

Master thesis : Comparaison des impacts environnementaux d'une structure biomimétique et d'une structure en poteaux-poutres béton d'un bâtiment tertiaire

Auteur : Hanocq, Thi Mai

Promoteur(s) : Attia, Shady

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil architecte, à finalité spécialisée en ingénierie architecturale et urbaine

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9091>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège - Faculté des sciences appliquées

Comparaison des impacts environnementaux d'une structure biomimétique et d'une structure en poteaux-poutres béton d'un bâtiment tertiaire

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de master Ingénieur
Civil Architecte par HANOCQ Thi Mai

Année académique 2019 – 2020

Promoteur : ATTIA Shady

Composition du Jury : ELSÉN Catherine, REITER Sigrïd

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon promoteur Monsieur Shady Attia pour son suivi régulier, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail ainsi que Monsieur Guirec Ruellan pour ses conseils également.

Je souhaiterais remercier mes lecteurs et membres du jury Madame Catherine Elsen et Madame Sigrid Reiter pour l'attention et le temps qu'elles consacreront à la lecture de mon travail.

De plus, j'aimerais remercier Monsieur Sylvain Hostaux pour son investissement et son aide précieuse.

Ensuite, je remercie toutes les personnes qui m'ont aidée lors de mon travail, en me partageant leur opinion ou en m'accordant un peu de leur temps pour la relecture.

Finalement, mes remerciements vont à ma famille et à mes amis qui m'ont soutenue tout au long de mes études.

Résumé

Les bâtiments ont un impact négatif considérable sur l'environnement. Plusieurs outils et concepts sont développés pour pousser le secteur du bâtiment vers des solutions plus durables, notamment le biomimétisme, l'inspiration tirée de la nature, visant à solutionner un problème de façon durable.

Cette étude a pour but de démontrer, sur base des connaissances actuelles, si la structure biomimétique du bâtiment tertiaire de grande hauteur étudié a un impact environnemental moindre ou supérieur à une structure classique pour le même type d'infrastructure, et donc, si le biomimétisme a permis de construire une structure plus efficiente.

L'analyse de cycle de vie permet une comparaison entre les impacts environnementaux de produits ou de services orientant le concepteur vers un choix environnemental responsable.

Au travers de la norme NBN EN 15978 *Contribution des ouvrages de construction au développement durable — Évaluation de la performance environnementale des bâtiments — Méthode de calcul*, les impacts environnementaux des structures sont déterminés selon 7 indicateurs environnementaux : le réchauffement climatique (GWP), le potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP), le potentiel d'acidification du sol et de l'eau (AP), le potentiel d'eutrophisation (EP), le potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone stratosphérique (POCP), le potentiel de dégradations abiotiques des ressources pour les éléments (ADP_éléments) et le potentiel de dégradations abiotiques des combustibles fossiles (ADP_fossiles).

Les résultats obtenus à l'issue de l'analyse de cycle de vie des structures étudiées montrent que, pour les paramètres étudiés, les hypothèses et limites que nous avons imposées, la structure « biomimétique » en acier-béton a des impacts environnementaux supérieurs à la structure « classique » poteaux-poutres en béton.

Mots clés : biomimétisme, analyse de cycle de vie, impacts environnementaux, acier, béton

Abstract

The buildings have a significant negative impact on the environment. Several tools and concepts have been developed to encourage the building sector towards more sustainable solutions such as the biomimicry, the inspiration from nature, to solve a problem in a sustainable way.

The aim of this study is to demonstrate, on basis of the current knowledge, whether the biomimetic structure of the tertiary high-rise building studied has a lower or higher environmental impact than a conventional structure for the same type of infrastructure, and so, if biomimicry has made it possible to build a more efficient structure.

The life cycle analysis allows a comparison between the environmental impacts of products or services that guide the developer to a responsible environmental choice.

In accordance with the standard NBN EN 15978 *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method*, the environmental impacts of the structures are determined according to 7 environmental indicators: global warming (GWP), stratospheric ozone depletion potential (ODP), soil and water acidification potential (AP), eutrophication potential (EP), photochemical ozone creation potential (POCP), the abiotic depletion potential for elements (ADP_elements) and the abiotic depletion potential for fossil fuels (ADP_fossiles).

The results obtained from the life cycle analysis of the structures studied show that, for the studied parameters, the hypothesis and the limits that we imposed, the "biomimetic" steel-concrete structure has environmental impacts greater than the "conventional" concrete beam-post structure.

Keywords : biomimicry, life cycle assessment, environmental impacts, steel, concrete

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Abstract	III
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VIII
Liste des acronymes	IX
Chapitre 1: Introduction	1
Chapitre 2: État de l'art.....	6
2.1 Biomimétisme.....	6
2.2 Analyse de cycle de vie	10
2.3 Études similaires	21
Chapitre 3: Méthodologie	26
3.1 Question de recherche	26
3.2 Stratégie de recherche	26
3.3 Récolte de données	27
3.4 Traitement des données.....	30
3.5 Validation des données	37
3.6 Limites de la méthodologie.....	38
3.7 Comparaison et validation de la méthodologie	38
Chapitre 4: Cas d'étude et quantification de matériaux.....	40
4.1 La Tour D2	40
4.2 La tour fictive « classique » en poteaux-poutres béton.....	46
4.3 Caractéristiques physiques des cas d'étude.....	48
Chapitre 5: Résultats	50
5.1 Comparaison des quantifications des matériaux des cas d'étude.....	50
5.2 Résultats des ACV	51
5.3 Comparaison des éléments des structures.....	60
Chapitre 6: Discussion.....	67
6.1 Résumé des résultats obtenus et recommandations	67
6.2 Validation – comparaison avec d'autres travaux.....	75
6.3 Forces et limites de la recherche.....	78

6.4 Répercussions du travail	79
6.5 Conclusion de la discussion	80
Chapitre 7: Conclusion	81
Bibliographie	82
Annexe 1 : Scénarios tirés des FDES.....	88
Annexe 2 : Plans et coupes – Matériaux utilisés - Note de calcul du prédimensionnement du cas 2.....	94
Annexe 3 : Quantification des matériaux.....	136
Annexe 4 : Contribution des éléments à l'ACV.....	137
Annexe 5 : Impacts environnementaux par kg de matériaux.....	158

Liste des figures

Figure 1-1 : Sustainable Development Goals (United Nations)	1
Figure 1-2 : Cadre conceptuel de la recherche	3
Figure 2-1 : Les 3 niveaux d'imitation du vivant (CEEBIOS, 2018)	7
Figure 2-2 : Dessin d'une machine volante (Léonard De Vinci, 1488).....	7
Figure 2-3 : Projet Ecotone (Compagnie de Phalsbourg)	9
Figure 2-4 : Piliers du développement durable (Université de Limoges)	10
Figure 2-5 : Phases de l'ACV (ISO, 2006)	12
Figure 2-6 : Modules et phases du cycle de vie (CEN, 2011).....	13
Figure 2-7 : Schéma explicatif du réchauffement climatique (JMGoglin, 2018).....	16
Figure 2-8 : Schéma explicatif de la destruction de la couche d'ozone (Tanveer Taj)	17
Figure 2-9 : Schéma explicatif de l'acidification du sol et de l'eau (Pidwirny, 2006).....	17
Figure 2-10 : Schéma explicatif de l'eutrophisation (Project eutrophication).....	18
Figure 2-11 : Photo représentative du smog photochimique (Wikipédia, 2005)	18
Figure 2-12 : Photo représentative de la dégradation des ressources abiotiques pour les éléments (AP/SIPA, 2006)	19
Figure 2-13 : Photo représentative de la dégradation abiotique des combustibles fossiles (THINKSTOCK).....	19
Figure 3-1 : Cadre conceptuel de la recherche	27
Figure 3-2 : Schéma de processus utilisé pour l'évaluation de la performance environnementale (CEN, 2011).....	31
Figure 3-3 : Frontières du système (CSTC, 2013)	33
Figure 3-4 : Modèle de la partie du bâtiment étudiée (inspiration (CEN, 2011.)).....	34
Figure 3-5 : Principe de calcul matriciel des impacts environnementaux (CEN, 2011).....	37
Figure 4-1 : La Tour D2 (Pibrac P-E et Urquijo F).....	40
Figure 4-2 : Jardin des nuages de la Tour D2 (Mathieu Ducros).....	41
Figure 4-3 : Exostructure de la Tour D2 (Mathieu Ducros)	42
Figure 4-4 : Structure métallique de la Tour D2 (Construire Acier).....	42
Figure 4-5 : Périoste de l'os (Santé médecine.net).....	43
Figure 4-6 : Structure du périoste de l'os (Sarah Lemonier, 2015)	43
Figure 4-7: Schéma 3D de la Tour D2 (cas 1)	44
Figure 4-8 : Étage type de la Tour D2 (Anthony Bechu et Tom Sheehan)	44
Figure 4-9 : Schéma 3D du cas 2.....	47
Figure 4-10 : Étage type du cas 2.....	47
Figure 5-1 : Comparaison du poids de la structure	51
Figure 5-2 : Comparaison des impacts environnementaux (totaux)	55
Figure 5-3 : Comparaison des impacts environnementaux - Étape D prise en compte	56
Figure 5-4 : Comparaison GWP	58
Figure 5-5 : Comparaison des éléments verticaux (total ACV)	60

<i>Figure 5-6 : GWP - contribution des éléments - Cas 1</i>	61
<i>Figure 5-7 : GWP - contributions des éléments - Cas 2</i>	61
<i>Figure 5-8 : Comparaison des systèmes de plancher</i>	62
<i>Figure 5-9 : Comparaison des noyaux</i>	63
<i>Figure 5-10 : Comparaison des radiers</i>	63
<i>Figure 5-11 : Comparaison des fondations</i>	64
<i>Figure 6-1 : Composition de la structure - cas 1</i>	68
<i>Figure 6-2 : Composition de la structure - cas 2</i>	68
<i>Figure 6-3 : GWP [kg éq. CO2/kg/m²/an] – cas 1</i>	70
<i>Figure 6-4 : GWP [kg éq. CO2/kg/m²/an] - cas 2</i>	70
<i>Figure 6-5 : Hy-Fi par The Living - source : https://www.dezeen.com/2014/07/01/tower-of-grown-bio-bricks-by-the-living-opens-at-moma-ps1-gallery/</i>	75
<i>Figure 6-6 : Aperçu des résultats des études comparant des structures en béton, en acier et en bois selon le GWP (Saade, Guest, & Amor, 2020)</i>	76
<i>Figure 6-7 : Résultats de l'étude de KULeuven</i>	77
<i>Figure 6-8 : Résultats obtenus par PwC et CIMbéton (CIMbéton, 2011)</i>	78

Liste des tableaux

<i>Tableau 2-1 : Principaux programmes EPD en Europe (CSTC, 2016)</i>	21
<i>Tableau 3-1 : indicateurs environnementaux</i>	36
<i>Tableau 4-1 : Fiche d'identité de la Tour D2 (Bechu + Associés, s.d, batiactu, 2013)</i>	40
<i>Tableau 5-1 : Résultats de ACV de la structure de la Tour D2 selon l'unité fonctionnelle</i>	52
<i>Tableau 5-2 : Résultats de l'ACV de la structure de la tour fictive en béton selon l'unité fonctionnelle</i>	54
<i>Tableau 5-3 : Tableau récapitulatif des résultats</i>	59
<i>Tableau 7 : Résultats récapitulatifs des impacts environnementaux totaux par éléments</i>	65
<i>Tableau 6-1 : Éléments défavorables par kg</i>	69

Liste des acronymes

ACV : analyse de cycle de vie

ADP_éléments : potentiel de dégradation abiotique des ressources pour les éléments

ADP_fossiles : potentiel de dégradation abiotique des combustibles fossiles

AP : potentiel d'acidification du sol et de l'eau

EP : potentiel d'eutrophisation

EPD : Déclaration Environnementale de Produit ou Environmental Product Declaration (en anglais)

FDES : Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire

GWP : potentiel de réchauffement climatique

ODP : potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique

POCP : potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique

Chapitre 1: Introduction

Le réchauffement climatique et la dégradation de l'environnement sont de réels problèmes mondiaux au centre des préoccupations ces dernières années et le secteur de la construction y contribue.

En effet, le secteur de la construction a un effet négatif non négligeable sur l'environnement puisque dans les pays développés, 40 % des émissions de CO₂, 37 % de la consommation d'énergie et 40 % des déchets produits sont issus de l'industrie du bâtiment (Deshayes, 2012). De plus, 24 % de l'extraction de matières premières sont causés par l'industrie du bâtiment (Zabalza Bribián, Valero Capilla, & Aranda Usón, 2011).

C'est pour répondre à cette problématique qu'il est important de promouvoir le développement durable en construction.

Par exemple, rendre les villes plus durables est un des 17 objectifs de développement durable de l'Agenda 2030 adopté par les Nations Unies. Comme le montre la Figure 1-1, « sustainable cities and communities » est le 11^{em}e objectif sur 17 que les Nations Unies se sont fixés pour 2030. En effet, plus de la moitié de la population mondiale vit dans les villes et, dans les années futures, ce nombre ne fera qu'augmenter (United Nations, s. d.). L'Union européenne est bien déterminée à mettre en œuvre ces 17 objectifs (European Commission, 2015).



Figure 1-1 : Sustainable Development Goals (United Nations)

Ensuite, pour répondre aux objectifs du pacte vert pour l'Europe mis en place en 2019, la Commission européenne veut améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments dans le but d'atteindre la neutralité carbone à travers l'Europe en 2050. Pour encourager cela, des subventions ont été mises en place afin de promouvoir les bonnes pratiques.

Cet objectif a mené à la révision des directives 2010/31/UE et 2012/27/UE, portant respectivement sur la performance énergétique des bâtiments et l'efficacité énergétique. En

2018, cela a permis de diminuer de 50 % la consommation énergétique des bâtiments neufs par rapport à la consommation des années 1980 (Commission européenne, 2020).

De plus, dans cette optique de développement durable et de diminution de la consommation d'énergie et des ressources naturelles, des labels écologiques tels que BREEAM ou LEED ont vu le jour. Les bâtiments certifiés BREEAM consomment de 6 à 30 % d'énergie en moins qu'un bâtiment non certifié et les bâtiments certifiés LEED consomment 18 à 39 % d'énergie en moins qu'un bâtiment sans certification (Doan et al., 2017).

Le biomimétisme est un autre domaine exploité de plus en plus ces dernières années. Le biomimétisme est défini comme la recherche d'inspiration dans la nature dans le but de développer une solution durable. Mais les procédés biomimétiques sont-ils réellement efficaces ? Ne s'agit-il pas plutôt de critères marketing, de greenwashing ? Un bâtiment dit biomimétique possède-t-il de meilleures performances énergétiques qu'un bâtiment classique ? C'est à ces questions que je tenterai de répondre dans ce travail.

Le but de ce travail est donc de vérifier si le biomimétisme peut être un critère de durabilité d'un bâtiment. Cependant, ce travail portera uniquement sur le pilier environnemental de la durabilité. Le but sera donc de vérifier l'impact de ce concept sur les performances environnementales d'un bâtiment, et donc, de vérifier si les « procédés » biomimétiques jouent seulement un rôle sur l'esthétique ou la symbolique du bâtiment ou s'ils impactent favorablement les performances environnementales.

Plusieurs objectifs sont à atteindre. En premier lieu, le choix des cas d'étude, ensuite la récolte d'informations sur les cas retenus pour finalement les analyser et les comparer. L'objectif final à atteindre dans le cadre de ce travail est de comparer, grâce à leur analyse de cycle de vie respective, 2 bâtiments : un biomimétique et un « classique ».

La méthodologie suivie est représentée sur la Figure 1-2 suivante :

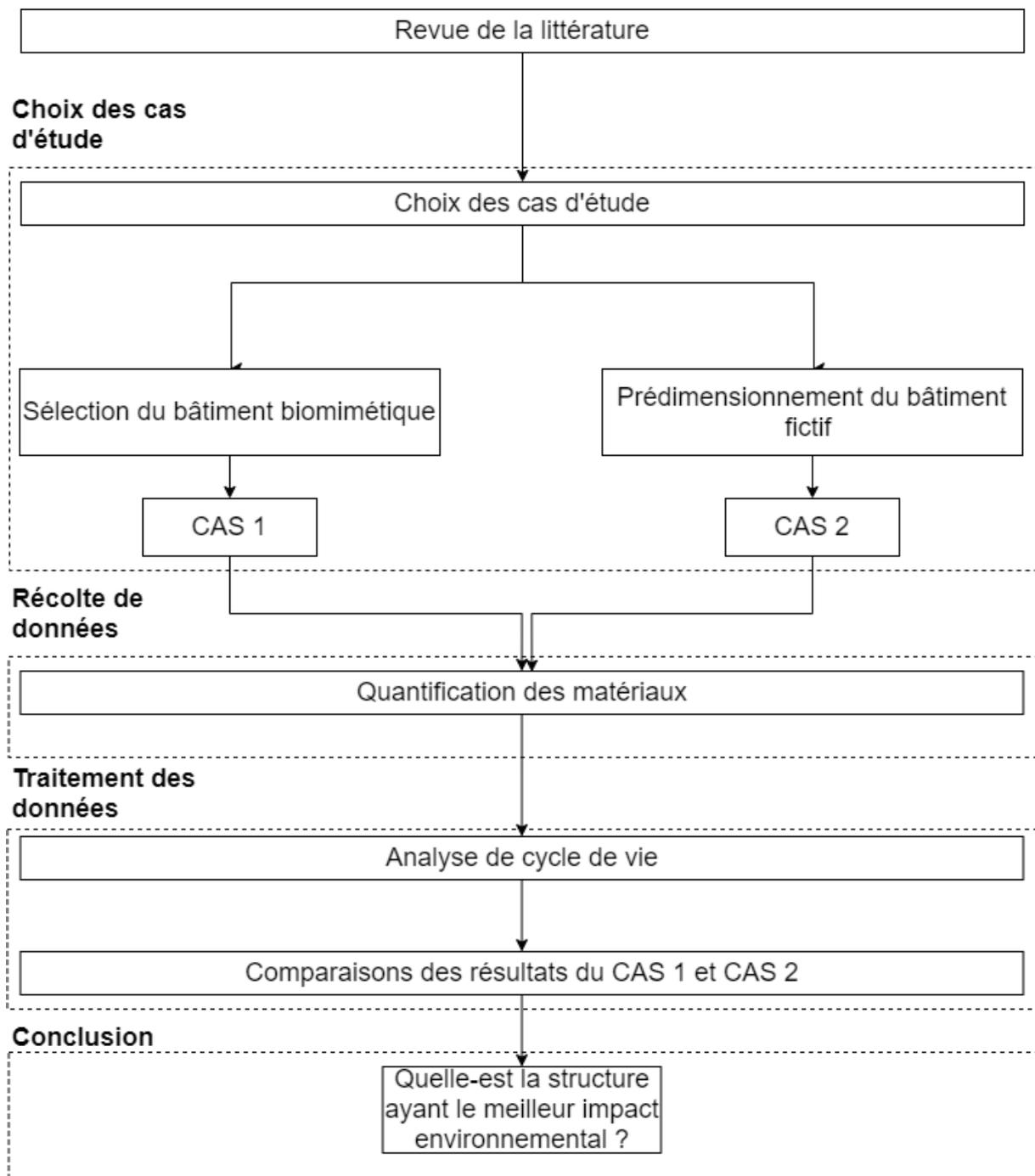


Figure 1-2 : Cadre conceptuel de la recherche

Les grandes étapes de la méthodologie suivie sont, pour commencer, une revue de la littérature existante.

Ensuite a lieu le choix des cas d'étude. Un bâtiment « biomimétique » est sélectionné et son « équivalent classique » est prédimensionné de manière à ce que les 2 cas d'étude aient la même surface, la même fonction, le même emplacement géographique...

L'étape suivante consiste en une récolte de données permettant la quantification des matériaux composant chacune des structures des 2 cas d'étude.

Ensuite, le traitement de données consiste en la réalisation d'une analyse de cycle de vie des 2 cas d'étude et en une comparaison des résultats obtenus.

Finalement, cette démarche permet d'arriver à la conclusion qui répondra à la question suivante : « Quelle-est la structure ayant le plus faible impact environnemental et pourquoi ? ».

Le lecteur se reportera au Chapitre 3 pour une méthodologie plus détaillée.

Les résultats obtenus sont divisés en plusieurs parties. Tout d'abord, le chapitre 4 explicite le choix des cas d'étude et quels ont été les critères qui m'ont guidée dans ce choix. Ensuite aura lieu la quantification des matériaux pour chacun des cas d'étude suivie de leur analyse de cycle de vie.

Pour l'analyse des résultats, celle-ci se déroule en 4 parties.

Les deux premières parties concernent les résultats des deux cas d'étude qui sont analysés séparément, sur le total de l'analyse de cycle de vie mais également étape par étape, et ce pour chacun des 7 indicateurs environnementaux choisis. À chaque étape de cycle de vie, l'élément le plus impactant est déterminé. Cette analyse permet d'avoir une idée globale des impacts environnementaux et des éléments qui y contribuent le plus.

