [kg]					
					a_pe	7,68 [cm²/m]								
nv/noyaux	2		Colonnes	170	b_c	0,24 [m]	3,5 [m]	V_b_c	34,3 [m³]		148			
					a_c	10,84 [cm²/m]		M_a_c	5063 [kg]					
Nombre de m² total			Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	70 [m²]	V_b_pe	56 [m³]		52			
2160 [m²]		a_v			13,195 [cm²/m²]	M_a_pe		2900 [kg]						
Surface de façade	1400 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	432 [m²]	V_b_r	64,8 [m³]		40			
					a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	2560 [kg]					

Nombre de m² total
2160 [m²]

Surface de façade
1400 [m²]

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	367,2	/	162302	226996	105,1		
	BE500 s	/	21,2	64694				
Poutres	C30/37	36,5	/	16124	31077	14,4		
	BE500 s	/	4,9	14953				
Colonnes	C30/37	34,3	/	15148	30565	14,2		
	BE500 s	/	5,1	15417				
Voiles	C30/37	56	/	24752	33583	15,5		
	BE500 s	/	2,9	8831				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	494	34	322	1187,15	233	149	257	0,65
Configuration 6		2160-SF1400-NE5-HE3,5-L9-l3-T4-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.1.7 Configuration 7

Pramètres d'entrée		Configuration 7		2160,9-SF1200,5-NE5-HE3,5-L6-l3-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2									
N étage	5	Nom de l'élér	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément			Ratio m_a/V_tot			
h étage	3,5	Dalles	90	h_d	0,15 [m]	24,01 [m²]	V_b_d	324,1 [m³]	70				
L	6			a_d	13,42 [cm²/m²]		M_a_d	22764 [kg]					
l	3	Poutres intéri	60	h_pi	0,47 [m]	4,9 [m]	V_b_pi	27,636 [m³]	121				
Trame	4,9			b_pi	0,2 [m]		M_a_pi	3411 [kg]					
g	1,5			a_pi	14,78 [cm²/m]								
q	3	Poutres extér	50	h_pe	0,41 [m]	4,9 [m]	V_b_pe	15,1 [m³]	97				
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	1746 [kg]					
f_ck_c	30			a_pe	9,08 [cm²/m]								
nv/noyaux	2	Colonnes	110	b_c	0,3 [m]	3,5 [m]	V_b_c	34,7 [m³]	52				
				a_c	11,11 [cm²/m]		M_a_c	3358 [kg]					
Nombre de m² total		Voiles de contrevente ment	4	b_v	0,2 [m]	85,75 [m²]	V_b_pe	68,6 [m³]	40				
2161 [m²]				a_v	13,1744898 [cm²/m²]		M_a_pe	3547 [kg]					
Surface de façade		Radier	1	h_r	0,15 [m]	432,18 [m²]	V_b_r	64,827 [m³]	40				
1200,5 [m²]				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	2561 [kg]					

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37 BE500 s	389,0 /	/ 25,3	171921 77117	249038	115,3		
Poutres	C30/37 BE500 s	42,7 /	/ 5,2	18875 15704	34579	16,0		
Colonnes	C30/37 BE500 s	34,7 /	/ 3,4	15315 10224	25540	11,8		
Voiles	C30/37 BE500 s	68,6 /	/ 3,5	30321 10802	41123	19,0		
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	535	37	350	1285,81	204	162	257	0,56
Configuration 7		2160,9-SF1200,5-NE5-HE3,5-L6-l3-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.1.8 Configuration 8

Pramètres d'entrée			Configuration 8			2160,9-SF1234,8-NE6-HE3,5-L5-l3-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2								
N_étage	6		Nom de l'élément	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément		Volume/masse total par élément		Ratio m_a/V_tot			
h_étage	3,5		Dalles	90	h_d	0,15 [m]	24,01 [m²]		V_b_d	324,1 [m³]	70			
L	5				a_d	13,42 [cm²/m²]			M_a_d	22764 [kg]				
l	3		Poutres intérieures	60	h_pi	0,47 [m]	4,9 [m]		V_b_pi	27,636 [m³]	121			
Trame	4,9				b_pi	0,2 [m]			M_a_pi	3411 [kg]				
g	1,5				a_pi	14,78 [cm²/m]								
q	3		Poutres extérieures	48	h_pe	0,41 [m]	4,9 [m]		V_b_pe	14,5 [m³]				
f_ck_d,p,v	30				b_pe	0,15 [m]			M_a_pe	1676 [kg]				
f_ck_c	30				a_pe	9,08 [cm²/m]								
nv/noyaux	2		Colonnes	108	b_c	0,33 [m]	3,5 [m]		V_b_c	41,2 [m³]	81			
		a_c			11,24 [cm²/m]	M_a_c			3335 [kg]					
Nombre de m² total			Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	102,9 [m²]		V_b_pe	82,32 [m³]	52			
2161 [m²]					a_v	13,1744898 [cm²/m²]			M_a_pe	4257 [kg]				
Surface de façade			Radier	1	h_r	0,15 [m]	360,15 [m²]		V_b_r	54,0225 [m³]	40			
1234,8 [m²]					a_r	7,55 [cm²/m²]			M_a_r	2135 [kg]				

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	378,2	/	167146	242963	112,5		
	BE500 s	/	24,9	75817				
Poutres	C30/37	42,1	/	18609	34100	15,8		
	BE500 s	/	5,1	15492				
Colonnes	C30/37	41,2	/	18195	28350	13,1		
	BE500 s	/	3,3	10156				
Voiles	C30/37	82,32	/	36385	49347	22,8		
	BE500 s	/	4,3	12962				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	544	38	355	1306,54	208	164	261	0,57
Configuration 8		2160,9-SF1234,8-NE6-HE3,5-L5-l3-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.1.9 Configuration 9