Ensuite, les résultats obtenus pour chacun des cas d'étude sont comparés et sont analysés dans leur globalité, c'est-à-dire pour les totaux obtenus pour chacun des 7 indicateurs environnementaux.

Finalement, les impacts environnementaux des éléments équivalents des structures sont comparés

Ce sujet de recherche est important car beaucoup de projets développés ces dernières années sont des bâtiments autoproclamés « biomimétiques » qui prétendent répondre aux problématiques écologiques d'aujourd'hui. Ces bâtiments sont intrigants et intéressants sur les principes biomimétiques qu'ils prétendent mettre en œuvre et peuvent être inspirants, surtout pour de jeunes ingénieurs-architectes, architectes ou des étudiants. Il est donc important de se demander si ces procédés biomimétiques mis en œuvre sont vraiment performants et s'ils valent la peine d'être mis en œuvre du point de vue de leur l'impact environnemental.

Ce travail vise donc à évaluer l'impact environnemental d'un bâtiment tertiaire avec une structure inspirée de la nature et a pour but de répondre aux questions suivantes :

- Qu'est-ce qu'une structure inspirée de la nature ou « biomimétique » ? Qu'est-ce qu'une structure « classique » ?
- Comment comparer ces 2 types de structures ?
- La structure biomimétique a-t-elle un impact environnemental plus faible que la structure classique et pourquoi ?

Ce travail s'adresse à toute personne s'intéressant au biomimétisme, mais aussi aux personnes soucieuses de trouver de nouvelles solutions répondant à la problématique écologique.

Chapitre 2: État de l'art

Ce chapitre explique les concepts de biomimétisme et d'analyse de cycle à partir d'une analyse bibliographique.

2.1 Biomimétisme

2.1.1 Définition

Le biomimétisme est étymologiquement l'imitation de la nature. En grec, « bios » signifie la vie et « mimesis » l'imitation (Pitrou, Dalsuet, & Hurand, 2015).

Cependant, au-delà d'une simple imitation de la nature au niveau de la forme ou de la symbolique, le biomimétisme a pour but la durabilité (Chayaamor-Heil, Guéna, & Hannachi-Belkadi, 2018). En effet, en nous inspirant de la biodiversité, nous pouvons répondre aux problèmes environnementaux auxquels nous faisons face aujourd'hui : économie de matériau, économie d'énergie... car des organismes ou des écosystèmes ont déjà été confrontés à des problématiques similaires aux nôtres et, par sélection naturelle, ont évolué pour les solutionner et qui plus est, de manière économe (Bœuf et al., 2012). Effectivement, le vivant a la capacité de sans cesse innover, tout en utilisant le moins d'énergie possible et en ne créant jamais de déchets (cycle circulaire) (Bœuf, 2019).

En architecture, 3 niveaux d'imitation du vivant sont possibles : l'imitation de l'organisme, du comportement ou de l'écosystème. Ces imitations peuvent se référer à la forme, au matériau, à la construction, au processus ou à la fonction (Zari, 2007).

Le niveau organisme se rapporte à un être individuel qui peut être imité dans son ensemble ou en partie.

Le niveau comportement se rapporte au fonctionnement d'un être. L'imitation peut se référer à un seul aspect du comportement ou à l'interaction de l'être vivant avec son contexte.

Finalement, le niveau écosystème se rapporte aux principes qui permettent à cet écosystème de fonctionner (Chayaamor-Heil et al., 2018)

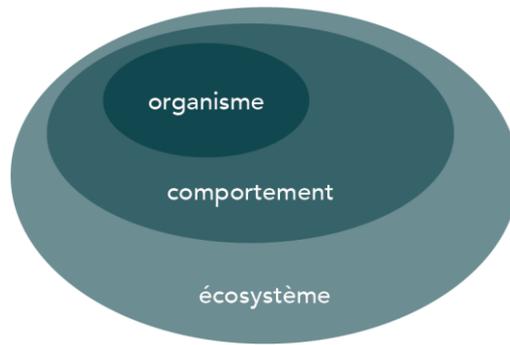


Figure 2-1 : Les 3 niveaux d'imitation du vivant (CEEBIOS, 2018)

Le vivant peut donc être une grande source d'inspiration pour l'Homme, car au cours de 3,8 milliards d'années se sont développées des espèces de plus en plus résilientes et capables de survivre à la sélection naturelle, nous donnant ainsi maints exemples de formes, systèmes... que nous pouvons appliquer dans l'architecture (Pawlyn, 2019).

2.1.2 Historique du concept

« Va prendre tes leçons dans la nature, c'est là qu'est notre futur » Léonard de Vinci.

Depuis qu'il est apparu sur terre, l'Homme, consciemment ou pas, s'est inspiré de la nature pour vivre et modeler son environnement afin de répondre à ses besoins.

À la Renaissance, Léonard de Vinci (1452 – 1519) étudie le vol des oiseaux et s'en inspire pour développer ses croquis de machines volantes (voir Figure 2-2), la bio-inspiration venait, peut-être, de gagner ses lettres de noblesse.

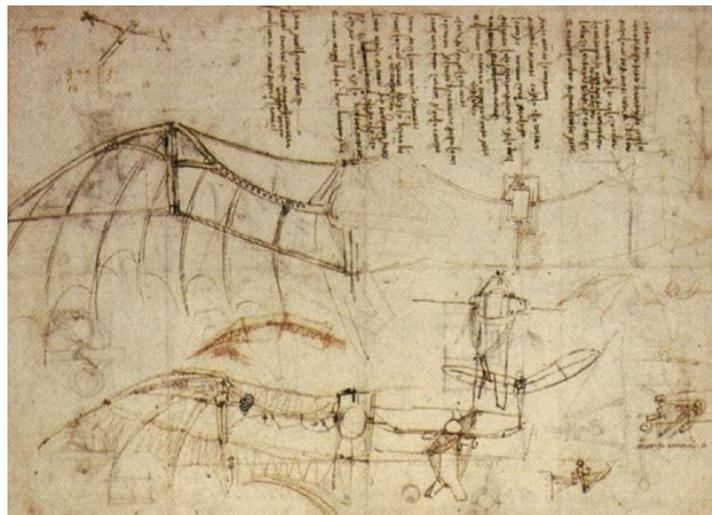


Figure 2-2 : Dessin d'une machine volante (Léonard De Vinci, 1488)

En 1997, le livre de Janine BENUYS « *Biomimicry, Innovation Inspired by Nature* » va structurer et vulgariser cette approche. À cette époque, elle donne comme définition du biomimétisme « [...] *démarche d'innovation, qui fait appel au transfert et à l'adaptation des principes et stratégies élaborées par les organismes vivants et les écosystèmes, afin de produire des biens et des services de manière durable, et rendre les sociétés humaines compatibles avec la biosphère[...]* » (Benyus, 2017).

Depuis, un énorme travail de synthèse a été effectué pour en arriver à la publication des premiers documents normatifs :

- ISO 18457 : Biomimétisme — Matériaux, structures et composants biomimétiques (2016)
- ISO 18458 : Biomimétique — Terminologie, concepts et méthodologie (2015)
- ISO 18459 : Biomimétisme — Optimisation biomimétique (2015)
- XP X42-502 : Biomimétisme — Intégration de la biomimétique dans les démarches d'écoconception (AFNOR 2017)

L'ISO 18458 définit le biomimétisme comme « *Philosophie et approches conceptuelles interdisciplinaires prenant pour modèle la nature afin de relever les défis du développement durable (social, environnemental et économique)* ».

Selon les prévisions, d'ici à 2050, 2/3 de la population mondiale résideront dans des milieux urbains. Il est donc essentiel de fournir à cette population un lieu de travail et de logement, mais également un espace de bien-être lié intégralement à leur milieu de vie qu'est la ville (CEEBIOS, 2018). L'architecture devra intégrer l'ensemble de ces besoins afin de procurer une bonne qualité de vie aux habitants.

Ces exigences, économiques, sociales et écologiques, font des bâtiments des éléments essentiels pour lutter contre le changement climatique et l'épuisement des ressources non renouvelables. En effet, « *Le biomimétisme, par la compréhension et l'imitation des systèmes vivants et en particulier des écosystèmes, est une opportunité inédite pour repenser les Villes de demain.* » (CEEBIOS, 2018)

Les villes doivent permettre une bonne qualité de vie via la qualité de l'habitat. Selon le même auteur, des écosystèmes plus sains permettent aux humains de mieux s'adapter au changement climatique en créant du potentiel pour une résilience accrue (Zari, 2019).

De plus, toutes les structures, érigées par l'Homme dans l'écosystème urbain, doivent être conçues comme des organismes vivants capables d'accueillir la biodiversité, gérer les ressources en eau, tendre vers des systèmes zéro déchet, permettre l'utilisation maximale de

l'énergie solaire, assurer une bonne qualité de l'air et réguler les facteurs climatiques comme la surchauffe urbaine. Le rôle des espaces verts urbains et des forêts urbaines est crucial à cet égard (CEEBIOS, 2018). Le projet Ecotone représenté sur la Figure 2-3 est un exemple de cette réflexion.



Figure 2-3 : Projet Ecotone (Compagnie de Phalsbourg)

Cuce et al. (2019) démontrent que le biomimétisme est une approche efficace pour concevoir et exploiter des environnements construits durables et même régénératifs pour les bâtiments du futur.

Pour y parvenir, 3 changements majeurs devront être opérés (Pawlyn, 2016) :

- « Utiliser les ressources de façon radicalement plus efficace
- Faire passer les bases de notre économie des combustibles fossiles au solaire
- Transformer le modèle linéaire actuel en un système totalement circulaire où toutes les ressources sont gérées en boucle fermée et où rien n'est perdu. »

Pour parvenir à réaliser ce programme ambitieux, les principes clés à appliquer sont (Pawlyn, 2016) :

- « Les structures : conception sophistiquée, économie de matériau et réactivité plus importante
- Les matériaux et la fabrication : choix des bons éléments et assemblage adéquat
- Les écosystèmes : création de systèmes régénératifs en boucle fermée fondés sur l'énergie solaire
- Le gaspillage : tout est nutriment ; maximisation des valeurs humaines et matérielles ».

2.2 Analyse de cycle de vie

Une facette du biomimétisme est l'optimisation des matériaux et de leur usage qui peut mener à une diminution de l'impact environnemental. L'analyse de cycle de vie permet de mesurer cet impact.

2.2.1 Définition

L'analyse de cycle de vie est un outil permettant de connaître les impacts environnementaux d'un produit à chaque phase de sa vie (Desmyter & Martin, 2001). On considère 4 phases dans un cycle de vie : la production, la mise en œuvre sur chantier, l'utilisation et la fin de vie (CSTC, 2013).

L'analyse de cycle de vie, appliquée au secteur de la construction, permet de réduire les impacts environnementaux des bâtiments (Bahramian & Yetilmezsoy, 2020). De plus, l'analyse de cycle de vie peut aussi être un outil d'aide à la décision, car elle permet la comparaison de plusieurs matériaux, services, bâtiments ou, dans le cadre de ce travail, de structures.

2.2.2 Historique

L'intérêt pour les analyses de cycle de vie est croissant ces dernières années. En effet, nous pouvons voir qu'au cours des 10 années passées, le nombre d'articles rédigés sur l'analyse de cycle de vie appliquée au bâtiment n'a cessé d'augmenter (Bahramian & Yetilmezsoy, 2020).

L'analyse de cycle de vie prend naissance avec l'apparition du concept de développement durable. Ce concept repose sur 3 piliers : économique, social et environnemental représentés sur la Figure 2-4.

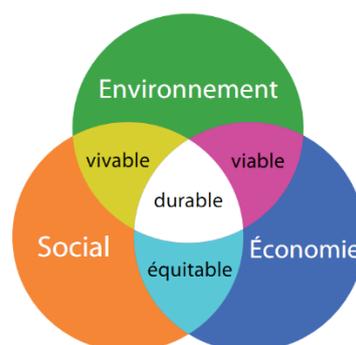


Figure 2-4 : Piliers du développement durable (Université de Limoges)

La vision d'une gestion durable des ressources naturelles n'est pas un concept neuf. En effet, en 1346, l'Ordonnance BRUNOY ordonnait déjà la « gestion durable » des forêts (Jégou, 2007).

Ce concept a ensuite connu des inconstances jusqu'à l'avènement du « tout à la croissance » qui caractérise l'après-guerre de 1940-1945.

La fin des années 60 et le début des années 70 vont conduire à un intérêt croissant pour l'écologie et le retour en force de l'environnement sur la scène internationale. En effet, la contre-culture hippie apparue dans les années 60 va contribuer à la diffusion très large des désirs de retour à la nature et à la prise de conscience que notre environnement souffre de maltraitance et en 1972, le rapport MEADOWS connaît un énorme retentissement. Pour la première fois, développement et environnement forment un tout et doivent être traités comme un seul paradigme (Jégou, 2007).

En 1980, le congrès de l'UICN (Union Internationale pour la Conservation de la Nature) publie conjointement avec le PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) et le WWF (Fonds Mondial pour la Nature) la « Stratégie mondiale de la conservation de la nature » qui est considéré comme la première formulation du développement durable (Jégou, 2007).

En 1983 est mise sur pied la Commission Mondiale pour l'Environnement et Développement (CMED) dont la présidence est confiée à Mme BRUNDTLAND. Après 4 années de travaux, cette commission remet son rapport intitulé « *Notre avenir à tous* » qui exprime explicitement une définition du concept de développement durable (Jégou, 2007).

« *Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* » (Rapport Brundtland, 1987). Ce concept repose sur 2 principes : le développement nécessaire à la diminution de la fracture entre les plus riches et les plus démunis et la nécessité pour les générations futures de continuer à avoir accès à toutes les ressources naturelles (Zaccai, 2014).

Il fallait une méthode permettant de mesurer les impacts environnementaux d'un produit, d'un service ou d'un procédé tout au long de son cycle de vie. En 1997, la publication de la norme ISO 14040 pose les bases du cadre normatif pour la réalisation de l'analyse de cycle de vie. D'autres normes viendront ensuite la compléter.

2.2.3 Méthode

Il existe 2 normes expliquant les principes de base à respecter pour mener l'analyse de cycle de vie : **ISO 14040 : 2006** *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre* et **ISO 14044 : 2006** *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Exigences et lignes directrices*.

En plus de ces normes internationales, il existe des normes européennes harmonisées portant sur l'évaluation environnementale des produits de construction et des bâtiments : **NBN EN 15804 : 2012+A2 : 2019 Contribution des ouvrages de construction de développement durable – Déclarations environnementales sur les produits – Règles régissant les catégories de produits de construction** et **NBN EN 15978 Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Évaluation de la performance environnementale des bâtiments – Méthode de calcul**.

Comme le montre la Figure 2-5, selon la norme ISO 14040 : 2006, l'analyse de cycle de vie est constituée de 4 phases qui s'enchaînent de manière itérative : la définition des objectifs et du champ d'étude, l'inventaire, l'évaluation de l'impact, l'interprétation.

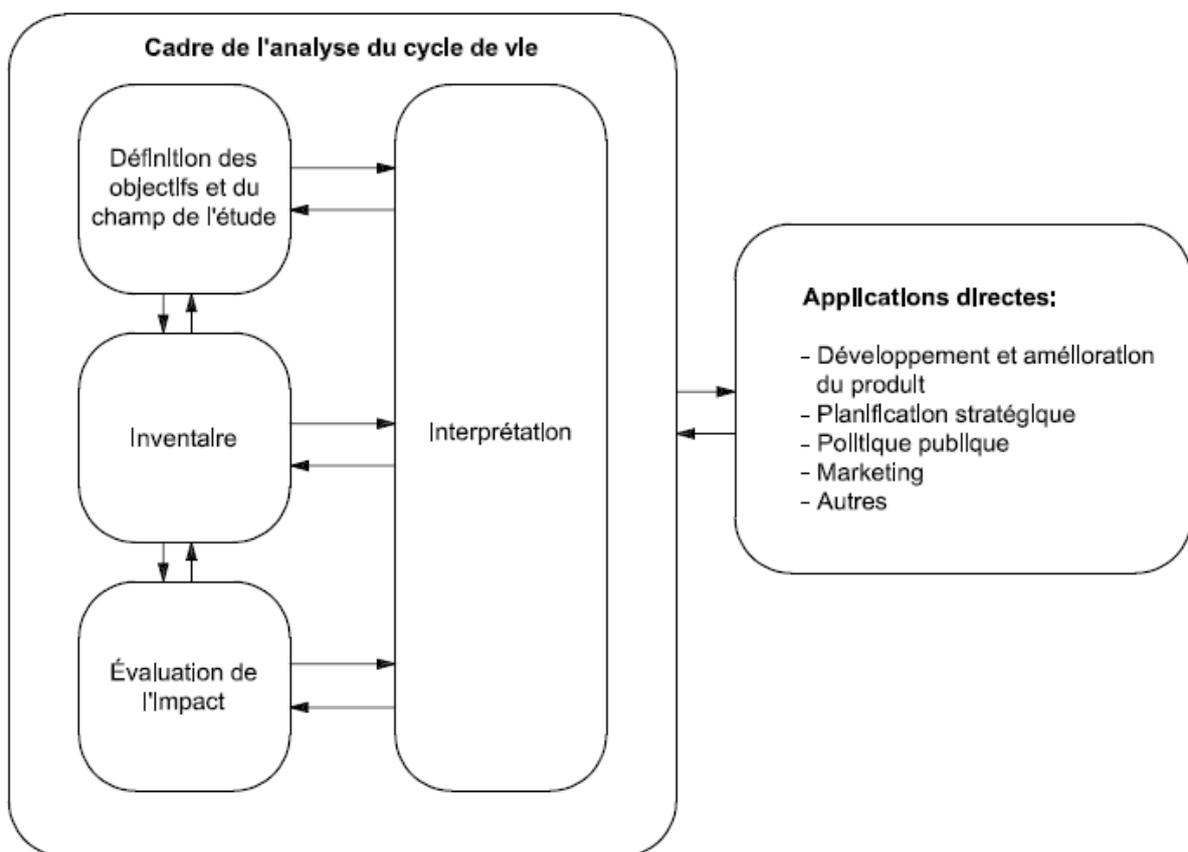


Figure 2-5 : Phases de l'ACV (ISO, 2006)

Détaillons chacune de ces phases :

1. La définition des objectifs et du champ d'étude

Dans la première phase, il convient tout d'abord de définir le « pourquoi » de l'analyse, dans quel but elle va servir (Desmyter & Martin, 2001).

Ensuite, il faut définir les frontières du système qui sont les limites de l'analyse de cycle de vie et qui comportent les phases de cycle de vie prises en compte. Celles-ci doivent donc correspondre à l'objectif fixé précédemment (ISO, 2006).

Les différentes phases du cycle de vie sont regroupées en différents modules (CEN, 2011) :

- la phase de production ou le module A1-A3 qui comprend l'acquisition des matières premières (A1), leur transport (A2) et la fabrication (A3),
- la phase de construction ou le module A4-A5 qui comprend le transport jusqu'au chantier (A4) et l'installation du produit (A5),
- la phase d'utilisation ou le module B1-B7 qui comprend l'utilisation (B1), l'entretien (B2), la réparation (B3), le remplacement (B4), la réhabilitation (B5) et l'énergie (B6) et l'eau (B7) consommées en phase opérationnelle,
- la phase de fin de vie ou le module C1-C4 qui comprend la déconstruction ou démolition (C1), le transport des déchets (C2), la réutilisation ou le recyclage (C3) et l'élimination (C4),
- le module D qui donne des informations sur les avantages et les charges, la réutilisation, récupération ou recyclage effectués après la phase de fin de vie (C1-C4).