Pramètres d'entrée		Configuration 9		2160-SF1512-NE9-HE3,5-L5-l3-T4-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2							
N_étage	9	Nom de l'élér	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément		Volume/masse total par élément		Ratio m_a/V_tot	
h_étage	3,5	Dalles	135	h_d	0,14 [m]	16 [m²]		V_b_d	302,4 [m³]	62	
L	5			a_d	11,02 [cm²/m²]			M_a_d	18686 [kg]		
l	3	Poutres intéri	90	h_pi	0,4 [m]	4 [m]		V_b_pi	21,6 [m³]	135	
Trame	4			b_pi	0,15 [m]			M_a_pi	2981 [kg]		
g	1,5			a_pi	10,55 [cm²/m]						
q	3	Poutres extér	72	h_pe	0,31 [m]	4 [m]		V_b_pe	13,4 [m³]		
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,15 [m]			M_a_pe	1736 [kg]		
f_ck_c	30			a_pe	7,68 [cm²/m]						
nv/noyaux	2	Colonnes	162	b_c	0,33 [m]	3,5 [m]		V_b_c	61,7 [m³]	81	
				a_c	11,24 [cm²/m]			M_a_c	5003 [kg]		
Nombre de m² total 2160 [m²]		Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	126 [m²]		V_b_pe	100,8 [m³]	70	
				a_v	17,945 [cm²/m²]			M_a_pe	7100 [kg]		
Surface de façade 1512 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	240 [m²]		V_b_r	36 [m³]	40	
				a_r	7,55 [cm²/m²]			M_a_r	1422 [kg]		

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	338,4	/	149573	210801	97,6		
	BE500 s	/	20,1	61229				
Poutres	C30/37	35,0	/	15466	29832	13,8		
	BE500 s	/	4,7	14365				
Colonnes	C30/37	61,7	/	27292	42526	19,7		
	BE500 s	/	5,0	15234				
Voiles	C30/37	100,8	/	44554	66172	30,6		
	BE500 s	/	7,1	21619				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	536	37	349	1286,05	247	162	276	0,70
Configuration 9		2160-SF1512-NE9-HE3,5-L5-l3-T4-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.1.10 Configuration 10

Pramètres d'entrée		Configuration 10 2160,9-SF1372-NE10-HE3,5-L3-I3-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2									
N_étage	10	Nom de l'élér	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément		Volume/masse total par élément		Ratio m_a/V_tot	
h_étage	3,5	Dalles	90	h_d	0,15 [m]	24,01 [m²]		V_b_d	324,1 [m³]	70	
L	3			a_d	13,42 [cm²/m²]			M_a_d	22764 [kg]		
l	3	Poutres intéri	60	h_pi	0,47 [m]	4,9 [m]		V_b_pi	27,636 [m³]	121	
Trame	4,9			b_pi	0,2 [m]			M_a_pi	3411 [kg]		
g	1,5			a_pi	14,78 [cm²/m]						
q	3	Poutres extéri	40	h_pe	0,41 [m]	4,9 [m]		V_b_pe	12,1 [m³]	121	
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,15 [m]			M_a_pe	1397 [kg]		
f_ck_c	30			a_pe	9,08 [cm²/m]						
nv/noyaux	2	Colonnes	100	b_c	0,44 [m]	3,5 [m]		V_b_c	67,8 [m³]	56	
				a_c	13,74 [cm²/m]			M_a_c	3775 [kg]		
Nombre de m² total		Voiles de contrevente ment	4	b_v	0,2 [m]	171,5 [m²]		V_b_pe	137,2 [m³]	52	
2161 [m²]				a_v	13,1744898 [cm²/m²]			M_a_pe	7095 [kg]		
Surface de façade		Radier	1	h_r	0,15 [m]	216,09 [m²]		V_b_r	32,4135 [m³]	40	
1372 [m²]				a_r	7,55 [cm²/m²]			M_a_r	1281 [kg]		

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37 BE500 s	356,5 /	/ 24,0	157594 73217	230812	106,9		
Poutres	C30/37 BE500 s	39,7 /	/ 4,8	17543 14641	32184	14,9		
Colonnes	C30/37 BE500 s	67,8 /	/ 3,8	29950 11495	41445	19,2		
Voiles	C30/37 BE500 s	137,2 /	/ 7,1	60642 21603	82245	38,1		
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	601	40	387	1442,77	229	179	285	0,63
Configuration 10		2160,9-SF1372-NE10-HE3,5-L3-l3-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.2 Variantes pour 3000 m²

7.4.2.1 Configuration 1

Pramètres d'entrée		Configuration 1		3000-SF1155-NE3-HE3,5-L8-I5-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2				Longévité du bâtiment	
N_étage	3	Dalles	120	h_d	0,15 [m]	25 [m²]	V_b_d	450,0 [m³]	77
h_étage	3,5			a_d	14,619 [cm²/m²]		M_a_d	34428 [kg]	
L	8	Poutres intér	96	h_pi	0,48 [m]	5 [m]	V_b_pi	46,08 [m³]	126
l	5			b_pi	0,2 [m]		M_a_pi	5969 [kg]	
Trame	5			a_pi	15,84 [cm²/m]				
g	1,5	Poutres extér	42	h_pe	0,42 [m]	5 [m]	V_b_pe	13,2 [m³]	148
q	3			b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	1503 [kg]	
f_ck_d,p,v	30			a_pe	9,12 [cm²/m]				
f_ck_c	30	Colonnes	144	b_c	0,24 [m]	3,5 [m]	V_b_c	29,0 [m³]	148
				a_c	10,84 [cm²/m]		M_a_c	4289 [kg]	
Nombre de m² total		Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	52,5 [m²]	V_b_pe	42 [m³]	52
3000 [m²]				a_v	13,172 [cm²/m²]		M_a_pe	2171 [kg]	
Surface de façade		Radier	1	h_r	0,15 [m]	1000 [m²]	V_b_r	150 [m³]	40
1155 [m²]				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	5927 [kg]	