Ces modules sont détaillés sur la Figure 2-6 suivante :

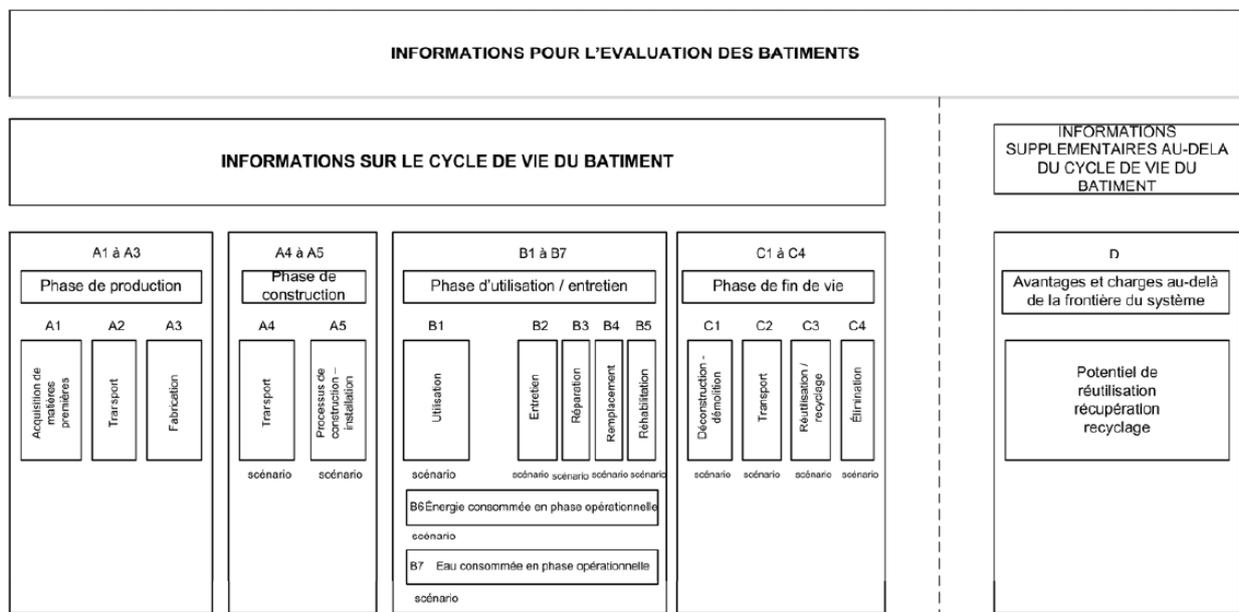


Figure 2-6 : Modules et phases du cycle de vie (CEN, 2011)

Selon la norme NBN EN 15804, il existe 3 types d'analyse de cycle de vie (CEN, 2012) :

1. Du berceau à la porte, c'est-à-dire une analyse de cycle de vie ne prenant en compte que la phase de production,
2. Du berceau à la tombe, c'est-à-dire une analyse de cycle de vie prenant en compte l'intégralité des étapes du cycle de vie,
3. Du berceau à la porte avec option, c'est-à-dire une analyse de cycle de vie prenant en compte l'étape de production ainsi que d'autre(s) phase(s) au choix.

Il est à noter que, selon la NBN EN 15978, dans le cadre d'une analyse de cycle de vie d'un bâtiment, il convient de réaliser au minimum une analyse du berceau à la tombe (ou au moins les phases du cycle de vie restantes dans le cas d'une analyse de cycle de vie d'un bâtiment déjà existant) (CEN, 2011).

Il faut également définir l'unité fonctionnelle qui sert d'unité de référence. Il peut s'agir d'une unité fonctionnelle concernant le matériau, un composant, le bâtiment entier ou même des particularités du bâtiment (sa surface chauffée par exemple) (Desmyter & Martin, 2001). Tout comme les frontières du système, l'unité fonctionnelle doit correspondre aux objectifs de l'analyse de cycle de vie (ISO, 2006). La détermination de l'unité fonctionnelle est donc une des premières étapes et est une étape importante de l'analyse de cycle de vie. Dans la littérature, pour les ACV (analyse de cycle de vie) de bâtiments, les unités fonctionnelles les plus courantes sont le m² ou le kWh, mais on retrouve également d'autres unités fonctionnelles telles que kg ou même le bâtiment entier. En effet, la détermination de l'unité fonctionnelle n'est pas (encore) standardisée et dépend donc de chaque étude (Bahramian & Yetilmezsoy, 2020).

La durée de vie des bâtiments doit aussi être déterminée. Elle peut varier selon les études, mais on remarque néanmoins que la durée de vie est souvent fixée à 50 ans ou plus (Bahramian & Yetilmezsoy, 2020).

Pour terminer la phase de définition des objectifs et du champ d'étude, il faut déterminer les exigences relatives à la qualité des données : leur précision, leur représentativité... ainsi que préciser leur source (Desmyter & Martin, 2001).

2. L'inventaire

La seconde phase de l'analyse de cycle de vie est l'inventaire.

Selon la norme ISO 14040 : 2006, réaliser l'inventaire de cycle de vie consiste à « *compiler et évaluer les intrants, les extrants et les impacts environnementaux potentiels d'un système de produits au cours de son cycle de vie* » (ISO, 2006). En d'autres termes,

l'inventaire de cycle de vie quantifie les flux entrants au sein du système ainsi que les flux en sortant pour chaque processus constituant le système.

L'inventaire du cycle de vie se déroule en 2 parties (ISO, 2006). Premièrement a lieu le recueil de données, aussi bien qualitatives que quantitatives, où, pour chaque processus élémentaire, des données concernant notamment les flux (énergétiques, de matière, ou d'autres produits), les coproduits et déchets, les émissions dans l'air, l'eau et le sol sont récoltées. Dans un second temps a lieu le calcul des données comprenant la validation des données, le rattachement des données au processus élémentaire et à l'unité fonctionnelle et finalement, l'affinage de la frontière du système (processus itératif).

Lors de l'inventaire, la problématique de l'imputation peut survenir. Cela arrive quand plusieurs produits découlent d'un seul processus ou quand des matériaux sont recyclés ou réutilisés, et dans ce cas, l'impact environnemental lié au processus doit être partagé entre les différents produits qui en résultent. Dans le domaine de la construction (EN 15804 et EN 15978), ce cas de figure est réglé en prenant des frontières du système adaptées et grâce au module D (avantages et charges au-delà du système) (CSTC, 2013).

3. L'évaluation de l'impact

Afin de pouvoir évaluer l'impact, il faut d'abord choisir les catégories d'impact.

Ensuite a lieu la classification : les données récoltées lors de l'inventaire sont classées selon les catégories d'impact choisies.

La troisième étape de l'évaluation de l'impact est la caractérisation. Les données récoltées durant la phase de l'inventaire sont converties pour correspondre à l'unité de référence correspondant à chaque catégorie d'impact (par exemple, pour le réchauffement climatique, l'unité de référence est le kg équivalent CO₂). Chaque émission est alors multipliée par un facteur d'impact pour ainsi pouvoir additionner toutes les émissions, puisqu'elles ont à présent toute la même unité. À titre d'exemple, le facteur d'impact du méthane est 24,5 kg CO₂ par kg de méthane (Desmyter & Martin, 2001).

Les normes ISO 14040 et ISO 14044 n'imposent pas de catégorie d'impact, cependant, elles donnent des recommandations à propos de ces catégories (CSTC, 2013).

Les normes NBN EN 15804 et NBN EN 15978, quant à elles, proposent des catégories d'impacts environnementaux (et indicateurs correspondants) pour le secteur du bâtiment. Dans la norme NBN EN 15978, on retrouve 7 indicateurs environnementaux qui sont définis

comme suit (Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement & Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, (2014)) :

- **le potentiel de réchauffement climatique (GWP) :**

Le réchauffement climatique est la hausse de température moyenne de l'air et de l'eau à la surface de la Terre qui est causée principalement par l'effet de serre. L'indicateur de réchauffement climatique évalue donc les émissions de gaz participant à l'effet de serre, tels que le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), les chlorofluorocarbures (CFC) et le protoxyde d'azote (N_2O).

L'unité est le kg équivalent de CO_2 .

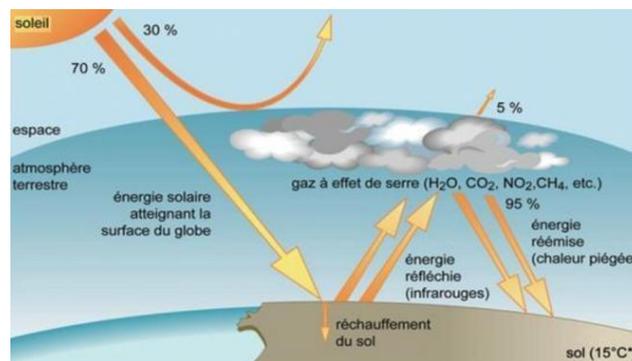


Figure 2-7 : Schéma explicatif du réchauffement climatique (JMGoglin, 2018)

- **le potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP) :**

La couche d'ozone empêche le passage des rayons ultraviolets, néfastes pour l'homme. Cependant, cette couche d'ozone (O_3) est détruite par des composés qui réagissent avec l' O_3 . Ceux-ci sont principalement des chlorofluorocarbures (CFC, HCFC), la substance de référence étant le trichlorofluorométhane (CFC-11).

L'unité est le kg équivalent de CFC-11.

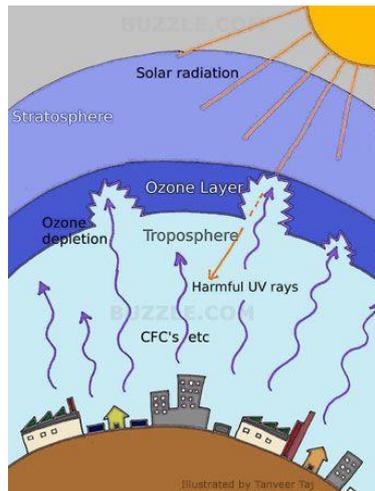


Figure 2-8 : Schéma explicatif de la destruction de la couche d'ozone (Tanveer Taj)

- **le potentiel d'acidification du sol et de l'eau (AP)**

L'acidification est causée quand des composés polluants dans l'air, comme les composés sulfurés, se transforment en acides donnant ensuite lieu à des pluies acides. Ces acides se retrouvent dans l'eau ou dans le sol dégradant ainsi la faune et la flore. Les principaux contributeurs du potentiel d'acidification sont le dioxyde de soufre (SO_2), les oxydes d'azote (NO_x), l'ammoniac (NH_3), acide chlorique (HCl)...

L'unité est le kg équivalent de SO_2 .

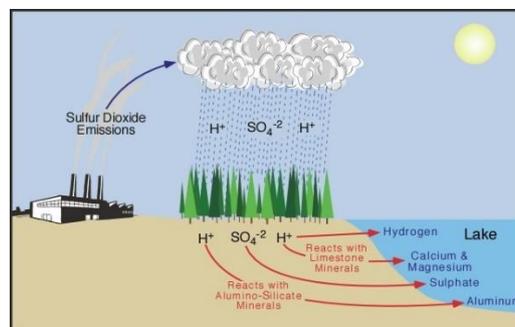


Figure 2-9 : Schéma explicatif de l'acidification du sol et de l'eau (Pidwirny, 2006)

- **le potentiel d'eutrophisation (EP) :**

L'eutrophisation est l'enrichissement en éléments nutritifs qui peut avoir lieu aussi bien dans l'eau que dans le sol. Ce phénomène est principalement dû à l'usage de fertilisants, à la pollution de l'air et aux eaux usées (substances contenant des nitrates et des phosphates) qui engendrent une multiplication rapide et excessive d'algues (Gervasio et al., 2014). Celles-ci, par leur respiration et leur décomposition, consomment de l'oxygène au détriment des autres espèces animales ou végétales à proximité, ce qui peut mener à la disparition de ces dernières. Les composés

responsables de l'eutrophisation sont l'azote (nitrates, nitrites, ammonium), le phosphore (phosphates, PO_x) et le carbone.

L'unité est le kg équivalent de $(\text{PO}_4)^{3-}$

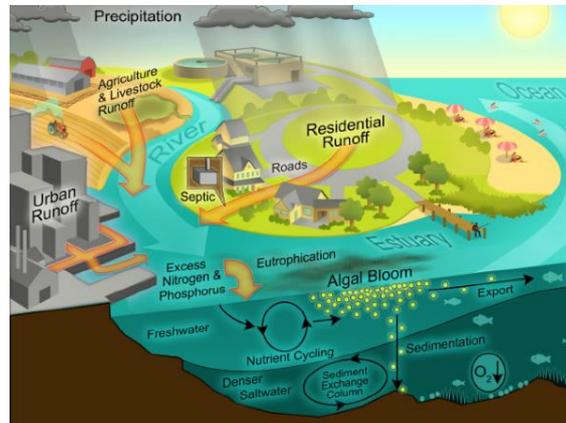


Figure 2-10 : Schéma explicatif de l'eutrophisation (Project eutrophication)

- **le potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique (POCP) :**

La formation d'ozone photochimique est due aux oxydes d'azote et d'hydrocarbure qui ont la capacité de transformer l'oxygène. Or, bien que l'ozone soit utile dans la stratosphère pour nous protéger des UV, il s'agit, dans les couches basses, d'un gaz nocif pour l'homme car il peut causer des problèmes respiratoires. Les principaux contributeurs de ce phénomène sont les composés organiques volatils (COV) et tous les composés participant à la formation d'ozone troposphérique. Lorsque leur taux est élevé dans l'air, cela donne lieu au smog photochimique aussi appelé « pic d'ozone ». L'unité est le kg équivalent d'éthène (C_2H_4).



Figure 2-11 : Photo représentative du smog photochimique (Wikipédia, 2005)

- **le potentiel de dégradation abiotique des ressources pour les éléments (ADP_éléments) :**

Cet indicateur prend en compte la rareté et la vitesse d'exploitation des ressources naturelles non renouvelables et non énergétiques comme les métaux par exemple. L'indicateur sera d'autant plus grand si la ressource se fait rare et que sa vitesse d'exploitation est importante.

L'unité est le kg équivalent d'antimoine (Sb).



Figure 2-12 : Photo représentative de la dégradation des ressources abiotiques pour les éléments (AP/SIPA, 2006)

- **le potentiel de dégradation abiotique des combustibles fossiles (ADP_fossiles) :**

Pour ce qui est des ressources naturelles non renouvelables énergétiques telles que le gaz, le pétrole ou le charbon, contrairement à l'indicateur précédent, la rareté n'est pas prise en compte et l'on prend en compte la teneur énergétique du combustible fossile (Gervasio et al., 2014).

L'unité est le MJ.



Figure 2-13 : Photo représentative de la dégradation abiotique des combustibles fossiles (THINKSTOCK)

Des étapes facultatives peuvent avoir lieu après la caractérisation. Il s'agit de la normalisation, le regroupement, la pondération et l'analyse de la qualité des données (ISO, 2006).

4. L'interprétation.

Pour terminer, la dernière phase de l'analyse de cycle de vie est l'interprétation. Cette étape comporte :

- l'identification des enjeux significatifs,
- la vérification,
- les conclusions, limitations et recommandations.

C'est donc lors de cette étape que la réponse à l'objectif est donnée.

2.2.4 Déclarations environnementales

En Europe, il existe 3 types de déclarations environnementales volontaires pour les produits de construction. Ces déclarations donnent des informations sur le profil environnemental d'un produit ou un service (CSTC, 2016).

Les déclarations environnementales de type I sont les labels environnementaux, celles de type II sont les autodéclarations et finalement, celles du type III sont les déclarations environnementales de produit (ou EPD). Ce sont ces dernières qui nous intéressent dans le cadre de ce travail et qui sont expliquées dans la suite de cette section.

Grâce à de telles déclarations environnementales, il est possible de se procurer des informations quantitatives quant aux aspects environnementaux de matériaux mais d'autres informations peuvent aussi être données, par exemple, au sujet de la santé. Ces informations sont obtenues par une analyse de cycle de vie et bien souvent, elles sont vérifiées par un organisme indépendant (CSTC, 2016). De cette manière, les EPD sont des données fiables qui peuvent aider un concepteur à faire un choix environnemental (Inies, s. d. -a).

En ce qui concerne le cadre normatif des déclarations environnementales de type III, il existe plusieurs normes : **ISO 14025** *Marquages et déclarations environnementaux – Déclarations environnementales de Type III – Principes et modes opératoires* et **ISO 21930** *Développement durable dans les bâtiments et les ouvrages de génie civil – Règles principales pour les déclarations environnementales des produits de construction et des services*.

Les analyses de cycle de vie réalisées pour les EPD doivent respecter les PCR (règles de catégorie de produit) et certaines exigences concernant la présentation et l'interprétation des résultats qui sont imposées par les opérateurs de programme (généralement des institutions nationales) (CSTC, 2016).

Pour assurer la comparabilité des matériaux via leur EPD, il faut que ces EPD proviennent du même système. Afin de faciliter cela, le Comité technique européen CEN TC

350 a élaboré la norme européenne harmonisée NBN EN 15804+A1. Cependant, le système EPD de chaque pays reste différent car les scénarios (transport, utilisation, fin de vie) peuvent différer d'une région du monde à une autre. Selon le pays, la NBN EN 15804+A1 peut donc être complétée avec un complément national (CSTC, 2016).

En Europe, il existe plusieurs programmes EPD dont les principaux sont repris dans le Tableau 2-1 suivant :

Tableau 2-1 : Principaux programmes EPD en Europe (CSTC, 2016)

	Base de données EPD belge	INIES Fiches de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) des produits de construction 	Environmental Profiles 	International EPD® system 	IBU Umwelt- Produktdeklarationen 
Pays	Belgique	France	Grande-Bretagne	À l'origine en Suède et en Italie, désormais partout dans le monde	Allemagne
Base de données en ligne	X	X	X	X	X
EPD collectives	X	X	X		
EPD spécifiques à un produit	X	X	X	X	X
Spécifique aux matériaux de construction	X	X	X		X
Données environnementales	X	X	X	X	X
Données sanitaires		X			
ACV du berceau à la porte de l'usine	X			X	X
ACV du berceau à la tombe	Depuis 2017	X	X	Facultatif	Facultatif
Conforme à la norme européenne EN 15804+A1	X	X		X	X
Plus d'informations	www.environmentalproductdeclarations.eu	www.inies.fr	www.greenbooklive.com	www.environdec.com	http://bau-umwelt.de

On remarque que la base de données française INIES met à disposition des données sanitaires. On appelle alors ce type de fiches des FDES (fiche de déclaration environnementale et sanitaire).

De plus, le Tableau 2-1 montre que les EPD peuvent être collectives ou non. Une fiche EPD collective signifie qu'elle est représentative de plusieurs produits similaires, c'est-à-dire que l'EPD porte sur un même type de produits qui sont chacun réalisés par des industriels différents (Inies, s.d-a).

2.3 Études similaires

Il existe plusieurs études sur le biomimétisme, cependant, on remarque que les sujets qu'elles couvrent sont redondants.

En effet, beaucoup d'articles décrivent un « état de l'art » du biomimétisme, expliquent le concept, son origine et ses méthodes à l'aide d'ouvrages ou d'articles préexistants, ou encore, documentent les structures existantes (Biomimicry Institute, Biomimicry 3.8, Biomimicry Europa) comme c'est le cas pour le travail de Pitrou, Dalsuet et Hurand « *Modélisation, construction et imitation des processus vitaux. Approche pluridisciplinaire du biomimétisme* » ou celui de Chayaamor-Heil, Guéna et Hannachi-Belkadi « *Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils* ».

Ensuite, d'autres travaux portent sur le développement d'une méthodologie permettant d'appliquer des principes tirés de la biologie à l'architecture. Par exemple, la recherche menée par Reichert et al. explique la démarche et la méthodologie suivie pour concevoir un pavillon basé sur le modèle biologique du homard à partir de matériaux légers (filaments en fibre de verre et fibre de carbone). Ou encore, Shahda, Abd Elhafeez, & El Mokadem étudient comment le système nasal du chameau, qui est un animal parfaitement adapté aux conditions environnementales du désert, pourrait être adapté à des bâtiments devant également s'adapter à ces conditions.

Plusieurs études ont aussi été menées dans plusieurs universités pour démontrer les bienfaits d'enseigner la conception biomimétique aux élèves en architecture et ainsi encourager le développement de ce genre de cours. C'est le cas des travaux de Yurtkuran, Kırılı, & Taneli, Amer ou en encore Tavsan, Tavsan, & Sonmez.

De plus, on retrouve également des articles comme ceux écrits par Mizobuti & Vieira Junior ou encore Aziz & El sherif, mettant en avant les outils informatiques et d'optimisation qui permettent de « transférer » des principes biologiques à l'architecture.

Pour en terminer avec les études menées sur le biomimétisme, un grand nombre d'entre elles concernent une partie spécifique du bâtiment : la façade. Par exemple, Radwan & Osama analysent les gains de consommation d'énergie que l'on peut observer en appliquant des principes biomimétiques aux façades d'un bâtiment. Ensuite, López, Rubio, Martín, & Ben Croxford proposent une méthodologie pour appliquer des solutions inspirées des plantes ou encore Reichert, Menges, & Correa qui étudient des systèmes s'adaptant à leur environnement de manière autonome en analysant des matériaux aux propriétés hygroscopiques tel que le bois.

En ce qui concerne les études sur l'analyse de cycle de vie dans le domaine de la construction, celles-ci sont nombreuses et, même si elles portent sur le même thème, leur domaine est très vaste. En effet, elles peuvent porter sur la comparaison de matériaux, sur un ou plusieurs bâtiments de fonctions diverses, sur la comparaison de la démolition ou de la

réhabilitation d'un bâtiment, sur des bases de données, sur les limites des méthodes, et beaucoup d'autres sujets.

En effet, comme le montre le travail de Cabeza et al., plusieurs études utilisant l'analyse de cycle de vie comme outil de comparaison ont déjà été réalisées durant les années passées. Ces comparaisons portent aussi bien sur des matériaux de construction, des systèmes constructifs, des bâtiments entiers, etc. Par exemple, Asdrubali et al. comparent 3 configurations courantes de bâtiments en Italie ; Attia compare 4 bâtiments qui ont de très bonnes performances environnementales (3 représentants de bâtiments régénératifs et 1 représentant de bâtiment écoénergétique) ; Ximenes et Grant comparent les conséquences sur l'effet de serre de 2 modèles de maisons en Australie ; Van den Heede et De Belie comparent 2 types de béton.

Dans les travaux consultés, on remarque que les normes ISO 14040 et 14044 sont généralement suivies. De plus, l'unité fonctionnelle la plus couramment rencontrée est le m^2/an ou le m^2 (Bahramian et Yetilmezsoy, 2020) et l'analyse de cycle de vie couvre l'ensemble des étapes de la vie d'un produit (du berceau à la tombe). En ce qui concerne les indicateurs environnementaux étudiés, on retrouve le GWP et l'énergie grise dans pratiquement chacune des études. Cependant, la durée de vie est de 50 ou 100 ans d'un travail à l'autre et les bases de données varient également.

Certains travaux portent sur la comparaison de l'outil d'analyse de cycle de vie avec un autre outil, comme c'est le cas dans l'étude de E. Giama et A.M. Papadopulos dans laquelle les briques, le ciment, l'acier, le béton et le plâtre sont évalués du point de vue environnemental grâce à 2 méthodes : l'analyse de cycle de vie et l'analyse d'empreinte carbone (Giama & Papadopoulos, 2015).

Dans le cadre de ce travail, l'analyse de cycle de vie est réalisée pour des bâtiments tertiaires de grande hauteur. Dans la littérature existante, on remarque que les analyses de cycle de vie de bâtiments bas sont plus abondantes que celles de bâtiments élevés (on considère ici un bâtiment haut comme un bâtiment de plus de 5 étages) (Bahramian & Yetilmezsoy, 2020).

Cependant, des analyses de cycle de vie de bâtiments tertiaires de grande hauteur ont tout de même déjà été réalisées. Par exemple, Alves et al. ont étudié les économies d'énergie potentielles au sein d'un parc immobilier de bâtiments de grande hauteur à Belo Horizonte au Brésil et Gan, Cheng, Lo, & Chan ont présenté une méthode permettant de quantifier l'énergie grise de bâtiments hauts.

Dans le cadre de ce travail, nous avons opté pour une démarche consistant non seulement à comparer 2 bâtiments tertiaires de grande hauteur, mais surtout à comparer 2 systèmes constructifs composés de 2 matériaux : l'acier et le béton.

Des études comparant différents types de structures ont déjà été menées. Par exemple, l'article de Saade, Guest, & Amor dans lequel les auteurs étudient trois à priori sur la construction : « *le bois est meilleur que le béton et l'acier* », « *il est préférable de rénover plutôt que de démolir et reconstruire un nouveau bâtiment* » et « *les charges opérationnelles sont plus grandes que l'énergie grise* ». Pour ce faire, ils analysent plusieurs cas d'étude tirés de plusieurs articles et en font la liste (non exhaustive). Parmi tous les articles analysés, 6 effectuent une comparaison du GWP entre l'acier et le béton (et éventuellement le bois).

Cette étude montre que les résultats obtenus lors de la comparaison de bâtiments en acier, béton ou bois diffèrent d'une étude à l'autre. En effet, Ajayi et al., Buchanan et al., Lessard et al. et Xing et al. obtiennent des résultats plus favorables pour l'acier alors que les études menées par Guggemos et Horvath « *Comparison of environmental effects of steel- and concrete-framed buildings* », et Alshamrani « *Life cycle assessment of low-rise office building with different structure-envelope configurations* » obtiennent les résultats inverses.

En Belgique également, le même type de méthodologie de travail a été suivi dans le cadre d'une étude menée par KULeuven (à la demande de Febelcem). Cette étude compare 3 types d'immeubles à appartements : le premier en béton, le second en acier et le dernier en bois. Les résultats de cette étude montrent que le bâtiment en béton a de meilleurs impacts environnementaux que le bâtiment en acier mais de moins bons que le bâtiment en bois sur l'ensemble des indicateurs environnementaux étudiés, dont les 7 indicateurs repris dans la norme EN 15978 (Febelcem, 2018).

Une étude similaire a aussi été menée en France, à la demande de CIMbéton. PwC a alors évalué la qualité environnementale de bâtiments de bureau en acier et en béton selon les normes ISO 14040 et 14044 et leur étude a été réalisée sur base de FDES. De plus, les résultats ont été validés par un comité d'expert comprenant entre autres des acteurs de l'industrie sidérurgique. Les résultats obtenus montrent que, selon les 11 indicateurs étudiés, les bâtiments en acier ou en en béton s'équivalent.

En conclusion, bien que l'analyse de cycle de vie soit un sujet beaucoup étudié ces dernières décennies et que l'architecture biomimétique soit également un domaine en plein essor, la combinaison de ces 2 concepts n'est pas courante dans la littérature existante. En effet, dans le domaine du biomimétisme, beaucoup de méthodologies ou outils sont développés, mais il est difficile de trouver une comparaison menée selon une ACV entre un

bâtiment biomimétique et son « équivalent classique ». Ce travail est donc une nouvelle approche d'évaluation du biomimétisme.

Chapitre 3: Méthodologie

Le présent chapitre porte sur la méthodologie appliquée dans la suite de ce travail. Tout d'abord, la question de recherche et quelques concepts sont rappelés, ensuite la stratégie de recherche est expliquée, suivie de la récolte de données sur base des cas d'étude choisis et les limites de ces données pour enfin terminer par leur traitement permettant le calcul des indicateurs environnementaux.

3.1 Question de recherche

Le but de ce travail est de comparer, dans un contexte constructif identique, deux structures, l'une dite « biomimétique » et l'autre dite « classique » afin d'étudier leurs impacts environnementaux. Le résultat de cette recherche pouvant apporter à l'architecte un élément de décision complémentaire dans le choix des techniques constructives à mettre en œuvre.

Définissons ces 2 types de structures.

Selon Pawlyn (2019), une structure biomimétique est une structure qui s'inspire de la nature dans le but de développer une solution durable.

Pour la structure classique, nous considérons un système porteur courant : poteaux-poutres en béton. En effet, le béton est omniprésent dans les constructions qui nous entourent : le béton fait partie des matériaux les plus utilisés (Gagg, 2014).

3.2 Stratégie de recherche

La méthode de recherche ici développée consiste en une comparaison de structures appartenant à 2 cas d'étude. Il s'agit donc d'une méthode quantitative basée sur des observations.

La Figure 3-1 représente le cadre conceptuel de l'étude qui illustre les différentes étapes menées pour réaliser ma recherche :

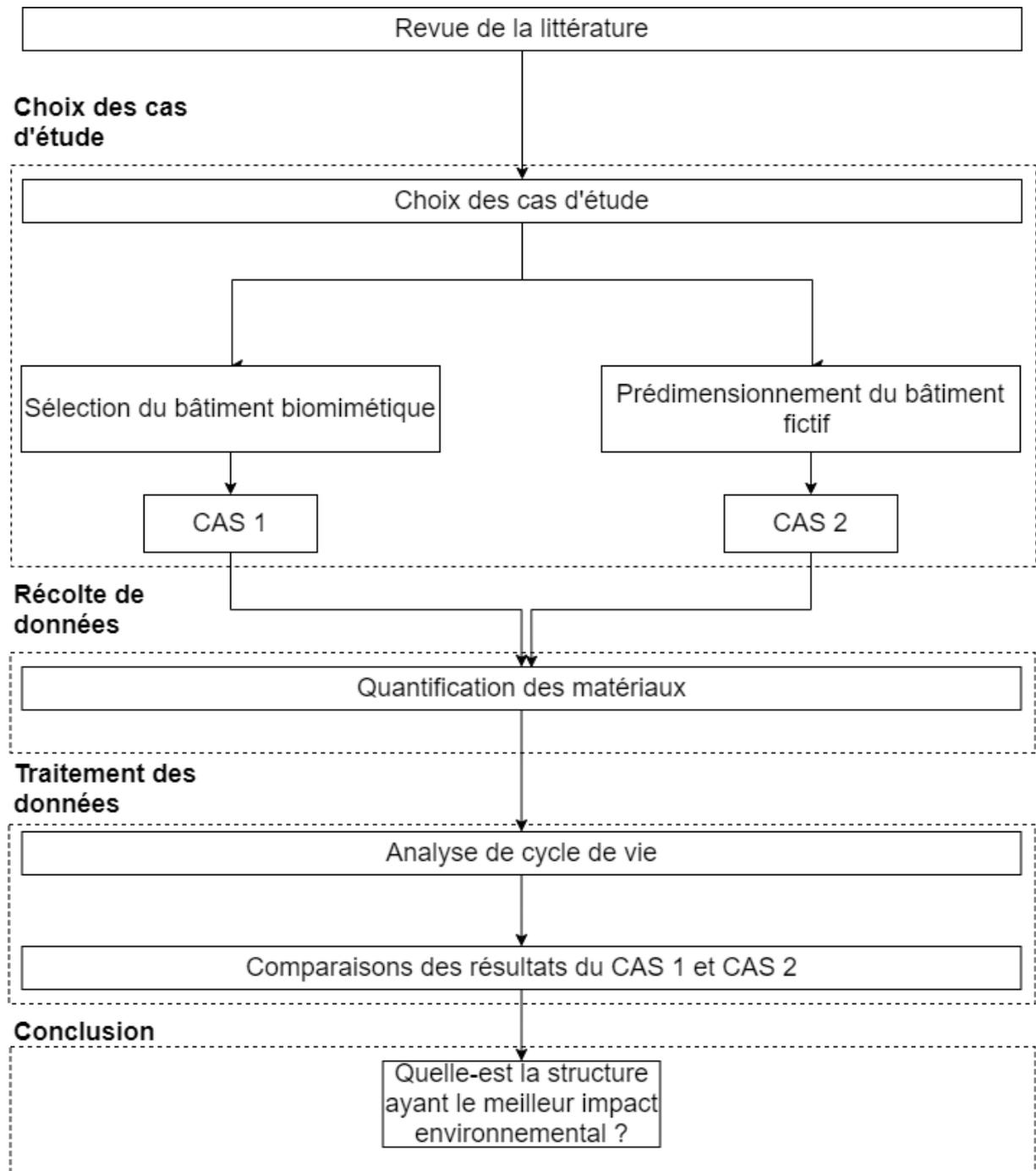


Figure 3-1 : Cadre conceptuel de la recherche

3.3 Récolte de données

La récolte de données est effectuée en deux phases. Une première phase, ciblée sur la récolte des données techniques et dimensionnelles des cas d'étude et une seconde phase, ciblée sur

les informations nécessaires pour réaliser l'analyse de cycle de vie sur base des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES).

3.3.1 Choix des deux cas d'étude

Dans le cadre de ce travail, deux structures sont étudiées et comparées : la première est biomimétique et la seconde est une structure fictive comparable composée d'un système porteur classique.

Pour qu'elles puissent être comparées, plusieurs critères ont été choisis :

- les structures appartiennent à des bâtiments de même surface et de même hauteur (et donc avec même nombre de niveaux) car il est évident que la structure d'un gratte-ciel n'aura pas les mêmes impacts environnementaux que la structure d'une maison unifamiliale,
- les deux bâtiments accueillent la même fonction puisque les charges diffèrent selon l'activité qui s'y déroulent : la structure d'un bâtiment accueillant de grandes foules doit supporter plus de charges que la structure d'un bâtiment fermé au public,
- les deux bâtiments se situent dans la même zone géographique car les techniques de construction varient d'un endroit à l'autre. Par exemple, les structures situées en zone sismique ne reprennent pas les mêmes contraintes que celles situées dans nos contrées,
- les deux bâtiments ont les mêmes performances énergétiques.

Deux bâtiments présentant autant de similitudes ne sont pas faciles à trouver. Il a donc été décidé de choisir un bâtiment à structure biomimétique et de créer un second cas d'étude tout à fait fictif et ayant une structure que l'on retrouve couramment : le système de poteaux-poutres en béton. On fait alors l'hypothèse que tous les critères cités précédemment sont respectés.

Le choix du bâtiment biomimétique s'est finalement porté sur La Tour D2 située à La Défense à Paris et conçue par les architectes A. Béchu et T. Sheehan. Une présentation plus détaillée des deux cas d'étude se trouve dans le Chapitre 4.

3.3.2 Base de données pour les cas d'étude

En vue de réaliser l'analyse de cycle de vie, une quantification des matériaux constituant les structures porteuses est à faire. Pour la Tour D2, les données utilisées sont issues des plans, coupes, élévations et photos disponibles dans la littérature, sur internet ainsi que sur des documents de présentation décrivant l'ouvrage.

En ce qui concerne le second cas d'étude, les informations sont plus faciles à se procurer car la structure est (pré)dimensionnée et la quantité de matériaux découle simplement de la note de calcul (en annexe 2).

3.3.3 Base de données pour les FDES

Les fiches FDES utilisées pour réaliser l'analyse de cycle de vie proviennent de la base de données INIES.

INIES est une base de données française appartenant à l'Alliance HQE-GBC et gérée de façon participative. Cette base de données, créée en 2004 dans le but de développer et faciliter l'écoconception des bâtiments, met à disposition du grand public des Fiches de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES) de produits de construction ainsi que des Profils Environnementaux Produits (PEP) qui eux concernent les équipements du bâtiment (Inies, s. d.).

Il a été décidé de baser l'analyse de cycle de vie sur ces FDES provenant de cette plateforme INIES pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, les fiches FDES mises à disposition sont conformes à la norme européenne EN 15804 et son complément national NF EN 15804/CN, et leur conformité est vérifiée. INIES assure donc la fiabilité des données (CSTB, 2015).

De plus, la base de données propose un large panel de FDES (1544 FDES en 2014) correspondant à de nombreux matériaux (CSTB, 2015). Il est donc aisé d'y trouver les matériaux recherchés.

Finalement, comme il s'agit d'une base de données française, les produits de construction étudiés correspondent aux produits potentiellement utilisés dans notre cas d'étude, situé à La Défense à Paris.

3.3.4 Limites des données collectées

Les données concernant les cas d'étude rencontrent certaines limites.

Tout d'abord, malgré de multiples prises de contact avec les architectes et les bureaux d'ingénieurs ayant participé au projet de la Tour D2, il m'a été impossible de me procurer des documents plus précis que ceux trouvés sur internet, dans des livres ou des brochures présentant le bâtiment. Une erreur sur les mesures prises dans les divers documents durant la quantification de matériau est donc envisageable. De plus, et afin d'assurer la faisabilité de cette étude, certaines hypothèses simplificatrices ont été prises. Celles-ci sont détaillées dans la section suivante portant sur les cas d'étude ainsi que dans l'annexe 2.

Ensuite, le cas d'étude n° 2 est basé sur un bâtiment fictif de conception et d'usage proches du cas 1. Ce bâtiment a été prédimensionné dans le cadre de ce travail et les résultats obtenus ne sont donc pas aussi précis que ceux d'un projet abouti. Il est à noter que les hypothèses simplificatrices prises lors du calcul de la structure ont toutes été prises du côté de la sécurité.

En ce qui concerne les FDES, celles-ci ne correspondent pas toujours aux éléments étudiés. En effet, les dimensions préconisées dans ces fiches ne sont pas toujours respectées. Dans ce cas, j'ai choisi la fiche correspondant au mieux aux éléments étudiés.

3.4 Traitement des données

Le traitement des données consiste à réaliser l'analyse de cycle de vie. Celle-ci suit le processus préconisé par la norme européenne EN 15978 *Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Évaluation de la performance environnementale des bâtiments – Méthode de calcul*. Le synoptique de ce processus est représenté sur la Figure 3-2 ci-après :

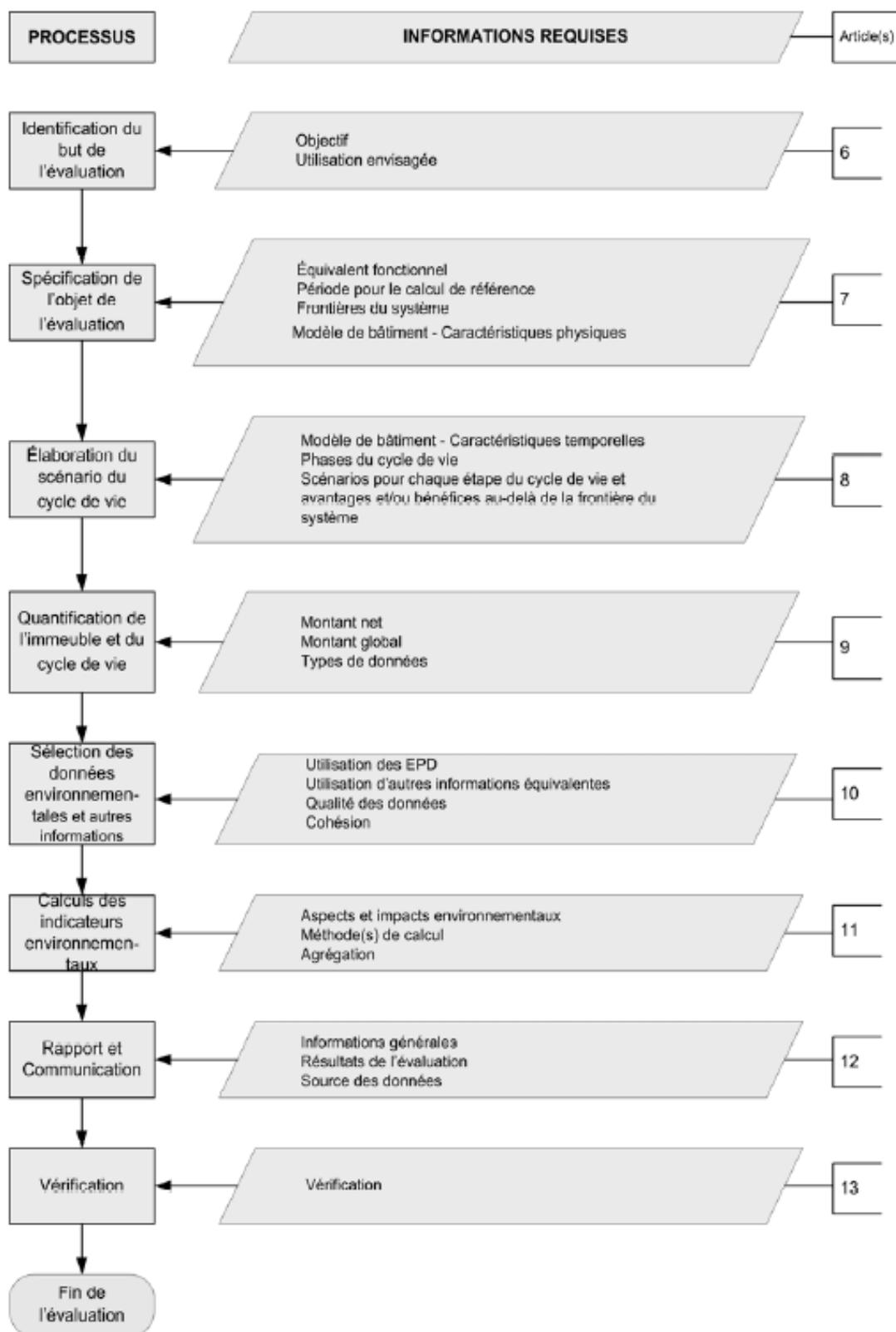


Figure 3-2 : Schéma de processus utilisé pour l'évaluation de la performance environnementale (CEN, 2011).

Les 2 dernières étapes ne seront pas développées ici. En effet, celles-ci portent sur la publication d'un rapport d'évaluation et du processus de vérification qui n'ont pas leur place dans le cadre de ce travail.

3.4.1 But de l'évaluation

L'**objectif** de l'évaluation est de déterminer la performance environnementale des 2 cas d'étude.

Le **domaine d'application et l'utilisation envisagée** de ce travail est la comparaison des performances environnementales de structures appartenant à 2 bâtiments semblables en tous points, sauf au niveau de leur structure, et donc, de déterminer si l'une des structures apporte un plus important d'un point de vue environnemental.

Cette évaluation environnementale de différentes structures constructives est, pour l'architecte, un élément complémentaire de guidance dans les choix techniques qui s'offrent à lui en début de projet.

3.4.2 Objet de l'évaluation

Dans le cadre de cette analyse, comme il s'agit de la comparaison de 2 structures différentes situées sur le même site, l'**équivalent fonctionnel** diffère selon le cas d'étude. La comparaison est faite en fonction d'une **unité de référence** (CEN, 2011) : la structure d'un bâtiment tertiaire de 37 niveaux accueillant principalement des bureaux et dont la durée de vie est estimée à 100 ans. En effet, seules les structures de chaque bâtiment sont étudiées. Cela comprend tous les éléments du bâtiment participant à sa stabilité, ainsi que les fondations.

L'**unité fonctionnelle** utilisée est le m^2/an pour plus de facilité de comparaison. En effet, pour comparer deux structures, il convient d'utiliser une unité se rattachant à l'usage du bâtiment. Le m^2 de fonction (par exemple, 1 m^2 de bureau) permet non seulement une comparaison, mais aussi une extrapolation aisée.

En ce qui concerne la **période de référence**, celle-ci est prise comme étant égale à la durée de vie de la structure (100 ans).

Ensuite, les **frontières du système** sont les frontières couvrant la phase de production jusqu'à la phase de fin de vie (modules A1 à C4). Cela correspond à une analyse de cycle de vie du berceau à la tombe. Le module D se rapportant aux avantages et charges en dehors des frontières du système est également donné à titre informatif.