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37 BE500 s	600,0 /	/ 40,4	265200 122879	388079	129,4		
Poutres	C30/37 BE500 s	59,3 /	/ 7,5	26215 22752	48967	16,3		
Colonnes	C30/37 BE500 s	29,0 /	/ 4,3	12831 13059	25891	8,6		
Voiles	C30/37 BE500 s	42 /	/ 2,2	18564 6612	25176	8,4		
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	730	54	488	1757,06	216	163	235	0,39
Configuration 1		3000-SF1155-NE3-HE3,5-L8-I5-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.2.2 Configuration 2

Pramètres d'entrée		Configuration 2		2999,43-SF1159,2-NE3-HE3,5-L7-I3-T6,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV4									
N_étage	3	Nom de l'élér	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément		Volume/masse total par élément			Ratio m_a/V_tot		
h_étage	3,5	Dalles	63	h_d	0,22 [m]	47,61 [m²]		V_b_d	659,9 [m³]		65		
L	7			a_d	18,22 [cm²/m²]			M_a_d	42900 [kg]				
l	3	Poutres intér	36	h_pi	0,74 [m]	6,9 [m]		V_b_pi	45,954 [m³]		115		
Trame	6,9			b_pi	0,25 [m]			M_a_pi	5772 [kg]				
g	1,5			a_pi	29,6 [cm²/m]								
q	3	Poutres extér	36	h_pe	0,59 [m]	6,9 [m]		V_b_pe	36,6 [m³]				
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,25 [m]			M_a_pe	3705 [kg]				
f_ck_c	30			a_pe	19 [cm²/m]								
nv/noyaux	4	Colonnes	72	b_c	0,36 [m]	3,5 [m]		V_b_c	32,7 [m³]		81		
				a_c	13,38 [cm²/m]			M_a_c	2647 [kg]				
Nombre de m² total		Voiles de contreventement	8	b_v	0,2 [m]	72,45 [m²]		V_b_pe	115,92 [m³]		52		
				a_v	13,1478261 [cm²/m²]			M_a_pe	5982 [kg]				
Surface de façade		Radier	1	h_r	0,15 [m]	999,81 [m²]		V_b_r	149,9715 [m³]		40		
				a_r	7,55 [cm²/m²]			M_a_r	5926 [kg]				

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	809,8	/	357952	506626	168,9		
	BE500 s	/	48,8	148674				
Poutres	C30/37	82,6	/	36506	65363	21,8		
	BE500 s	/	9,5	28857				
Colonnes	C30/37	32,7	/	14435	22495	7,5		
	BE500 s	/	2,6	8060				
Voiles	C30/37	115,92	/	51237	69452	23,2		
	BE500 s	/	6,0	18215				
Structure complète				Masse totale de la structure [t]		Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
		Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Émissions de GES par dép [tCO2e]			
		1041	67	664	2505,20	219	221	294
Configuration 2		2999,43-SF1159,2-NE3-HE3,5-L7-I3-T6,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV4						

7.4.2.3 Configuration 3

Pramètres d'entrée		Configuration 3		3000-SF1260-NE4-HE3,5-L6-I5-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2					
N_étage	4	Dalles	120	h_d	0,15 [m]	25 [m²]	V_b_d	450,0 [m³]	77
h_étage	3,5			a_d	14,62 [cm²/m²]		M_a_d	34430 [kg]	
L	6	Poutres intér	96	h_pi	0,48 [m]	5 [m]	V_b_pi	46,08 [m³]	126
l	5			b_pi	0,2 [m]		M_a_pi	5969 [kg]	
Trame	5			a_pi	15,84 [cm²/m]				
g	1,5	Poutres extér	40	h_pe	0,42 [m]	5 [m]	V_b_pe	12,6 [m³]	110
q	3			b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	1432 [kg]	
f_ck_d,p,v	30			a_pe	9,12 [cm²/m]				
f_ck_c	30	Colonnes	144	b_c	0,28 [m]	3,5 [m]	V_b_c	39,5 [m³]	110
nv/noyaux	2			a_c	11,02 [cm²/m]		M_a_c	4360 [kg]	
Nombre de m² total		Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	70 [m²]	V_b_pe	56 [m³]	52
3000 [m²]				a_v	13,172 [cm²/m²]		M_a_pe	2895 [kg]	
Surface de façade 1260 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	750 [m²]	V_b_r	112,5 [m³]	40
				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	4445 [kg]	

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	562,5	/	248625	367000	122,3		
	BE500 s	/	38,9	118375				
Poutres	C30/37	58,7	/	25937	48471	16,2		
	BE500 s	/	7,4	22534				
Colonnes	C30/37	39,5	/	17465	30741	10,2		
	BE500 s	/	4,4	13276				
Voiles	C30/37	56	/	24752	33568	11,2		
	BE500 s	/	2,9	8816				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	717	54	480	1723,33	224	160	235	0,42
Configuration 3		3000-SF1260-NE4-HE3,5-L6-I5-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.2.4 Configuration 4