Les phases du cycle de vie seront analysées par modules décrits sur la Figure 3-3 :

- le module A1-A3 est la production des produits de construction et reprend les ressources primaires, secondaires et l'énergie, le transport des matières premières et la production,
- le module A4-A5 est la construction du bâtiment et reprend le transport des produits vers le chantier et leur installation,
- le module B1-B7 est l'utilisation du bâtiment et reprend les consommations énergétiques et d'eau, le nettoyage, l'entretien, les réparations, les remplacements et l'éventuelle rénovation,
- le module C1-C4 est la fin de vie du bâtiment, le traitement des déchets qui comprend la démolition et le démontage, le transport des déchets vers la décharge ou le centre de valorisation, le traitement des déchets (tri ou préparation au recyclage ou à la réutilisation) et le traitement final (mise en décharge ou incinération).

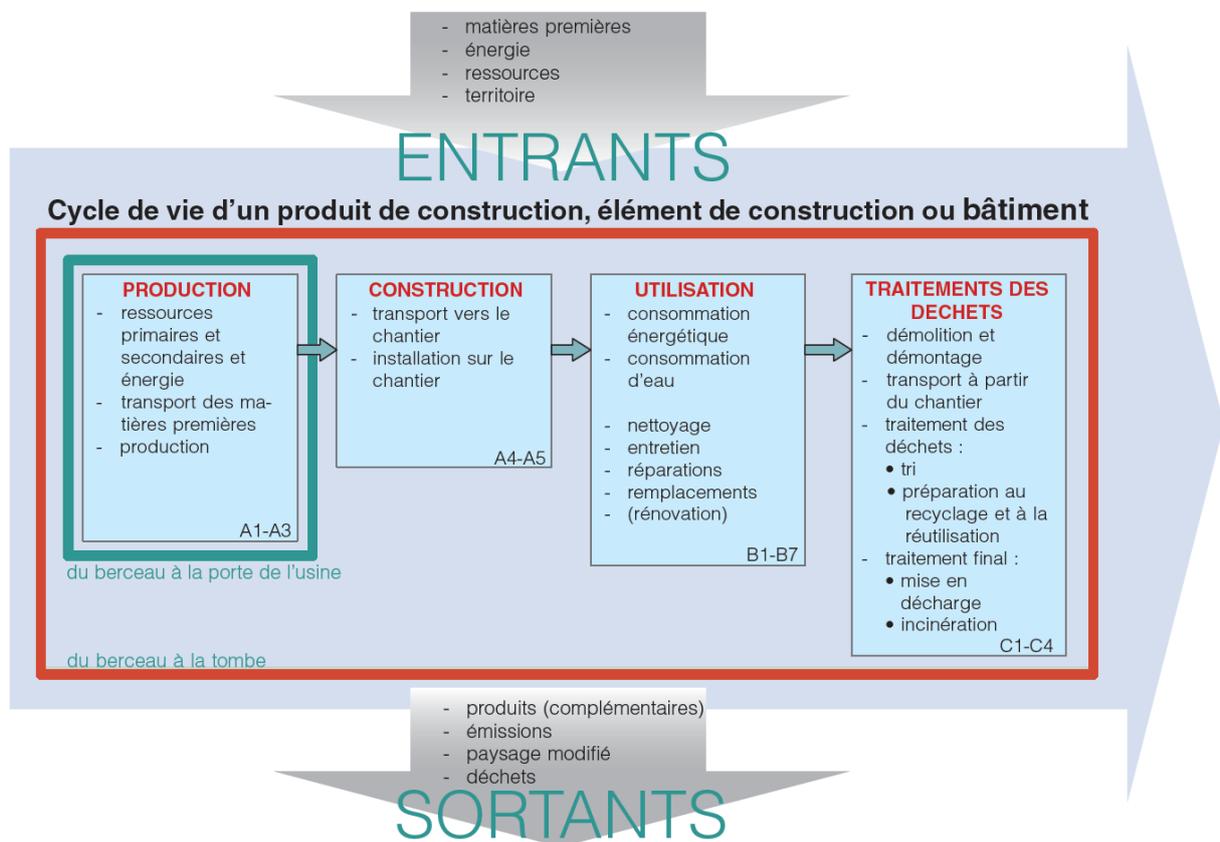


Figure 3-3 : Frontières du système (CSTC, 2013)

Il est à noter que l'éclairage, le chauffage et le nettoyage des ateliers de fabrication, le volet administratif, la fabrication des outils de production et tout ce qui a trait aux transports des personnes et des produits ne sont pas pris en compte dans les frontières du système (CTICM, 2011).

Finalement, cette étape du processus se termine par le **modèle du bâtiment**. Sur la Figure 3-4 ci-dessous on trouvera une arborescence illustrant le modèle de la partie du bâtiment étudiée :

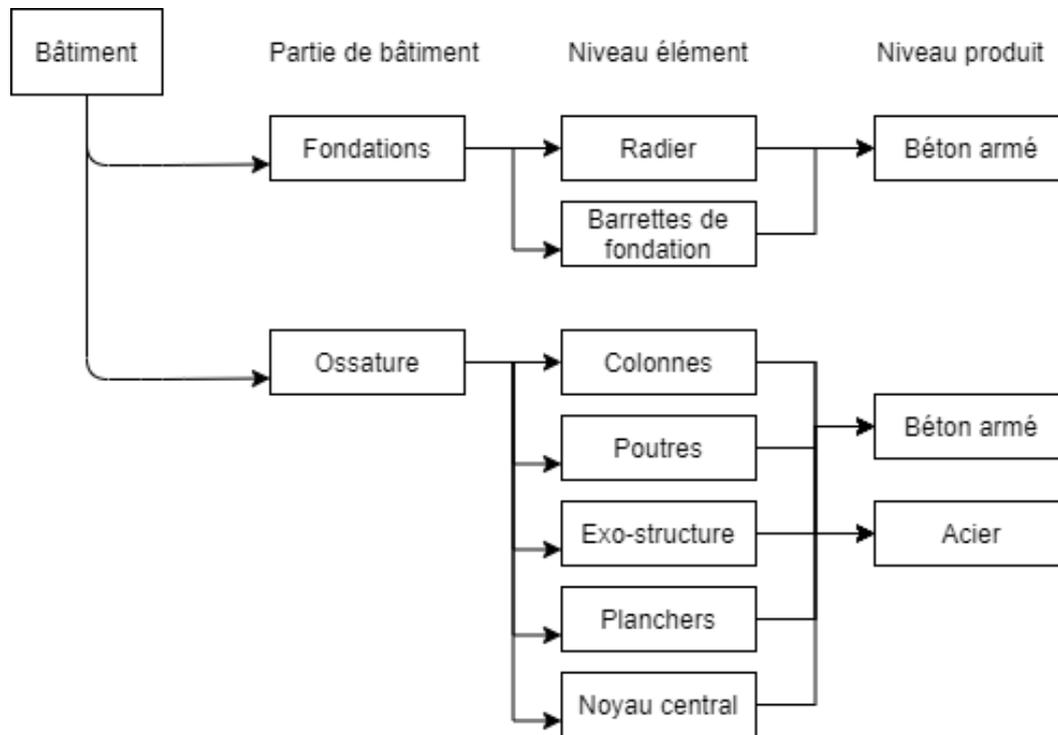


Figure 3-4 : Modèle de la partie du bâtiment étudiée (inspiration (CEN, 2011.))

Les caractéristiques physiques des 2 cas d'étude sont détaillées dans le chapitre 4 dédié aux cas d'étude.

3.4.3 Scénario du cycle de vie

Les différents scénarios du cycle de vie correspondant à chaque phase du cycle de vie sont décrits dans les FDES. Un résumé des scénarios du cycle de vie pour chacun des matériaux est également repris en annexe 1 et comprend les scénarios pour :

- les profilés reconstitués soudés en acier (CTICM, 2016),
- les poutrelles en acier (CTICM, 2016),
- le béton armé (SNBPE, 2019),
- le plancher collaborant (L'enveloppe métallique du bâtiment, 2018),
- les dalles alvéolées en béton précontraint (CERIB, 2019).

En ce qui concerne les **caractéristiques temporelles** et les scénarios qui y sont liés, aucun des éléments constituant la structure n'a besoin d'un entretien particulier durant sa vie

et on fait l'hypothèse qu'aucun de ces éléments ne devra être remplacé durant toute la durée de vie du bâtiment.

3.4.4 Quantification du bâtiment et du cycle de vie

Dans le cadre de cette étude, on fait l'hypothèse que les pertes de matériau sont négligeables (pertes dues à une détérioration, traitement...). Les quantités utilisées sont donc des quantités nettes et celles-ci sont tirées des plans et coupes pour le premier cas d'étude, la Tour D2 et elles sont tirées directement de la note de calcul du prédimensionnement pour le second cas, la tour fictive en béton.

Les informations utilisées pour la quantification du cycle de vie sont tirées des FDES qui sont des fiches collectives et représentatives de plusieurs produits similaires. Le type de données utilisées pour l'évaluation est donc des données collectives.

3.4.5 Sélection des données environnementales

Toutes les FDES utilisées au cours de cette étude couvrent entièrement le cycle de vie des produits et elles sont toutes conformes à l'EN 15 804. Aucune démarche n'est donc à effectuer.

3.4.6 Calcul des indicateurs environnementaux

Pour ce travail, seuls les indicateurs d'impacts environnementaux du Tableau 3-1 sont analysés

Tableau 3-1 : indicateurs environnementaux

Indicateur		Unité
Potentiel de réchauffement climatique	GWP	kg éq. CO ₂
Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique	ODP	Gg éq. CFC 11
Potentiel d'acidification du sol et de l'eau	AP	kg éq. SO ₂ ⁻
Potentiel d'eutrophisation	EP	kg éq. (PO ₄) ³⁻
Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique	POCP	kg éq. Éthylène
Potentiel de dégradation abiotique des ressources pour les éléments	ADP_éléments	kg éq. Sb
Potentiel de dégradation abiotique des combustibles fossiles	ADP_fossiles	MJ

Le choix de ces indicateurs s'explique par le fait « qu'ils correspondent à des méthodes de calcul approuvées pour les indicateurs mentionnés dans la présente Norme européenne » (CEN, 2011).

Les FDES donnent la contribution de chaque étape du cycle de vie sur chaque indicateur d'un produit. Pour connaître la valeur totale de l'indicateur, on procède par simple calcul matriciel comme décrit sur la Figure 3-5 :

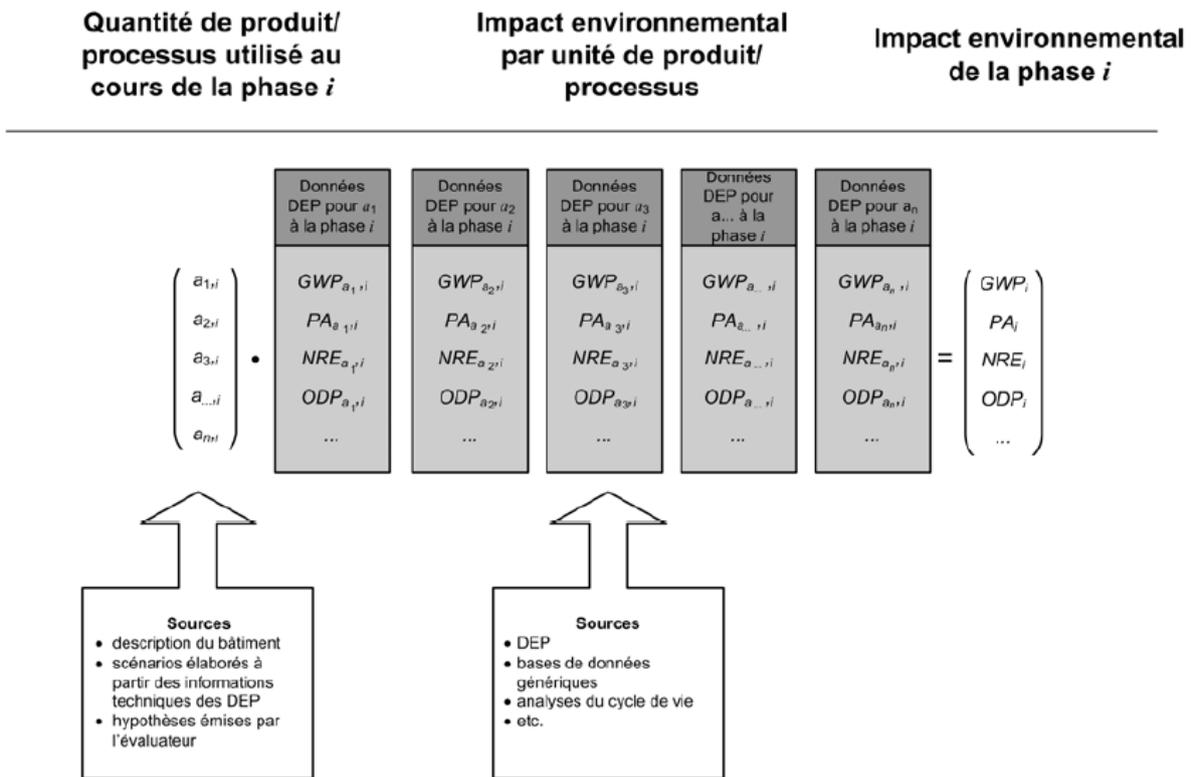


Figure 3-5 : Principe de calcul matriciel des impacts environnementaux (CEN, 2011).

Cela revient donc à :

- multiplier, pour chaque produit, la quantité totale de ce produit se trouvant au sein du bâtiment par les valeurs correspondant aux indicateurs d'impact environnemental données dans la FDES,
- diviser les résultats obtenus par la surface totale du bâtiment et par la durée de vie de manière à avoir un moyen de comparaison efficace et rapide pour les 2 systèmes constructifs. De cette manière, on retrouve notre unité fonctionnelle : m²/an,
- sommer les résultats de chaque produit relatifs au même indicateur d'impact environnemental.

À titre d'exemple, on obtiendra pour la quantification du potentiel de réchauffement climatique (CEN, 2011):

$$GWP_i = a_{1,i} \times GWP_{a_1,i} + a_{2,i} \times GWP_{a_2,i} + a_{3,i} \times GWP_{a_3,i} + \dots + a_{N,i} \times GWP_{a_n,i}$$

3.5 Validation des données

Afin d'assurer une certaine cohérence des résultats, la quantification des matériaux a été vérifiée par Monsieur Sylvain HOSTAUX, ingénieur civil actif dans le métier de la construction depuis de longues années. Celui-ci a confirmé l'ordre de grandeur des éléments mesurés sur

plans pour le cas d'étude n° 1 qu'est la Tour D2 et m'a également guidée dans la définition de la structure poteaux-poutres en béton.

3.6 Limites de la méthodologie

Pour ce travail, il a été choisi d'analyser uniquement le système porteur des 2 cas d'étude, en faisant donc l'hypothèse que les deux bâtiments ont le même confort intérieur, les mêmes performances énergétiques... Or, ces paramètres pourraient éventuellement induire des différences entre les 2 cas d'étude qui pourraient impacter sur la performance environnementale des cas étudiés. Par exemple, une quantité d'isolation plus importante pourrait être requise dans un des cas ou l'ensoleillement pourrait être moindre dans un des cas et donc, les demandes en chauffage ne seraient pas les mêmes. En effet, la comparaison de bâtiments dans leur entièreté n'est pas aisée puisqu'à chaque bâtiment correspondent des propriétés spécifiques (Buyle, Braet, & Audenaert, 2013).

Ensuite, les consommations d'énergie dues à la climatisation, à l'éclairage... durant toute la phase d'utilisation ne sont pas prises en compte. En effet, en faisant l'hypothèse que les 2 bâtiments sont similaires en tout point sauf au niveau de la structure, nous faisons l'hypothèse que ces consommations seraient égales, et donc, négligeables pour la comparaison des cas d'étude.

Additionnellement, la durée de vie des cas d'étude est fixée à 100 ans, ce qui correspond aussi à la durée de vie des éléments, selon les informations fournies dans les FDES. Une durée de vie de 100 ans est communément utilisée dans de nombreux travaux (Attia, 2016). Cependant, en réalité, la durée de vie d'un bâtiment varie d'un projet à l'autre.

Il faut garder en tête qu'une analyse de cycle de vie reste un modèle et que plusieurs hypothèses sont faites délibérément (Buyle et al., 2013), notamment dans les FDES où les distances parcourues et autres scénarios ne correspondent pas à 100 % à la réalité.

Finalement, une analyse de cycle de vie focalise uniquement sur les impacts environnementaux du bâtiment. Or, d'autres facteurs seraient également intéressants à analyser tels que l'aspect économique et l'aspect social, qui avec l'aspect environnemental forment les 3 piliers de la durabilité (Ortiz, Castells, & Sonnemann, 2009).

3.7 Comparaison et validation de la méthodologie

La méthodologie suivie permet finalement de répondre à notre question : quelle est la structure ayant la meilleure performance environnementale ?

Pour connaître cette réponse, les indicateurs environnementaux des 2 cas d'études sont comparés et, évidemment, le cas d'étude ayant les résultats les plus bas est celui dont la performance environnementale globale est la meilleure.

En ce qui concerne la validité de la méthodologie, elle repose essentiellement sur la norme : NBN EN 15 978. Plusieurs études suivant cette norme ont déjà été menées comme celle de Annette Hafner et Sabrina Schäfer « *Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level* » ou celle menée par la KULeuven pour Febelcem.

Chapitre 4: Cas d'étude et quantification de matériaux

Ce chapitre présente les deux cas d'étude en détaillant les éléments composant la structure ainsi que les hypothèses prises lors de la quantification de matériaux. Les caractéristiques physiques préconisées dans la norme NBN EN 15978 sont également détaillées dans ce chapitre et finalement, les deux structures sont comparées en termes de quantité de matériaux.

4.1 La Tour D2

4.1.1 Présentation



Figure 4-1 : La Tour D2 (Pibrac P-E et Urquijo F)

Année de construction	2015
Programme	Construction d'une tour de bureau
Surface	54 000 m ²
Maîtrise d'ouvrage	SOGECAP
Architectes	Agence d'architecture A. Bechu & Associés – Design Manager : Régis Lassausse
Entreprise de construction	Vinci
Maîtrise d'ouvrage déléguée	Sogepram et Bouygues Immobilier
Bureaux d'études	Setec TPI/DVVD, Setec Bâtiment, BERIM

Tableau 4-1 : Fiche d'identité de la Tour D2 (Bechu + Associés, s.d, *batiactu*, 2013)

La Tour D2 est un édifice situé dans le quartier de La Défense, à côté de Paris. Sa conception est le fruit de l'association de 2 architectes : A. Bechu et T. Sheehan qui ont travaillé avec le bureau DVVD en charge de la structure (Graffin, 2015).

La tour, culminant à 171 m de hauteur et abritant 37 niveaux, est caractérisée par sa structure en losanges, ses courbes et sa forme ovoïde ainsi que par le jardin suspendu se trouvant au dernier niveau : le jardin des nuages (Graffin, 2015).



Figure 4-2 : Jardin des nuages de la Tour D2 (Mathieu Ducros)

Le principe structurel de la Tour D2 est le suivant : une exostructure porteuse, composée de profilés en acier, sur lesquels viennent reposer des poutres métalliques supportant les planchers. Ces poutres sont directement reliées au noyau central en béton, qui est donc le seul élément statique de la structure (Graffin, 2015).



Figure 4-3 : Exostructure de la Tour D2 (Mathieu Ducros)



Figure 4-4 : Structure métallique de la Tour D2 (Construir Acier)

L'utilisation d'une telle exostructure est assez rare en France (la Tour D2 est la première tour à utiliser ce type de structure à La Défense). Sa conception a permis non seulement d'alléger la structure, mais aussi de dégager les plateaux (d'environ 1500 m²) (Graffin, 2015).

Ensuite, c'est cette même structure qui fait l'objet du biomimétisme. En effet, sa conception s'inspire d'un modèle organique : le périoste de l'os qui aurait permis de réaliser une économie de matériau de 30 % (Institut Veolia, 2019). Le périoste est le tissu fibro cellulaire qui recouvre la surface extérieure des os (Moukoko, 2010). Selon les 3 niveaux de biomimétisme définis par Zari (2007), il s'agirait donc ici de biomimétisme au niveau de l'organisme.