Pramètres d'entrée		Configuration 4		3000-SF1540-NE4-HE3,5-L10-I3-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV4					
N_étage	4	Nom de l'élément	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément		Ratio m_a/V_tot
h_étage	3,5						V_b_d	450,0 [m³]	
L	10	Dalles	120	h_d	0,15 [m]	25 [m²]	M_a_d	34430 [kg]	77
l	3			a_d	14,62 [cm²/m²]				
Trame	5	Poutres intérieures	72	h_pi	0,48 [m]	5 [m]	V_b_pi	34,56 [m³]	123
g	1,5			b_pi	0,2 [m]		M_a_pi	4476 [kg]	
q	3			a_pi	15,84 [cm²/m]				
f_ck_d,p,v	30	Poutres extérieures	72	h_pe	0,42 [m]	5 [m]	V_b_pe	22,7 [m³]	110
f_ck_c	30			b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	2577 [kg]	
				a_pe	9,12 [cm²/m]				
nv/noyaux	4	Colonnes	144	b_c	0,28 [m]	3,5 [m]	V_b_c	39,5 [m³]	110
				a_c	11,02 [cm²/m]		M_a_c	4360 [kg]	
Nombre de m² total		Voiles de contreventement	8	b_v	0,2 [m]	70 [m²]	V_b_pe	112 [m³]	52
3000 [m²]				a_v	13,1725 [cm²/m²]		M_a_pe	5791 [kg]	
Surface de façade 1540 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	750 [m²]	V_b_r	112,5 [m³]	40
				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	4445 [kg]	

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	562,5	/	248625	367000	122,3		
	BE500 s	/	38,9	118375				
Poutres	C30/37	57,2	/	25300	46779	15,6		
	BE500 s	/	7,1	21479				
Colonnes	C30/37	39,5	/	17465	30741	10,2		
	BE500 s	/	4,4	13276				
Voiles	C30/37	112	/	49504	67136	22,4		
	BE500 s	/	5,8	17632				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	771	56	512	1854,77	266	171	259	0,51
Configuration 4 3000-SF1540-NE4-HE3,5-L10-l3-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV4								

7.4.2.5 Configuration 5

Pramètres d'entrée		Configuration 5		3001,25-SF1372-NE5-HE3,5-L5-I5-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2									
N_étage	5	Nom de l'élér	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément		Volume/masse total par élément			Ratio m_a/V_tot		
h_étage	3,5	Dalles	125	h_d	0,15 [m]	24,01 [m²]		V_b_d	450,2 [m³]		70		
L	5			a_d	13,42 [cm²/m²]			M_a_d	31617 [kg]				
I	5	Poutres intér	100	h_pi	0,47 [m]	4,9 [m]		V_b_pi	46,06 [m³]		122		
Trame	4,9			b_pi	0,2 [m]			M_a_pi	5685 [kg]				
g	1,5			a_pi	14,78 [cm²/m]								
q	3	Poutres extér	40	h_pe	0,41 [m]	4,9 [m]		V_b_pe	12,1 [m³]				
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,15 [m]			M_a_pe	1397 [kg]				
f_ck_c	30			a_pe	9,08 [cm²/m]								
nv/noyaux	2	Colonnes	150	b_c	0,24 [m]	3,5 [m]		V_b_c	30,2 [m³]		148		
				a_c	10,84 [cm²/m]			M_a_c	4467 [kg]				
Nombre de m² total		Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	85,75 [m²]		V_b_pe	68,6 [m³]		103		
3001 [m²]				a_v	26,3489796 [cm²/m²]			M_a_pe	7095 [kg]				
Surface de façade		Radier	1	h_r	0,15 [m]	600,25 [m²]		V_b_r	90,0375 [m³]		40		
1372 [m²]				a_r	7,55 [cm²/m²]			M_a_r	3558 [kg]				

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37 BE500 s	540,2 /	/ 35,2	238779 107107	345887	115,3		
Poutres	C30/37 BE500 s	58,1 /	/ 7,1	25686 21565	47252	15,8		
Colonnes	C30/37 BE500 s	30,2 /	/ 4,5	13366 13603	26969	9,0		
Voiles	C30/37 BE500 s	68,6 /	/ 7,1	30321 21603	51924	17,3		
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	697	54	472	1677,08	237	157	236	0,46
Configuration 5		3001,25-SF1372-NE5-HE3,5-L5-l5-T4,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.2.6 Configuration 6

Pramètres d'entrée		Configuration 6		2995,38-SF1806-NE6-HE3,5-L9-l3-T4,3-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2									
N_étage	6	Dalles	162	h_d		0,14 [m]		18,49 [m²]	V_b_d		419,4 [m³]		69
h_étage	3,5			a_d		12,22 [cm²/m²]			M_a_d		28734 [kg]		
L	9	Poutres intér	108	h_pi		0,44 [m]		4,3 [m]	V_b_pi		30,6504 [m³]		125
l	3			b_pi		0,15 [m]			M_a_pi		3919 [kg]		
Trame	4,3			a_pi		10,75 [cm²/m]							
g	1,5	Poutres extér	96	h_pe		0,34 [m]		4,3 [m]	V_b_pe		21,1 [m³]		
q	3			b_pe		0,15 [m]			M_a_pe		2528 [kg]		
f_ck_d,p,v	30			a_pe		7,8 [cm²/m]							
f_ck_c	30	Colonnes	204	b_c		0,29 [m]		3,5 [m]	V_b_c		60,0 [m³]		103
nv/noyaux	2			a_c		11,06 [cm²/m]			M_a_c		6199 [kg]		
Nombre de m² total		Voiles de contreventement	4	b_v		0,2 [m]		90,3 [m²]	V_b_pe		72,24 [m³]		64
2995 [m²]				a_v		16,3267442 [cm²/m²]			M_a_pe		4629 [kg]		
Surface de façade		Radier	1	h_r		0,15 [m]		499,23 [m²]	V_b_r		74,8845 [m³]		40
1806 [m²]				a_r		7,55 [cm²/m²]			M_a_r		2959 [kg]		

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37 BE500 s	494,2 /	/ 31,7	218453 96504	314957	105,0		
Poutres	C30/37 BE500 s	51,7 /	/ 6,4	22853 19630	42482	14,2		
Colonnes	C30/37 BE500 s	60,0 /	/ 6,2	26541 18876	45417	15,1		
Voiles	C30/37 BE500 s	72,24 /	/ 4,6	31930 14096	46026	15,3		
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	678	49	449	1628,98	298	150	249	0,60
Configuration 6		2995,38-SF1806-NE6-HE3,5-L9-l3-T4,3-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.2.7 Configuration 7

Pramètres d'entrée		Configuration 7		3000-SF1470-NE6-HE3,5-L5-l4-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2							
N_étage	6	Nom de l'élér	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément		Ratio m_a/V_tot		
h_étage	3,5	Dalles	120	h_d	0,15 [m]	25 [m²]	V_b_d	450,0 [m³]	77		
L	5			a_d	14,62 [cm²/m²]		M_a_d	34430 [kg]			
l	4	Poutres intér	90	h_pi	0,48 [m]	5 [m]	V_b_pi	43,2 [m³]	125		
Trame	5			b_pi	0,2 [m]		M_a_pi	5595 [kg]			
g	1,5			a_pi	15,84 [cm²/m]						
q	3	Poutres extér	48	h_pe	0,42 [m]	5 [m]	V_b_pe	15,1 [m³]			
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	1718 [kg]			
f_ck_c	30			a_pe	9,12 [cm²/m]						
nv/noyaux	2	Colonnes	144	b_c	0,34 [m]	3,5 [m]	V_b_c	58,3 [m³]	77		
				a_c	11,29 [cm²/m]		M_a_c	4467 [kg]			
Nombre de m² total 3000 [m²]		Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	105 [m²]	V_b_pe	84 [m³]	52		
				a_v	13,173 [cm²/m²]		M_a_pe	4343 [kg]			
Surface de façade 1470 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	500 [m²]	V_b_r	75 [m³]	40		
				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	2963 [kg]			

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37 BE500 s	525,0 /	/ 37,4	232050 113863	345913	115,3		
Poutres	C30/37 BE500 s	58,3 /	/ 7,3	25777 22270	48048	16,0		
Colonnes	C30/37 BE500 s	58,3 /	/ 4,5	25752 13601	39353	13,1		
Voiles	C30/37 BE500 s	84 /	/ 4,3	37128 13225	50353	16,8		
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	726	54	484	1743,20	249	161	244	0,49
Configuration 7		3000-SF1470-NE6-HE3,5-L5-l4-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.2.8 Configuration 8

Pramètres d'entrée		Configuration 8		2999,43-SF1352,4-NE7-HE3,5-L3-l3-T6,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2									
N_étage	7	Nom de l'élér	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/surface de l'élément		Volume/masse total par élément			Ratio m_a/V_tot		
h_étage	3,5	Dalles	63	h_d	0,22 [m]	47,61 [m²]		V_b_d	659,9 [m³]		65		
L	3			a_d	18,22 [cm²/m²]			M_a_d	42900 [kg]				
l	3	Poutres intér	42	h_pi	0,74 [m]	6,9 [m]		V_b_pi	53,613 [m³]		117		
Trame	6,9			b_pi	0,25 [m]			M_a_pi	6734 [kg]				
g	1,5			a_pi	29,6 [cm²/m]								
q	3	Poutres extér	28	h_pe	0,59 [m]	6,9 [m]		V_b_pe	28,5 [m³]		46		
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,25 [m]			M_a_pe	2882 [kg]				
f_ck_c	30			a_pe	19 [cm²/m]								
nv/noyaux	2	Colonnes	70	b_c	0,56 [m]	3,5 [m]		V_b_c	76,8 [m³]		46		
				a_c	18,28 [cm²/m]			M_a_c	3516 [kg]				
Nombre de m² total 2999 [m²]		Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	169,05 [m²]		V_b_pe	135,24 [m³]		52		
				a_v	13,1478261 [cm²/m²]			M_a_pe	6979 [kg]				
Surface de façade 1352,4 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	428,49 [m²]		V_b_r	64,2735 [m³]		40		
				a_r	7,55 [cm²/m²]			M_a_r	2540 [kg]				

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37 BE500 s	724,1 /	/ 45,4	320073 138363	458437	152,8		
Poutres	C30/37 BE500 s	82,1 /	/ 9,6	36293 29279	65571	21,9		
Colonnes	C30/37 BE500 s	76,8 /	/ 3,5	33960 10705	44665	14,9		
Voiles	C30/37 BE500 s	135,24 /	/ 7,0	59776 21251	81027	27,0		
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	1018	66	650	2446,92	234	217	295	0,45
Configuration 8		2999,43-SF1352,4-NE7-HE3,5-L3-l3-T6,9-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.2.9 Configuration 9