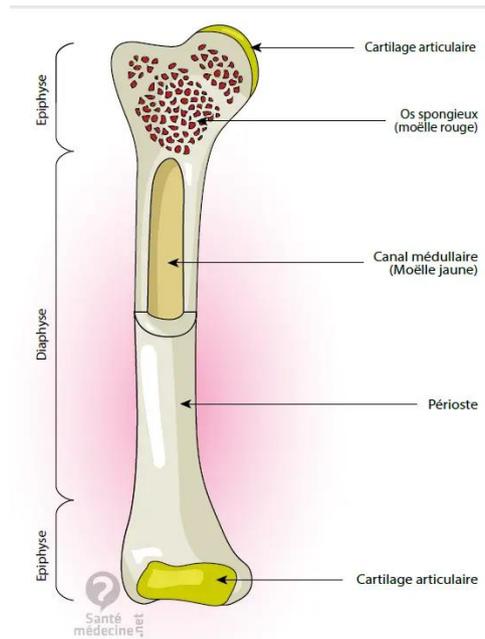


Figure 4-5 : Périoste de l'os (Santé médecine.net)

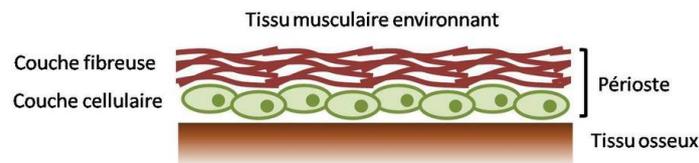


Figure 4-6 : Structure du périoste de l'os (Sarah Lemonier, 2015)

En plus de cette démarche biomimétique, la conception de la tour repose aussi sur la biophilie puisqu'elle est une allégorie de l'arbre (Institut Veolia, 2019). En effet, A.Bechu explique que le noyau central en béton au revêtement texturé rappelle l'écorce et représente le tronc, les poutres des planchers représentent les branches, l'exostructure qui s'y accroche représente le feuillage et, tout comme on peut se promener sous les frondaisons d'un arbre, la Tour D2 offre une galerie périphérique où peuvent déambuler les passants (MUUUZTV, 2015).

D'un point de vue environnemental, les performances de la Tour D2 sont très bonnes. En effet, la tour a obtenu les certifications HQE (haute qualité environnementale) et BREEAM (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method) niveau Very Good, mais aussi la labellisation BBC (bâtiment basse consommation) RT 2005 et elle est conforme à la RT 2012 (Graffin, 2015).

4.1.2 La structure de la Tour D2

Attardons-nous maintenant sur la structure plus en détail. Celle-ci est composée de 6 types d'éléments représentés sur les Figures 4-7 et 4-8:

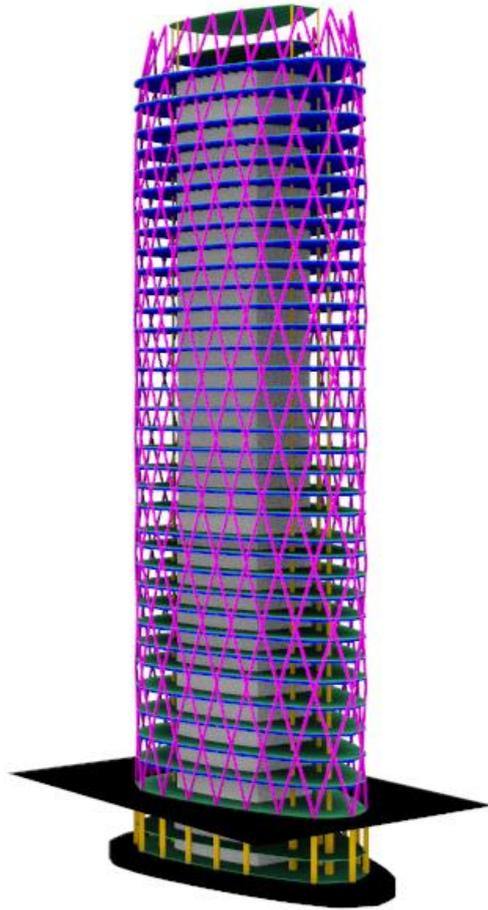


Figure 4-7: Schéma 3D de la Tour D2 (cas 1)

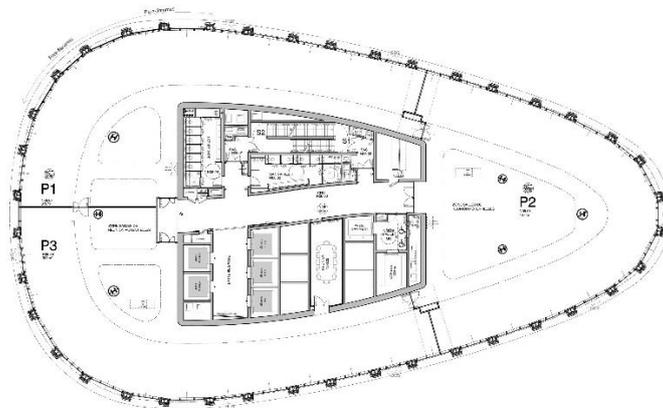


Figure 4-8 : Étage type de la Tour D2 (Anthony Bechu et Tom Sheehan)

1. L'**exostructure** : est composée de profilées HISTAR 460 MPa HD400 produits par Arcelormittal (ArcelorMittal, s. d.) dont les dimensions changent en fonction de la hauteur du bâtiment.
2. Le **plancher** : le type de planchers principalement utilisé est un plancher collaborant Cofraplus 60 (ArcelorMittal, s. d.). Au sous-sol, au sein du noyau et au dernier étage, une dalle béton classique est utilisée.
3. Les **poutres** : les poutres ACB® formées à partir de profilés IPE 450 et HEA 450 soutiennent les planchers (ArcelorMittal, s. d.). Ces poutres sont des poutres alvéolaires permettant notamment l'insertion des réseaux techniques.
4. Les **colonnes** : comme indiqué sur les plans, chaque niveau comporte 6 colonnes en acier revêtu. Au sous-sol, on retrouve des colonnes en béton.
5. Le **noyau central** : le noyau central a été réalisé en béton armé autoplaçant coulé entre coffrages glissants. Une autre particularité de ce béton est qu'il est tracé, c'est-à-dire qu'il contient des puces RFID (Radio Frequency IDentification) qui permettent d'obtenir des informations sur les performances, les caractéristiques... et la provenance du béton (batiactu, 2013).
6. Le **radier de fondation** : le volume de radier est estimé à 6500 m³ de béton autoplaçant pour une hauteur de 3 m selon Philippe Rouchette, directeur adjoint du projet (batiactu, 2013).
7. Les **fondations** : 86 barrettes (type de pieux moulés et forés) de fondation profondes allant jusque 23 m de profondeur ont été nécessaires, notamment parce que le bâtiment se trouve au-dessus d'une galerie technique (batiactu, 2013).

4.1.3 Hypothèses prises lors de la quantification de matériaux

1. L'**exostructure** : sachant qu'un élément pèse environ 583 kg/m (sections de 12 m de long pesant environ 7 tonnes (ArcelorMittal, s.d)), j'ai fait l'hypothèse que tous les profilés utilisés sont des HD 400 x 551 pour lesquels G = 551 kg/m selon le catalogue d'ArcelorMittal¹. En première approche, la variation de section est négligée,
2. Les **planchers** : les constituants (profil métallique et béton) sont RF120, ce qui est préconisé pour les bâtiments de grande hauteur. Dès lors, le profil a une épaisseur de 1mm et la dalle est épaisse de 16 cm,
3. Les **poutres** : n'ayant pas d'information sur la répartition de ces éléments dans le bâtiment, l'hypothèse que les poutres formées à partir d'IPE 450 sont utilisées partout

¹ <https://constructalia.arcelormittal.com/files/HD--9dc36b8ad1b7eca18d6dad22499036a4.pdf>

pour supporter le plancher (sauf pour les poutres périphériques) est faite. En effet, selon la fiche technique des poutrelles ACB, les profilés formés à partir de HEA450 sont utilisés à partir d'une portée de 9 m. Or, les portées des poutres sont toutes inférieures à cette valeur.

En ce qui concerne les poutres ceinture, on fait l'hypothèse qu'il s'agit de IPE O 600+. De cette manière, elles ont la même hauteur que les poutrelles ACB et l'assemblage est facilité.

4. Les **colonnes** : les profilés utilisés sont estimés en fonction des dimensions mesurées sur les plans et coupes. Au sous-sol, on fait l'hypothèse qu'il s'agit de colonnes en béton. En effet, les dimensions mesurées sont trop grandes pour correspondre à un profilé en acier.
5. Le **noyau central** : les dimensions utilisées correspondent à celles mesurées sur les plans et coupes.
6. Le **radier de fondation** : le radier a une épaisseur constante de 3 m
7. Les **fondations** : l'aire des barrettes est calculée dans la note de calcul du prédimensionnement du cas 2 en annexe 2.

4.2 La tour fictive « classique » en poteaux-poutres béton

La structure fictive en béton a été conçue pour être la plus proche possible de la structure de la Tour D2 réelle : noyau central en béton, même nombre de colonnes « intérieures », même surface au sol, même nombre de niveaux, toiture-terrasse.

Le prédimensionnement de la tour s'est fait à l'aide de fiches techniques de la société Ergon (pour les hourdis, les poutres et les colonnes). La note de calcul se trouve en annexe 2.

La structure est composée de 6 types d'éléments :

1. Les **hourdis**
2. Les **poutres**
3. Les **colonnes** : 6 colonnes « intérieurs » et 22 colonnes « périphériques » par étage
4. Le **noyau central** : le noyau central a été dimensionné comme s'il était en béton armé C25/30
5. Le **radier de fondation** : le radier a une épaisseur constante de 3 m
6. Les **fondations**

Les caractéristiques détaillées de ces éléments se trouvent en annexe 2.

4.2.2 Hypothèses prises lors de la quantification de matériau

Plusieurs hypothèses ont été faites durant les calculs de prédimensionnement (voir annexe 2) notamment :

- l'utilisation d'éléments préfabriqués pour plus de facilité sur le chantier,
- tous les niveaux jusqu'au 34^{ème} contiennent des bureaux,
- le radier de la tour fictive est le même que celui de la tour fictive et la différence de fondations se fait au niveau du nombre de barrettes.

4.3 Caractéristiques physiques des cas d'étude

Afin de compléter le modèle des cas d'étude (selon l'EN 15978) tel que présenté dans la section précédente, les caractéristiques physiques des cas d'étude sont ici fournies :

- forme et taille du bâtiment : dans les 2 cas, la structure forme un plan ovoïde. Le bâtiment mesure 171 m mais la partie supérieure surplombant la toiture-jardin n'est pas structurelle (Graffin, 2015). Dès lors, la hauteur de la structure est d'environ 150 m,
- nombre d'étages : dans les 2 cas, la structure compte 37 niveaux et 2 niveaux en sous-sol,
- hauteur des étages et dimensions totales : dans les 2 cas, la hauteur d'un étage type est de 3,84 m et l'aire de plancher totale au sein du bâtiment est d'environ 52 000 m², soit environ 1 400 m² par niveau (selon mes mesures),
- l'ossature structurelle, les fondations, les éléments de structures et les plafonds sont détaillés ci-dessus pour chacun des 2 cas,
- les éléments non porteurs, les fenêtres, les cloisons intérieures, la toiture jardin, les portes et escaliers, les faux plafonds, les systèmes (techniques, sanitaires, incendie, chauffage, climatisation, éclairage, communication et sécurité), les ascenseurs, le

réseau d'évacuation... ne sont pas pris en compte dans l'analyse de cycle de vie mais ils sont considérés comme étant les mêmes dans les 2 cas.

Chapitre 5: Résultats

La première partie des résultats porte sur la comparaison des quantifications de matériaux des deux cas d'étude.

La seconde partie est consacrée aux résultats obtenus lors de l'analyse de cycle de vie. Afin de comprendre pourquoi telle ou telle structure a de moins bons impacts environnementaux, les indicateurs sont d'abord comparés dans leur globalité (total) et, pour chaque indicateur environnemental, l'élément le plus défavorable est retenu. Dans un second temps, la même démarche a été appliquée pour chaque module du cycle de vie et ceci pour les 7 indicateurs environnementaux.

Dans la troisième partie, les impacts environnementaux des systèmes d'éléments équivalents des deux cas d'étude sont comparés. Dans cette démarche, les structures ont été scindées en plusieurs éléments facilement comparables. De cette manière, il est possible de déterminer quelle solution est la moins néfaste pour l'environnement.

5.1 Comparaison des quantifications des matériaux des cas d'étude

Dans le cas 1, bien que la structure soit une structure mixte acier-béton, la quantité de béton reste prédominante : la structure est composée à 93 % de béton et à 7 % d'acier. En effet, les éléments prédominants sont le noyau central, le radier et les fondations, tous les trois en béton et ensemble, ils représentent 69 % du poids total de la structure.

Dans le cas 2, les fondations et les hourdis sont les éléments les plus lourds de la structure et chacun d'eux participe à plus d'un quart du poids total.

La comparaison des deux cas d'étude selon leur poids est illustrée sur la Figure 5-1. On remarque que la structure en béton du cas 2 est 1,15 fois plus lourde que celle du cas 1. On peut donc en conclure que la structure du cas 1 réalise 15 % d'économie grâce à son système constructif mixte acier-béton.

De plus, le noyau central, le radier et les fondations des 2 cas d'étude sont du même ordre de grandeur. En effet, le noyau central du cas 2, la tour fictive est légèrement inférieur (la structure étant plus lourde, le moment stabilisant est plus important), les radiers sont les mêmes dans les 2 cas et finalement, la structure du cas 2 étant plus lourde que celle du cas 1, ses fondations sont donc plus importantes. Les éléments verticaux périphériques, l'exostructure dans le cas 1 et les colonnes en béton dans le cas 2, sont présents en quantité similaire également.

Comparaison du poids de la structure [kg/m²/an]

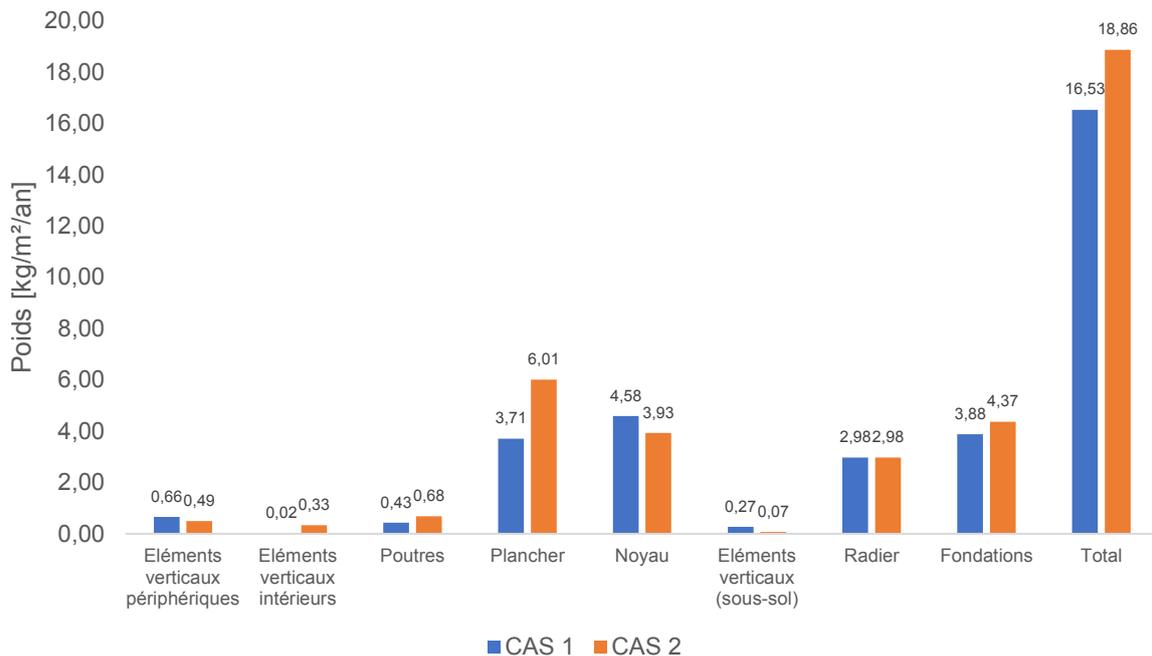


Figure 5-1 : Comparaison du poids de la structure

Pour plus de détails concernant les quantités de matériaux composant les structures ainsi que la contribution de chacun des éléments sur le poids de celles-ci, l'annexe 3 reprend des tableaux plus détaillés.

De cette quantification de matériau, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- la structure du cas 2 est 1,15 fois plus lourde que la structure du cas 1,
- le noyau central, le radier et les fondations sont 3 éléments prédominants dans le poids des structures,
- l'acier contribue à 7 % du poids total de la structure du cas 1.

5.2 Résultats des ACV

5.2.1 ACV du cas 1

Dans cette section se trouvent les résultats obtenus après la réalisation de l'analyse de cycle de vie du cas 1 (la Tour D2). Les résultats obtenus selon l'unité de référence se trouvent dans l'annexe 4.

Afin de faciliter la comparaison dans les sections suivantes, les valeurs obtenues sont divisées par la surface totale (52 025 m²) du bâtiment et par sa durée de vie (100 ans) de manière à retrouver notre unité fonctionnelle : m²/an. Les résultats obtenus pour chaque

indicateur environnemental et à chaque étape de cycle de vie sont synthétisés dans le Tableau 5-1 ci-après.

Tableau 5-1 : Résultats de ACV de la structure de la Tour D2 selon l'unité fonctionnelle

	Unités	TOT A1-A3	TOT A4- A5	TOT B1- B7	TOT C1- C4	TOTAL	D
GWP	kg éq. CO ₂ /m ² /an	3,52E+00	9,46E-01	-5,99E-02	1,03E-01	4,50E+00	-9,78E-01
ODP	kg éq. CFC11/ m ² /an	1,82E-07	9,67E-08	0,00E+00	1,07E-07	3,84E-07	-2,48E-09
AP	kg éq. SO ₂ ⁻ /m ² /an	9,09E-03	2,79E-03	0,00E+00	1,44E-03	1,33E-02	-1,26E-03
EP	kg éq. (PO ₄) ^{3-/} m ² /an	1,07E-03	3,40E-04	0,00E+00	3,15E-04	1,73E-03	-1,49E-04
POCP	kg éq. Éthylène/m ² /an	1,27E-03	4,90E-04	0,00E+00	9,30E-05	1,85E-03	-5,27E-04
ADP_éléments	kg éq. Sb/m ² /an	1,26E-05	6,54E-07	0,00E+00	3,73E-09	1,33E-05	-1,49E-07
ADP_fossiles	MJ/m ² /an	3,01E+01	1,09E+01	0,00E+00	2,82E+00	4,38E+01	-9,29E+00

Lors de l'analyse des résultats, on remarque que, pour le total de l'analyse de cycle de vie, l'exostructure est l'élément prédominant pour le GWP (potentiel de réchauffement climatique), à part quasiment égale avec les poutres en acier, ODP (potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique), AP (potentiel d'acidification du sol et de l'eau), EP (potentiel d'eutrophisation) à part quasiment égale avec les poutres en acier, POCP (potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone troposphérique) légèrement inférieur aux poutres en acier et ADP_fossiles (potentiel de dégradation abiotique des combustibles fossiles) à part quasiment égale avec les poutres en acier. En ce qui concerne ADP_éléments (potentiel de dégradation abiotique des combustibles fossiles) ce sont les planchers collaborants qui ont le plus grand impact.

L'étape ayant le plus mauvais impact sur chaque indicateur environnemental est mise en évidence en jaune dans le Tableau 5-1. Nous pouvons ainsi voir que, pour la structure du cas 1, c'est l'étape de production A1-A3 qui influence le plus le résultat final.

De plus, ce sont les éléments en acier (exostructure et poutre en acier) qui contribuent le plus à quasi l'ensemble des potentiels des indicateurs environnementaux durant la phase de production A1-A3. On peut donc conclure que, pour le cas 1, la production de l'acier est celle la plus néfaste pour l'environnement.

On remarque également que, pour l'ADP (éléments), c'est encore l'étape de production A1-A3 qui est prédominante, et que ce sont les planchers collaborants qui contribuent le plus au potentiel (plus de 90 % de la contribution totale) (et ce, sur l'ensemble du cycle de vie).

La mise en œuvre (A4-A5) et la fin de vie (C1-C4) des planchers collaborants sont les étapes plus néfastes sur l'ensemble des indicateurs environnementaux.

En phase d'utilisation (B1-B7), on remarque que c'est le noyau qui a l'impact le plus favorable sur le GWP.

Les éléments participant le plus aux impacts environnementaux sont donc l'exostructure, les planchers collaborants et les poutres en acier. Cependant, ce sont aussi les poutres en acier, avec le noyau en béton, qui ont le meilleur impact sur l'environnement en dehors des frontières du système (étape D). En effet, après la fin de vie de la structure, les bénéfices liés à la récupération, le recyclage et la réutilisation les plus importants sont ceux dus aux poutres en acier, sauf pour l'ODP et ADP (éléments) où ces bénéfices sont ceux du noyau en béton.

5.2.2 ACV du cas 2

De la même manière, dans cette section, on trouve les résultats obtenus après la réalisation de l'analyse de cycle de vie du cas 2 (bâtiment fictif à structure « classique »). Les résultats obtenus selon l'unité de référence se trouvent dans l'annexe 4.

Afin de faciliter les comparaisons dans les sections suivantes, ces résultats sont calculés selon l'unité fonctionnelle m^2/an . Nous obtenons alors les résultats synthétisés dans le Tableau 5-2 suivant :

Tableau 5-2 : Résultats de l'ACV de la structure de la tour fictive en béton selon l'unité fonctionnelle

	Unités	TOT A3	A1- TOT A5	TOT B7	B1- TOT C4	TOTAL	D
GWP	kg éq. CO ₂ /m ² /an	1,49 E+00	5,04E-01	-7,80 E-02	6,57 E-03	1,92E+00	-7,47 E-02
ODP	kg éq. CFC11/m ² /an	8,28 E-08	5,00 E-08	0,00 E+00	4,46 E-08	1,78E-07	-3,09 E-09
AP	kg éq. SO ₂ ⁻ /m ² /an	3,47 E-03	1,40 E-03	0,00 E+00	9,46 E-04	5,81E-03	-2,14 E-04
EP	kg éq. (PO ₄) ³⁻ /m ² /an	5,03 E-04	1,77 E-04	0,00 E+00	2,06 E-04	8,86E-04	-2,36 E-05
POCP	kg éq. Éthylène/m ² /an	1,69 E-04	2,21 E-04	0,00 E+00	4,15 E-05	4,32E-04	-3,71 E-05
ADP_éléments	kg éq. Sb/m ² /an	1,96 E-07	1,69 E-08	0,00 E+00	1,89 E-08	2,32E-07	-1,00 E-07
ADP_fossiles	MJ/m ² /an	5,47 E+00	5,78 E+00	0,00 E+00	1,98 E+00	1,32E+01	-8,63 E-01

Pour le total de l'analyse de cycle de vie, les éléments participant le plus aux impacts environnementaux sont les hourdis, le radier et les fondations. Cependant, durant l'analyse des résultats, nous avons constaté que la contribution entre les éléments de la structure est équitablement répartie (si on excepte les colonnes et poutres qui sont en quantité moindres au sein de la structure).

En jaune les étapes de cycle de vie ayant le plus mauvais impact sur chaque indicateur environnemental sont mises en évidence. Le Tableau 5-2 ci-dessus montre que, pour la structure du cas 2, les étapes de vie de la structure ayant le plus grand impact environnemental sont l'étape de production A1-A3 pour le GWP, ODP, AP, EP et ADP_éléments et l'étape de construction A1-A5 pour le POCP et ADP_fossiles.

La production (A1-A3) des hourdis est celle qui impacte le plus l'environnement pour l'ensemble des indicateurs. Toutefois, au niveau global, d'autres éléments (radier et fondations) contribuent encore plus à l'impact environnemental : le radier est l'élément le plus défavorable pour le GWP et le POCP et les fondations sont les éléments les plus défavorables pour l'ODP et EP.

Lors de la mise en œuvre (A4-A5), le radier est un élément important car il est responsable d'au moins 30 % du GWP, AP, EP (contribution égale à celle du noyau), POCP, ADP

(éléments et fossiles). Dans le cas de l'ODP, ce sont les fondations qui contribuent le plus à ce potentiel.

Lors de la vie en œuvre (B1-B7), le noyau a un impact positif majeur sur le potentiel de réchauffement climatique (grâce à la carbonatation).

Lors de la fin de vie (C1-C4), les fondations jouent un rôle déterminant pour l'ODP, AP, EP, POCP et ADP (fossiles) et on remarque également que, pour l'ADP (éléments), les hourdis contribuent à 98 % du total de ce potentiel. Pour le GWP, l'élément qui contribue le plus est le noyau.

Après la fin de vie de la structure (étape D), les bénéfices liés à la récupération, le recyclage et la réutilisation les plus importants sont ceux liés au radier, pour le GWP, POCP, ADP (fossiles), aux fondations pour l'ODP et ADP (éléments) et au noyau pour l'AP et EP.

5.2.3 Comparaison des totaux de l'analyse de cycle de vie

Les résultats obtenus pour chacun des 7 indicateurs environnementaux et sur l'ensemble des étapes du cycle de vie (total) sont synthétisés par la Figure 5-2 ci-après :

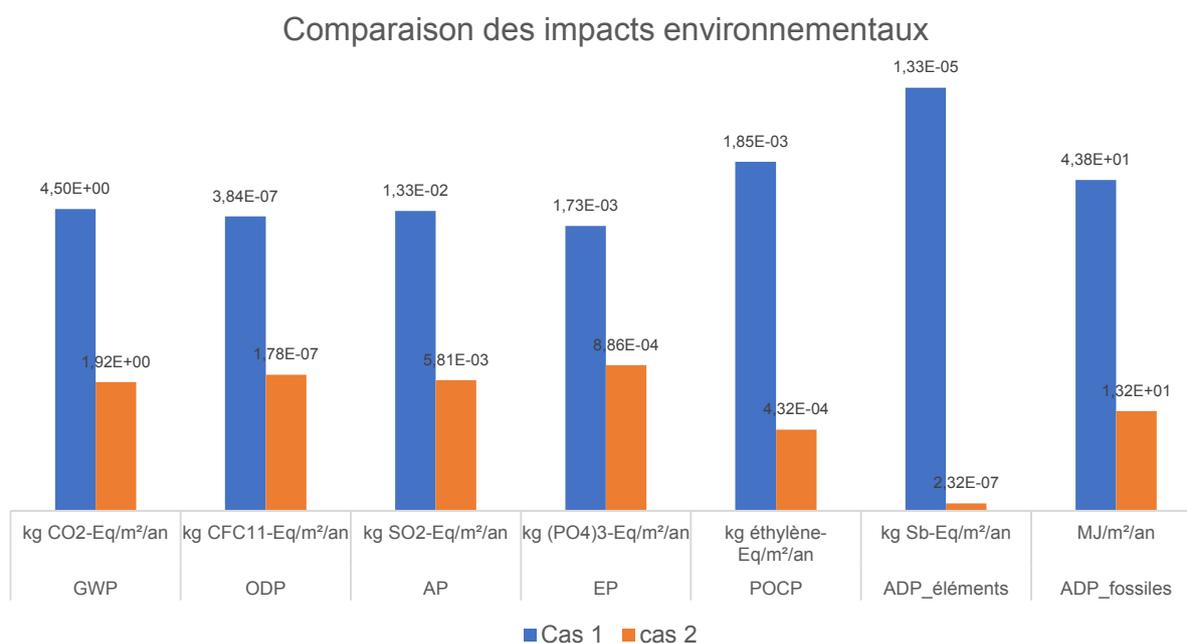


Figure 5-2 : Comparaison des impacts environnementaux (totaux)

De manière globale, la Figure 5-2 montre que le cas 1 a un impact environnemental supérieur au cas 2, ce qui répond à la question principale de ce travail. Ce constat se vérifie surtout pour l'ADP_éléments et l'ADP_fossiles, ainsi que pour le POCP.

En effet, pour l'ADP_éléments, la différence entre le cas 1 et le cas 2 est de l'ordre de 98 %. Pour l'ADP_fossiles, elle est de l'ordre de 70 %. Et enfin, pour le POCP, la différence entre les 2 cas est de l'ordre de 76 %.

Les résultats et les graphiques montrent clairement que la structure mixte acier-béton a de plus grands impacts environnementaux et ce, sur l'ensemble des étapes de cycle de vie. Néanmoins, comme le montre la Figure 5-3 ci-après, c'est aussi pour cette structure qu'on observe le plus grand bénéfice dû à la réutilisation, la récupération et le recyclage après la fin de vie du bâtiment. Cette étape D prise en compte, la différence entre les impacts environnementaux des 2 cas d'étude diminue vers un équilibre (excepté pour le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques (éléments)). Sur la Figure 5-3, les éléments en gris, pour le cas 1, et en jaune, pour le cas 2, représentent les bénéfices observés, et donc, la diminution du potentiel des indicateurs environnementaux quand l'étape D est prise en compte.

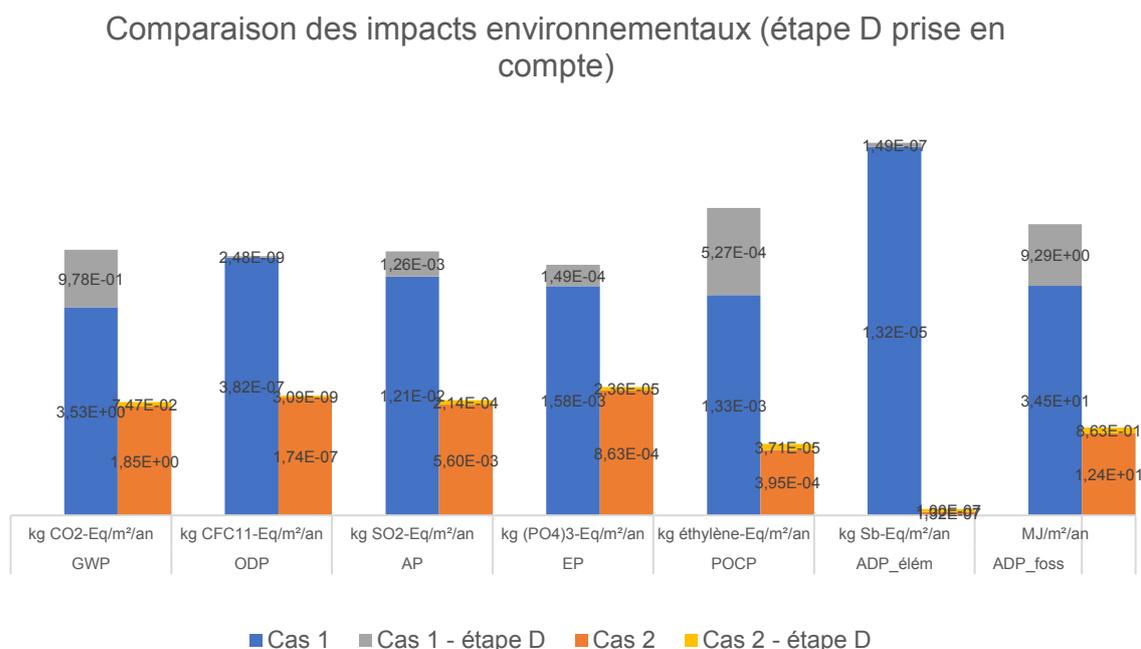


Figure 5-3 : Comparaison des impacts environnementaux - Étape D prise en compte

De plus, lors de l'analyse des résultats obtenus pour chacune des étapes du cycle de vie (voir annexe 4), nous avons pu voir que, dans le cas 1, les colonnes, qu'elles soient acier ou béton n'influencent pas beaucoup le résultat. En effet, elles ne représentent qu'une petite partie de la structure, ce qui explique ce résultat. Il en est de même pour les poutres du cas 2. L'impact de ces poutres et colonnes est inférieur à celui des autres éléments car elles se trouvent en quantité moindre au sein de la structure. La contribution aux potentiels des

différentes catégories d'impacts étudiées dépend forcément de l'importance quantitative de l'élément en cause au sein de la structure.

D'une manière générale, on constate que la contribution des éléments dans le cas 2 est plus équilibrée qu'elle ne l'est dans le cas 1. Cela est visible dans les résultats de l'annexe 4 et c'est également mis en évidence dans le Tableau 5-3. En effet, on remarque que les éléments les plus impactants sur le résultat de l'analyse de cycle de vie, dans le cas 2, sont partagés entre les hourdis, le radier, les fondations et le noyau alors que, dans le cas 1, les éléments qui prédominent sont l'exostructure et les planchers collaborants.

Le Tableau 5-3 montre également que, la phase de production A1-A3 est la phase qui contribue le plus aux potentiels des indicateurs environnementaux dans le cas 1 alors que dans le cas 2, ce sont les phases de production A1-A3 et de mise en œuvre A4-A5 qui ressortent.

Nous pouvons aussi constater que, dans les 2 cas, des gains sur le GWP apparaissent lors du module B1-B7 (phase d'utilisation). La Figure 5-4 illustre ce résultat.

Plus précisément, ces impacts positifs sont réalisés durant la phase B1 – Usage. Ce résultat est dû au phénomène de carbonatation du béton, phénomène durant lequel le béton absorbe du CO₂ ce qui impacte positivement le GWP, d'où la valeur négative obtenue. Le phénomène de carbonatation n'a pas d'impact sur les autres indicateurs environnementaux.

De plus, comme le montre la Figure 5-4, dans les 2 cas, le gain généré durant cette phase est minime en comparaison des autres modules (notamment le module A1-A3). Néanmoins, on remarque que les gains engendrés durant la phase B1-B7 sont légèrement supérieurs pour le cas 2. (Il est à noter que les bénéfices engendrés par le béton des planchers collaborant ne sont ici pas pris en compte (voir FDES)).

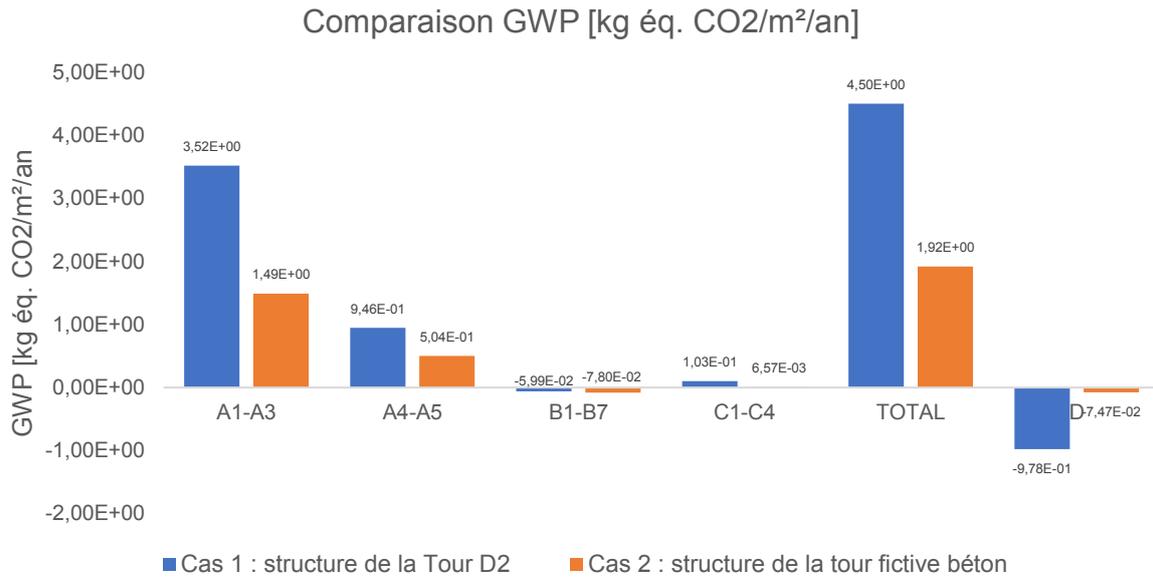


Figure 5-4 : Comparaison GWP

5.2.4 Récapitulatif des résultats des ACV

Le Tableau 5-3 synthétise pour chacun des 2 cas d'étude, pour chacune des étapes de vie et pour chaque indicateur environnemental, l'élément contribuant le plus à l'impact environnemental ainsi que sa contribution en pourcentage. Par exemple, pour le cas 1, et pour l'étape de production A1-A3, les éléments ayant la plus grande contribution sur le GWP sont les poutres en acier et leur contribution est évaluée à 28 % de la contribution totale de la structure.

Tableau 5-3 : Tableau récapitulatif des résultats

		GWP	ODP	AP	EP	POCP	ADP_ ÉLÉMENTS	ADP_ FOSSILES	
CAS 1	A1-A3	28 %	36 %	29 %	27 %	39 %	98 %	39 %	
	A4-A5	28 %	22 %	29 %	26 %	31 %	97 %	28 %	
	B1-B7	-62 %	/	/	/	/	/	/	
	C1-C4	40 %	29 %	23 %	23 %	28 %	90 %	22 %	
	TOTAL	24 %	24 %	27 %	24 %	22 %	31 %	98 %	30 %
	A1 – C4	%	%						
	D	-47%	-35 %	-64 %	-39 %	-51 %	-24 %	-51 %	
CAS 2	A1-A3	27 %	26 %	30 %	26 %	28 %	29 %	39 %	
	A4-A5	32 %	27 %	32 %	27 %	37 %	30 %	33 %	
	B1-B7	-42 %	/	/	/	/	/	/	
	C1-C4	50 %	30 %	28 %	28 %	30 %	98 %	27 %	
	TOTAL	24 %	27 %	24 %	24 %	29 %	33 %	26 %	
	A1-C4								
	D	-32%	-27 %	-30 %	-28 %	-35 %	-34 %	-32 %	

Légende :

	Poutres acier
	Exostructure
	Planchers collaborants
	Noyau
	Hourdis
	Radier
	Fondations
	Étape de vie prédominante

Le Tableau 5-3 montre que les étapes de vie prédominantes (encadrées en jaune) sont les étapes de production A1-A3 et de mise en œuvre A4-A5.

De plus, dans le cas 1, on remarque que les éléments les plus impactants sont principalement les planchers collaborants (en vert), l'exostructure (en bleu) et les poutres en acier (en gris).

Dans le cas 2, ce sont les hourdis (en beige), le radier (en brun) et les fondations (en mauve) qui ont le plus d'impact sur le résultat final. Néanmoins, on remarque que l'impact des éléments constituant la structure est équilibré.

5.3 Comparaison des éléments des structures

De manière à pouvoir comparer les impacts environnementaux des éléments « équivalents » des 2 cas d'étude, les structures sont scindées en 5 sous-ensembles représentatifs :

- les éléments verticaux (exostructure et colonnes)
- les planchers (planchers collaborants, dalle béton, hourdis et poutres),
- le noyau,
- le radier,
- les fondations.

Les résultats obtenus pour chaque élément et pour les 7 indicateurs environnementaux selon chaque module (A1-A3, A4-A5, B1-B7, C1-C4 et D (à titre indicatif)) sont donnés en annexe 4.

5.3.1 Comparaison des éléments verticaux

En ce qui concerne les éléments verticaux, la Figure 5-5 montre que ceux du cas 1 (exostructure, colonnes en béton ou en acier) ont un impact environnemental total supérieur à ceux du cas 2 (colonnes en béton) et ce, pour l'ensemble des indicateurs environnementaux. Cela se confirme aussi dans l'analyse de chaque indicateur environnemental détaillée étape par étape (voir annexe 4).

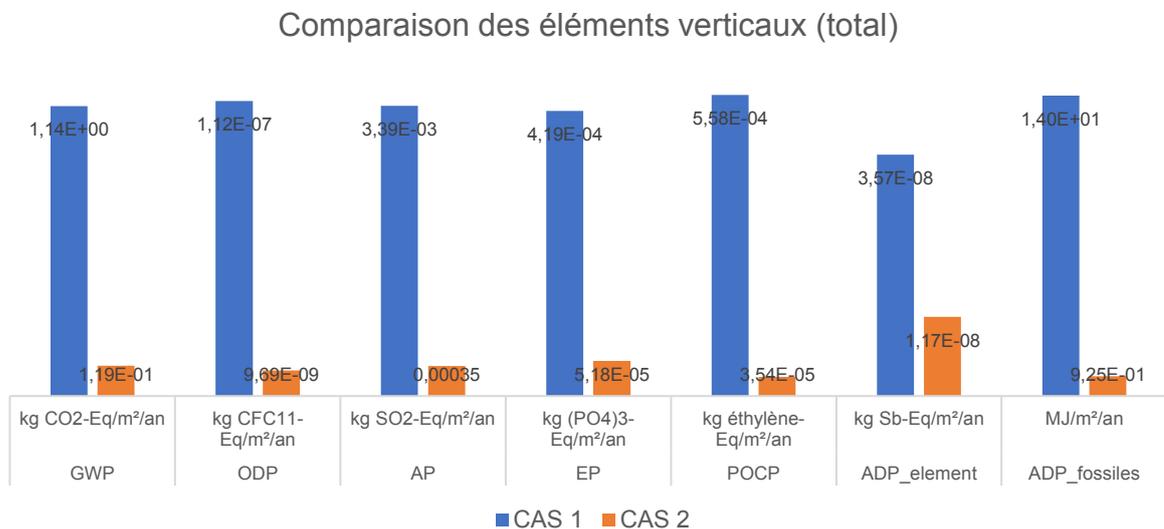


Figure 5-5 : Comparaison des éléments verticaux (total ACV)

De plus, dans le Tableau 5-3, on peut voir que l'exostructure est un élément prédominant, notamment lors de la production A1-A3, pour la majorité des indicateurs environnementaux. De plus, lors de l'analyse des résultats obtenus pour chaque étape de cycle de vie et pour chaque indicateur environnemental, nous avons constaté que les

colonnes, qu'elles soient en acier ou en béton, avaient une contribution minimale en comparaison avec les autres éléments de la structure et il en est de même pour les colonnes en béton qui ont toujours une contribution inférieure à d'autres éléments (radier, fondations, noyau, hourdis). À titre d'exemple, les Figures 5-6 et 5-7 illustrent la contribution des éléments pour le GWP pour l'ensemble des étapes de vie. La différence observée lors de la comparaison des impacts environnementaux des éléments verticaux est donc due principalement à l'exostructure.