Pramètres d'entrée		Configuration 9		3000-SF1680-NE8-HE3,5-L5-I3-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2							
N_étage	8	Nom de l'élément	Nombre d'éléments	Dimensions		Longueur/ surface de l'élément	Volume/masse total par élément		Ratio m_a/V_tot		
h_étage	3,5	Dalles	120	h_d	0,15 [m]	25 [m²]	V_b_d	450,0 [m³]	77		
L	5			a_d	14,62 [cm²/m²]		M_a_d	34430 [kg]			
l	3	Poutres intérieures	80	h_pi	0,48 [m]	5 [m]	V_b_pi	38,4 [m³]	124		
Trame	5			b_pi	0,2 [m]		M_a_pi	4974 [kg]			
g	1,5			a_pi	15,84 [cm²/m]						
q	3	Poutres extérieures	64	h_pe	0,42 [m]	5 [m]	V_b_pe	20,2 [m³]	124		
f_ck_d,p,v	30			b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	2291 [kg]			
f_ck_c	30			a_pe	9,12 [cm²/m]						
nv/noyaux	2	Colonnes	144	b_c	0,4 [m]	3,5 [m]	V_b_c	80,6 [m³]	67		
				a_c	13,56 [cm²/m]		M_a_c	5365 [kg]			
Nombre de m² total 3000 [m²]		Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	140 [m²]	V_b_pe	112 [m³]	52		
				a_v	13,172 [cm²/m²]		M_a_pe	5790 [kg]			
Surface de façade 1680 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	375 [m²]	V_b_r	56,25 [m³]	40		
				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	2223 [kg]			

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37	506,3	/	223763	335370	111,8		
	BE500 s	/	36,7	111607				
Poutres	C30/37	58,6	/	25884	48005	16,0		
	BE500 s	/	7,3	22121				
Colonnes	C30/37	80,6	/	35643	51979	17,3		
	BE500 s	/	5,4	16336				
Voiles	C30/37	112	/	49504	67136	22,4		
	BE500 s	/	5,8	17632				
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	757	55	502	1818,14	279	167	260	0,56
Configuration 9		3000-SF1680-NE8-HE3,5-L5-l3-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						

7.4.2.10 Configuration 10

Pramètres d'entrée		Configuration 10		3000-SF1750-NE10-HE3,5-L4-l3-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						
N_étage	10	Dalles	120	h_d	0,15 [m]	25 [m²]	V_b_d	450,0 [m³]		77
h_étage	3,5			a_d	14,62 [cm²/m²]		M_a_d	34430 [kg]		
L	4	Poutres intér	80	h_pi	0,48 [m]	5 [m]	V_b_pi	38,4 [m³]		124
l	3			b_pi	0,2 [m]		M_a_pi	4974 [kg]		
Trame	5			a_pi	15,84 [cm²/m]					
g	1,5	Poutres extér	60	h_pe	0,42 [m]	5 [m]	V_b_pe	18,9 [m³]		
q	3			b_pe	0,15 [m]		M_a_pe	2148 [kg]		
f_ck_d,p,v	30			a_pe	9,12 [cm²/m]					
f_ck_c	30	Colonnes	140	b_c	0,44 [m]	3,5 [m]	V_b_c	94,9 [m³]		56
nv/noyaux	2			a_c	13,74 [cm²/m]		M_a_c	5285 [kg]		
Nombre de m² total 3000 [m²]		Voiles de contreventement	4	b_v	0,2 [m]	175 [m²]	V_b_pe	140 [m³]		51
				a_v	12,911 [cm²/m²]		M_a_pe	7095 [kg]		
Surface de façade 1750 [m²]		Radier	1	h_r	0,15 [m]	300 [m²]	V_b_r	45 [m³]		40
				a_r	7,55 [cm²/m²]		M_a_r	1778 [kg]		

	Matériaux	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [t]	Émission de GES [kgCO2e]	Émission de GES totale [kgCO2e]	Facteur d'impact des éléments / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]		
Dalles	C30/37 BE500 s	495,0 /	/ 36,2	218790 110254	329044	109,7		
Poutres	C30/37 BE500 s	57,3 /	/ 7,1	25327 21685	47012	15,7		
Colonnes	C30/37 BE500 s	94,9 /	/ 5,3	41930 16093	58023	19,3		
Voiles	C30/37 BE500 s	140 /	/ 7,1	61880 21603	83483	27,8		
Structure complète	Volume de béton [m³]	Masse d'acier [kg]	Émission de GES totale [tCO2e]	Masse totale de la structure [t]	Émissions de GES par dép [tCO2e]	Facteur d'émission d'impact de la prod. du bâtiment / m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Facteur d'impact tot du bâtiment par m² SPU [kgCO2e/m² SPU]	Rapport de compacité SF/SPU
	787	56	518	1888,55	289	173	269	0,58
Configuration 10		3000-SF1750-NE10-HE3,5-L4-l3-T5-g1,5-q3-fckd30-fckc30-NV2						
m³ doublon	32,208	m³	0,04091651					
m³ déchet	78,7164	m³	0,05908349					

8 Table des figures

Figure 1: Étapes du cycle de vie d'un bâtiment (Tchakorom, 2023).....	4
Figure 2 : Catégories d'impact considérées par Totem	6
Figure 3 : Composant "Mur extérieur" de Totem	7
Figure 4 : Résumé de la méthode hybride pour le calcul des coefficients EPiC (source : 7)	9
Figure 5a : Vue en plan schématique & Figure 5b : Modèle 3D du bâtiment	11
Figure 6 : Schéma statique et allure du moment repris par la dalle.....	14
Figure 7 : Contraintes et déformations dans une section rectangulaire fléchie	15
Figure 8 : Forces résultantes de traction et compression dans une section rectangulaire fléchie	17
Figure 9a : Schéma simplifié du plan du bâtiment & Figure 9b : Vue 3D du bâtiment avec les poutres extérieures en rouge	19
Figure 10 : Représentation des bielles - tirants dans une poutre (ligne pointillée = compression, ligne pleine = traction).....	22
Figure 11 : Schéma de principe fonctionnement poutre – colonne	25
Figure 12 : Schéma statique de la colonne	25
Figure 13 : Moments repris par la colonne.....	28
Figure 14 : Diagramme d'interactions pour les classe de béton C12 à C50 et l'acier BE500 S considérant une section symétrique rectangulaire	29
Figure 15a : Voiles situés aux coins opposés du bâtiment & Figure 15b : Voiles situés au centre.....	31
Figure 16 : Schéma statique du voile et ses efforts internes	33
Figure 17 : Part d'émissions des GES des différentes poutres du bâtiment.....	37
Figure 18 : Émissions de GES par éléments de la structure "bâtiment R+3"	37
Figure 19 : Étape 1 - Création d'un bâtiment dans Totem.....	39
Figure 20 : Étape 2 - Création d'un bâtiment dans Totem.....	40
Figure 21 : Étape 3 - Création d'un bâtiment dans Totem.....	40
Figure 22 : Histogramme de l'impact des étapes du cycle de vie en terme d'émissions de GES	42
Figure 23 : Histogramme de l'impact des matériaux vs l'énergie du bâtiment en terme d'émissions de GES	42
Figure 24 : Exemple de deux variantes de structures composées de "modules carrés" ayant la même surface de planchers utiles (SPU).....	46
Figure 25 : Paramètres d'entrées du modèle Grasshopper	48
Figure 26 : Schéma du positionnement des voiles de contreventement pour moins de 40 m (à gauche) et pour plus de 40 m (à droite)	49
Figure 27 : Algorithme pour générer une structure en béton armé sur Grasshopper	49
Figure 28 : Représentation d'une cellule qui prend des paramètres d'entrée (sur fond rosé) et fournit les lignes représentant les poutres (sur fond vert).....	50
Figure 29 : Vue d'ensemble du bloc de la géométrie du bâtiment.....	50
Figure 30 : Maillage du périmètre du bâtiment pour chaque étage	51
Figure 31 : Définition des poutres et colonnes dans la géométrie filaire du bâtiment	52
Figure 32 : Suppression des poutres et colonnes superposées avec les voiles de contreventement..	52
Figure 33 : Définition des dalles de la structure (à gauche) et des voiles de contreventement (à droite)	53
Figure 34 : Géométrie filaire de la structure du bâtiment.....	53
Figure 35 : Vue d'ensemble de la partie dimensionnement de l'algorithme Grasshopper	54
Figure 36 : Cellule de dimensionnement des dalles	54
Figure 37 : Cellule de dimensionnement des poutres	55

Figure 38 : Cellule de dimensionnement des colonnes	56
Figure 39 : Valeur de ω en fonction de $\nu Rd = 1$ et μRd via le diagramme d'interaction Figure 14 ...	57
Figure 40 : Cellule de dimensionnement des voiles de contreventement	57
Figure 41 : Vue d'ensemble du bloc générant l'analyse de cycle de vie du bâtiment	59
Figure 42 : Cellule de "création" des éléments, ici les dalles.....	60
Figure 43 : Résultats de l'analyse de cycle de vie sur Grasshopper.....	61
Figure 44 : Graphe de l'impact des émissions de gaz à effet de serre dû aux éléments et leurs matériaux	62
Figure 45 : Cellule des différentes combinaisons possibles pour une même surface de plancher utile (SPU) - Grasshopper	65
Figure 46 : Graphe représentant les émissions de GES totales par variantes de la structure pour une même surface de plancher utile 2160 m ²	67
Figure 47 : Graphe représentant les émissions de GES totales par variantes de la structure pour une même surface de plancher utile 3000 m ²	75
Figure 48 : Allure du paramètre volumétrique et du paramètre lié à la trame pour différentes variantes de structure classées de la moins à la plus impactante en terme d'émissions de GES	78
Figure 49 : Allures des paramètres : de compacité Cf et volumétrique Vb pour différentes variantes de structure classées de la moins, à la plus impactante en terme d'émissions de GES	80
Figure 50 : Description du matériaux "Concrete 32 MPa" de la base de données EPiC.....	95
Figure 51 : Données du matériaux "Concrete 32 MPa" de la base de données EPiC	96
Figure 52 : Description du matériaux "Hot rolled structural steel" de la base de données EPiC	97
Figure 53 : Données du matériaux "Hot rolled structural steel" de la base de données EPiC	98