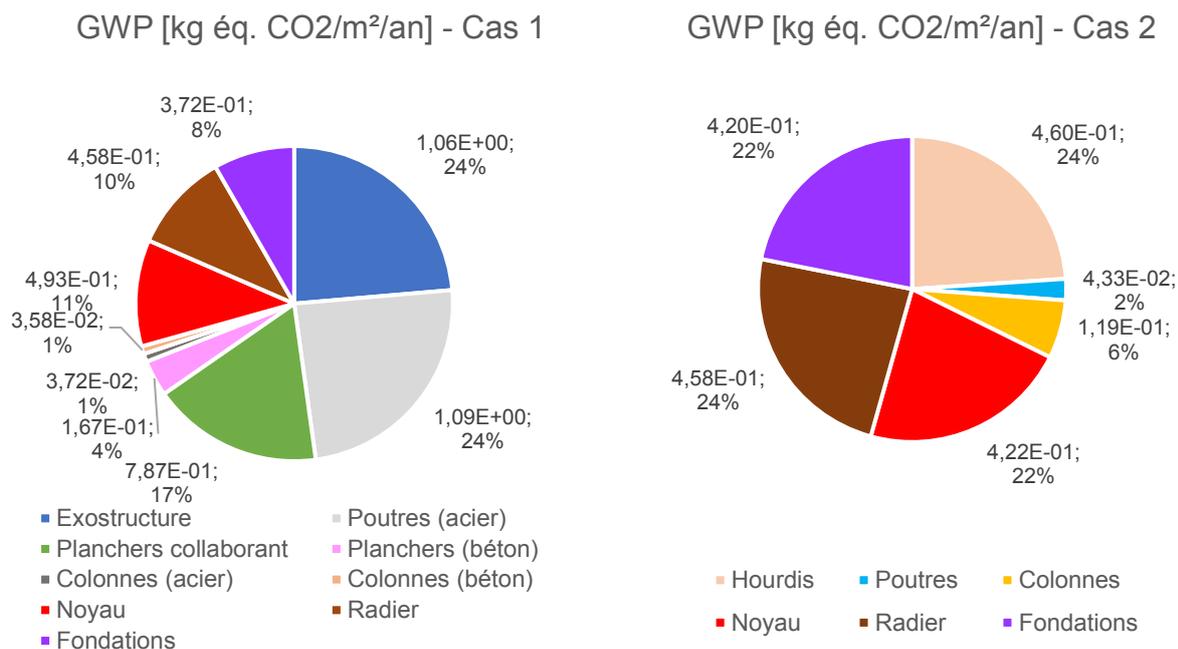


Figure 5-6 : GWP - contribution des éléments - Cas 1

Figure 5-7 : GWP - contributions des éléments - Cas 2

5.3.2 Comparaison des systèmes de planchers

Comparons à présent les systèmes de planchers. Dans le cas 1, il s'agit principalement des planchers collaborants supportés par des poutres en acier et dans le cas 2, des hourdis et des poutres en béton. Les résultats obtenus pour l'ensemble des étapes du cycle de vie sont repris dans la Figure 5-8. On peut voir que, pour le total de l'analyse de cycle de vie, dans le cas 1, les planchers collaborants et les poutres en acier qui les soutiennent ont un impact bien supérieur à ceux des hourdis et poutres en béton du cas 2 alors qu'en masse, le système de plancher du cas 2 est plus conséquent (voir Figure 5-1 qui compare le poids des deux structures).

Comparaison des systèmes de planchers

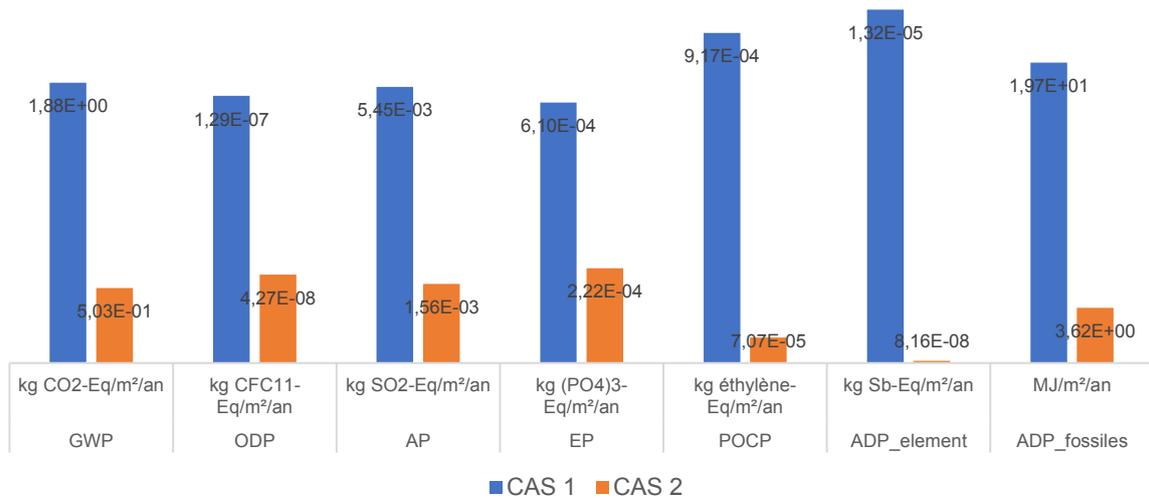


Figure 5-8 : Comparaison des systèmes de plancher

De plus, comme représenté sur le Tableau 5-3, les planchers collaborants et les poutres en acier sont des éléments qui contribuent énormément sur l'ensemble des potentiels des indicateurs environnementaux.

En effet, les planchers collaborants du cas 1 sont les éléments les plus défavorables sur l'ensemble des indicateurs environnementaux lors de la mise en œuvre (module A4-A5) et lors de la fin de vie (module C1-C4) alors que durant ces étapes de cycle de vie, la contribution des hourdis est inférieure à celle du radier, fondations ou noyau (sauf pour l'ADP_éléments) et celle des poutres est minime par rapport aux autres éléments (maximum 3 % de la contribution totale).

Les poutres, quant à elles, ont un impact non négligeable lors de la production (module A1-A3) et, bien que les hourdis soient les éléments qui impactent le plus les résultats du cas 2 lors de cette étape de vie, l'impact engendré par les poutres en acier du cas 1 reste tout de même supérieur à celui engendré par les hourdis.

5.3.3 Comparaison des noyaux

Pour le noyau, comme le montre la Figure 5-9, le potentiel de chaque indicateur est légèrement supérieur (8 %) dans le cas 1 comparé au cas 2.

Comparaison des noyaux

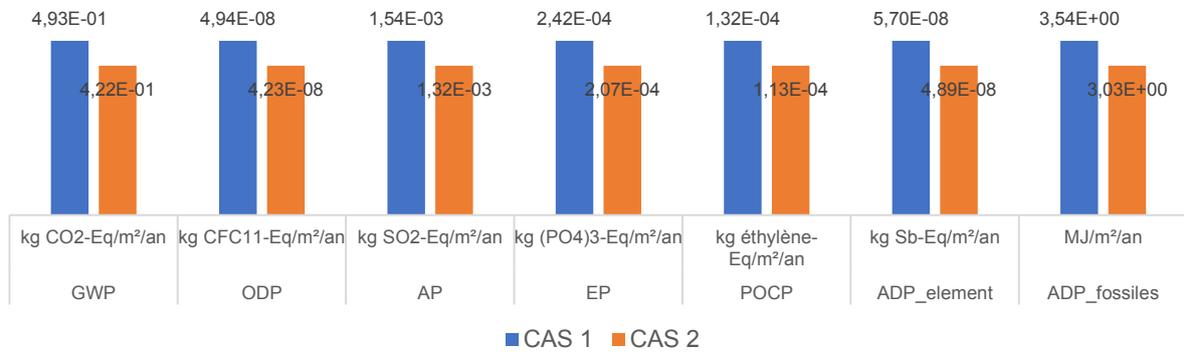


Figure 5-9 : Comparaison des noyaux

5.3.4 Comparaison des radiers

En ce qui concerne les radiers, comme le montre la Figure 5-10, ils ont les mêmes contributions sur chacun des indicateurs étant donné qu'ils ont les mêmes dimensions et sont composés du même matériau.

Comparaison des radiers

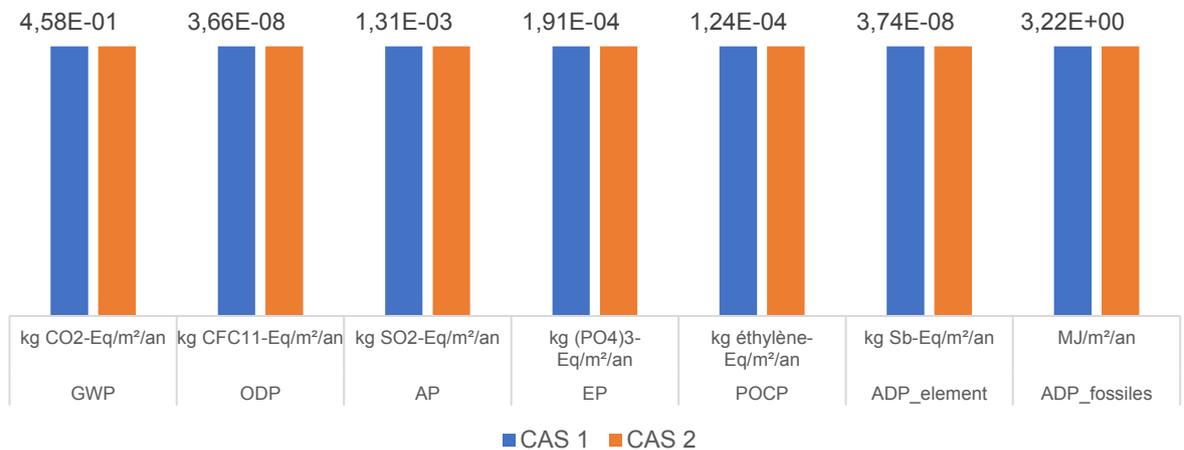


Figure 5-10 : Comparaison des radiers

Lors de l'analyse de la contribution de chaque élément sur les indicateurs environnementaux, l'hypothèse de radiers similaires dans les 2 cas d'étude nous a permis de déceler la grande influence de l'exostructure sur les impacts environnementaux. En effet, même si les radiers sont les mêmes dans les 2 cas d'étude, ils n'ont pas la même contribution selon que l'on soit dans le cas 1 ou le cas 2. Dans le cas 1, le radier ne contribue qu'à environ

10 % pour chacun des impacts environnementaux étudiés alors que dans le second cas d'étude, il est un élément prédominant qui contribue à 1/4 du potentiel de chacun des impacts étudiés. Cela est visible sur les Figures 5-6 et 5-7 représentant la contribution des éléments des structures sur le GWP.

5.3.5 Comparaison des fondations

Finalement, les fondations du cas 2 ont un impact environnemental un peu plus conséquent (6 %) que les fondations du cas 1. Cette différence d'impact entre les fondations du cas 1 et du cas 2 est identique pour chaque indicateur, comme l'illustre la Figure 5-11.

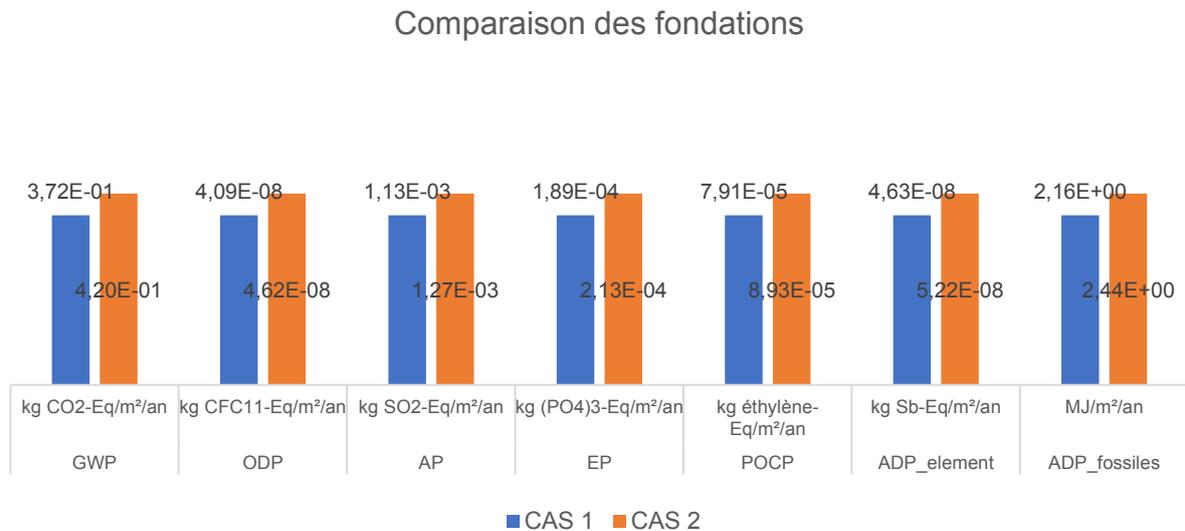


Figure 5-11 : Comparaison des fondations

5.3.6 Récapitulatif des comparaisons des éléments de structure

Après cette analyse, on remarque que c'est au niveau des éléments verticaux et des systèmes de planchers qu'apparaissent les plus grandes différences de résultats entre les 2 cas d'étude. En effet, même si les impacts environnementaux des fondations sont plus importants pour le cas 2, la différence avec les résultats obtenus pour les fondations du cas 1 est de 6 % alors que les différences entre les résultats obtenus pour les éléments verticaux et les systèmes de planchers des deux cas sont de 50 % au minimum.

Pour l'ensemble de ces éléments, les impacts environnementaux totaux ont été regroupés dans le Tableau 7 récapitulatif ci-dessous. La plus grande valeur obtenue entre les 2 cas pour chaque système d'élément équivalent et pour chaque indicateur est indiquée en jaune.

Tableau 4 : Résultats récapitulatifs des impacts environnementaux totaux par éléments

	Eléments verticaux		Système de planchers		Noyaux		Radiers		Fondations	
	Cas 1	Cas 2	Cas 1	Cas 2	Cas 1	Cas 2	Cas 1	Cas 2	Cas 1	Cas 2
GWP kg CO2- Eq/m²/an	1,14E+00	1,19E-01	1,88E+00	5,03E-01	4,93E-01	4,22E-01	4,58E-01	4,58E-01	3,72E-01	4,20E-01
ODP kg CFC11- Eq/m²/an	1,12E-07	9,69E-09	1,29E-07	4,27E-08	4,94E-08	4,23E-08	3,66E-08	3,66E-08	4,09E-08	4,62E-08
AP kg SO2- Eq/m²/an	3,39E-03	3,50E-04	5,45E-03	1,56E-03	1,54E-03	1,32E-03	1,31E-03	1,31E-03	1,13E-03	1,27E-03
EP kg (PO4)3- Eq/m²/an	4,19E-04	5,18E-05	6,10E-04	2,22E-04	2,42E-04	2,07E-04	1,91E-04	1,91E-04	1,89E-04	2,13E-04
POCP kg éthylène- Eq/m²/an	5,58E-04	3,54E-05	9,17E-04	7,07E-05	1,32E-04	1,13E-04	1,24E-04	1,24E-04	7,91E-05	8,93E-05
ADP_ éléments kg Sb- Eq/m²/an	3,57E-08	1,17E-08	1,32E-05	8,16E-08	5,70E-08	4,89E-08	3,74E-08	3,74E-08	4,63E-08	5,22E-08
ADP_ fossiles MJ/m²/an	1,40E+01	9,25E-01	1,97E+01	3,62E+00	3,54E+00	3,03E+00	3,22E+00	3,22E+00	2,16E+00	2,44E+00

On remarque que pour chaque type d'élément, l'impact environnemental est prépondérant pour le cas 1 sur l'ensemble des indicateurs environnementaux sauf pour le radier où les impacts sont identiques et pour les fondations où l'impact du cas 2 est supérieur à celui du cas 1.

Chapitre 6: Discussion

Dans ce chapitre, les résultats obtenus sont discutés et interprétés et, selon les constats opérés lors de la réalisation de ce travail et lors de l'analyse des résultats obtenus, quelques recommandations sont données. Afin de valider les résultats obtenus, ceux-ci sont comparés à des études déjà existantes. Ensuite, les principales forces et limites de mon travail sont expliquées et, finalement, les répercussions de mon travail sur les architectes ou scientifiques ainsi que des pistes pour de futures recherches sont données.

6.1 Résumé des résultats obtenus et recommandations

6.1.1 Résultats et interprétation

Relativement à la quantification des matériaux dans les 2 cas d'étude, nous avons constaté que la structure du cas 2 est 1,15 fois plus lourde que celle du cas 1. Cette différence est due principalement au poids des éléments de planchers et des poutres qui les soutiennent. En effet, comme le montrent la Figure 5-1, les hourdis et les poutres du cas 2 (6,69 kg/m²/an, soit 35 % du poids total de la structure) sont plus lourds que les planchers collaborants et poutres en acier du cas 1 (2,57 kg/m²/an ou 16 % du poids total de la structure). Cette différence de poids a évidemment une influence sur les fondations qui sont alors plus importantes dans le cas 2.

Les Figures 6-1 et 6-2 nous permettent à nouveau de souligner que, dans les 2 cas, le noyau, le radier et les fondations représentent une part importante du poids total de la structure.

Cas 1 - composition de la structure [kg/m²/an]

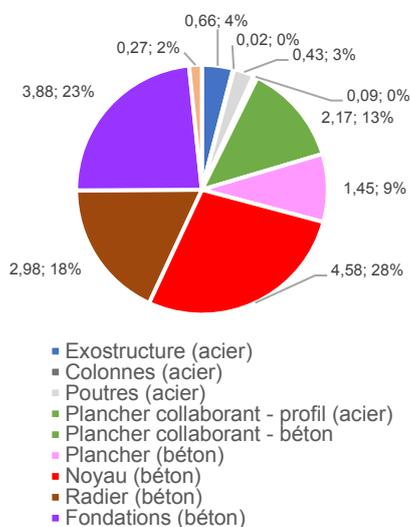


Figure 6-1 : Composition de la structure - cas 1

Cas 2 - composition de la structure [kg/m²/an]

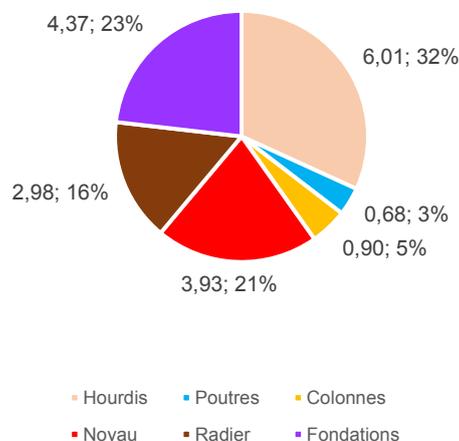


Figure 6-2 : Composition de la structure - cas 2

Les résultats obtenus pour le cas 1 tels que repris dans le Tableau 5-3 montrent que l'exostructure et les poutres en acier sont les éléments qui impactent le plus l'environnement. Or, on pourrait penser que, étant donné que l'exostructure et les poutres en acier ne représentent qu'une petite partie du poids total de la structure, leur impact serait également mineur. En effet, l'exostructure n'intervient qu'à hauteur de 4 % et les poutres en acier qu'à hauteur de 3 % du poids total et pourtant, ce sont ces éléments qui ont le plus grand impact environnemental essentiellement en raison de leur production, alors que les éléments pondéreux (radier, fondation, noyau) contribuent nettement moins à l'impact environnemental.

Dans le second cas, en suivant le même raisonnement, les résultats semblent logiques car le radier, les fondations et les hourdis dans leur ensemble représentent près de 3/4 du poids total de la structure et, comme le montre le Tableau 5-3, il s'agit aussi des éléments les plus impactants.

Afin de mettre en évidence la corrélation poids-impact, nous analysons chaque indicateur par kg d'éléments. Pour chaque indicateur, l'élément le plus défavorable est repris dans le Tableau 6-1 ci-après. Les graphiques détaillés se trouvent en annexe 5.

Tableau 6-1 : Éléments défavorables par kg

		GWP	OPD	AP	PE	POCP	ADP_ ÉLÉMENTS	ADP_ FOSSILES
CAS 1	Élément prédominant	Planchers collaborants	Planchers collaborants					
CAS 2	Élément prédominant	Radier	Radier	Radier	Radier	Radier	Colonnes	Radier

On remarque que dans le cas 1, les éléments les plus néfastes pour l'environnement (selon les 7 indicateurs environnementaux choisis) au kg sont de loin les planchers collaborants.

Pour le cas 2, les éléments les plus néfastes pour l'environnement (selon les 7 indicateurs environnementaux choisis) au kg sont le radier et les colonnes. Cependant, on remarque que chacun des éléments a un impact du même ordre de grandeur par kg, ce qui n'est pas le cas pour les éléments du cas 1 (voir annexe 5).

À titre d'exemple, les résultats obtenus pour le GWP sont illustrés par les Figures 6-3 et 6-4 ci-après.

La Figure 6-3 nous montre la différence entre l'acier et le béton. En effet, au kg, l'impact de l'acier sur le GWP est beaucoup plus important que le béton.

La Figure 6-4 quant à elle montre que tous les éléments de la structure du cas 2 ont un impact similaire sur le GWP étant donné qu'ils sont tous en béton.