9 Table des tableaux

Tableau 1 : Classe de béton utilisée et ses caractéristiques.....	12
Tableau 2 : Acier utilisé et ses caractéristiques	12
Tableau 3 : Récapitulatif du cas de charge à l'ELU pour les dalles	14
Tableau 4 : Récapitulatif du cas de charge à l'ELS pour les dalles	16
Tableau 5 : Récapitulatif des caractéristiques des dalles	18
Tableau 6 : Récapitulatif des caractéristiques du radier	19
Tableau 7 : Récapitulatif des charges reprises par les poutres	20
Tableau 8 : Dimensions des poutres calculées à l'ELU.....	21
Tableau 9 : Récapitulatif des flèches des poutres	21
Tableau 10 : Récapitulatif des armatures longitudinales des poutres	21
Tableau 11 : Récapitulatif des résistances aux efforts tranchants des poutres sans armature transversales	22
Tableau 12 : Récapitulatif des résistances maximum à l'effort tranchant avec une inclinaison de bielle correspondant à $\cot \theta = 2$	23
Tableau 13 : Récapitulatifs des étriers pour les poutres	23
Tableau 14 : Récapitulatif des caractéristiques des poutres	24
Tableau 15 : Récapitulatif des charges d'un étage revenant sur une colonne	26
Tableau 16 : Récapitulatif des caractéristiques des colonnes	30
Tableau 17 : Charges verticales les plus critiques reprises par le voile	33
Tableau 18 : Récapitulatif des caractéristiques des voiles	34
Tableau 19 : Métré de la structure du bâtiment R+3	35
Tableau 20 : Récapitulatif des impacts environnementaux du bâtiment R+3.....	36
Tableau 21 : Facteur d'impact d'émissions de GES par type d'élément.....	38
Tableau 22 : Facteurs d'émissions de GES pour les différents matériaux	38
Tableau 23 : Impact de chaque étape du cycle de vie du bâtiment R+3	41
Tableau 24 : Comparaison des éléments évalués à l'aide d'EPiC et dans Totem au niveau de l'étape de production des matériaux.....	43
Tableau 25 : Différentes combinaisons de structure qui ont 2160 m ² de SPU.....	66
Tableau 26 : Classement des configurations de structure (SPU 2160 m ²) en fonction du paramètre volumétrique Vb	69
Tableau 27 : Concentration en armatures des éléments de la structure n°3 et n°7 (SPU 2160m ²).....	70
Tableau 28 : Classement des variantes de structure (SPU 2160m ²) en fonction du paramètre de compacité C	71
Tableau 29 : Classement des variantes de structure (SPU 2160m ²) en fonction du paramètre de compacité des façades Cf	71
Tableau 30: Caractéristiques des variantes de structure (pour une SPU de 2160 m ²) classées de la moins à la Nombre plus émissive de GES	72
Tableau 31 : Différentes combinaisons de structure qui ont 3000 m ² de SPU.....	74
Tableau 32 : Caractéristiques des variantes de structure (pour une SPU de 3000 m ²) classées de la moins à la plus émissive de GES.....	76
Tableau 33 : Classement des configurations de structure (SPU 3000 m ²) en fonction du paramètre volumétrique Vb	77
Tableau 34 : Classement des configurations de structure (SPU 3000m ²) en fonction du paramètre de compacité des façades Cf	77

Tableau 35 : Émissions de GES par m ³ d'élément structurel, calculées sur base d'une moyenne de 10 configurations de structure avec 2160m ² SPU	83
---	----

10 Bibliographie

- Altermaker. (2015). *Analyse de cycle de vie : définition et exemple*. Consulté le mai 05, 2023, sur Altermaker.fr: <https://altermaker.fr/analyse-cycle-de-vie/>
- Build Green. (2023, mai). *Consommation d'énergie : calcul des déperdition thermique*. Récupéré sur Build Green: <https://www.build-green.fr/consommation-denergie-calcul-des-deperditions-thermiques/>
- Cap, J.-F. (s.d.). LGCIV1032 Structure en béton armé. *LAUCE2031 Calcul organique du béton séance 1 à 10*. Louvain-la-Neuve: UCLouvain.
- Crawford R.H., Stephan A., Prideaux, F., Bontinck P-A. (2020). Environmental Performance in Construction (EPiC) Database. *detailed dataset for Concrete 32 MPa - 30% fly ash*. Melbourne: The University of Melbourne.
- Crawford, R.H., Stephan, A. and Prideaux, F. (2019). Environmental Performance in Construction (EPiC) Database. *A database of embodied environmental flow coefficients*. Melbourne: The University of Melbourne.
- Crawford, R.H., Stephan, A., Prideaux, F. and Bontinck, P-A. (2020). Environmental Performance in Construction (EPiC) Database. *detailed dataset for Hot rolled structurale steel*. Melbourne: The University of Melbourne.
- Ecoinvent. (2019, septembre). *Ecoinvent 3.6*. Récupéré sur ecoinvent.org: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/data-releases/ecoinvent-3-6/>
- Electricity maps. (2023, mai). *Impact carbone du kWh d'électricité en Belgique*. Récupéré sur Electricity maps: <https://app.electricitymaps.com/map>
- GIEC. (2023, mars). *Rapport de synthèse du GIEC, sixième cycle d'évaluation*. Récupéré sur climat.be: <https://climat.be/changements-climatiques/changements-observees/rapports-du-giec/2023-rapport-de-synthese>
- Inies. (s.d.). *L'ACV bâtiment*. Consulté le mai 05, 2023, sur inies.fr: <https://www.inies.fr/inies-pour-le-batiment/lacv-batiment/>
- Latteur, P. (2019). Synthèse des sollicitations de vent suivant EN-1991-1-4 résumé. *LGCIV2011 Projet bâtiment*. Louvain-la-Neuve.
- P. Latteur, T. Vandenbergh, D. Zastavni. (2019). LGCIV2011 Projet Bâtiment. *Synthèse des méthodes de prédimensionnement acier-béton*. Louvain-la-Neuve: UCLouvain.
- Sion, M. (2023, mai). *Bâtiment R+3 pilote - ID 2023001872*. Récupéré sur Totem-building: <https://www.totem-building.be/pages/user/library.xhtml?l=PROJECT&s=KDz1J36i6CYHDAGVpzv132hNke2S2MeP>
- Tchakorom, F. (2023, Janvier). *L'analyse de cycle de vie*. Consulté le mai 05, 2023, sur oneclicklca.com: <https://oneclicklca.zendesk.com/hc/en-us/categories/360002633520-Building-LCA>
- Totem - Building. (2023, mai). *Bibliothèque d'éléments*. Récupéré sur Totem - Building: <https://www.totem-building.be/pages/home.xhtml>

Totem - building. (2023, mars). *FAQ - Utilisation de l'outil Totem*. Récupéré sur Totem-building.be:
<https://www.totem-building.be/pages/faq.xhtml>

Vandormael, L. (2019). Le béton, une industrie émettrice de CO2 : quelles sont les solutions pour des constructions durables ? *RTBF*.

Vert. (2022, 02 01). *Les émissions de CO2 par personne et par pays en un graphique*. Récupéré sur
vert: <https://vert.eco/articles/les-emissions-de-co2-par-personne-et-par-pays-en-un-graphique>

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl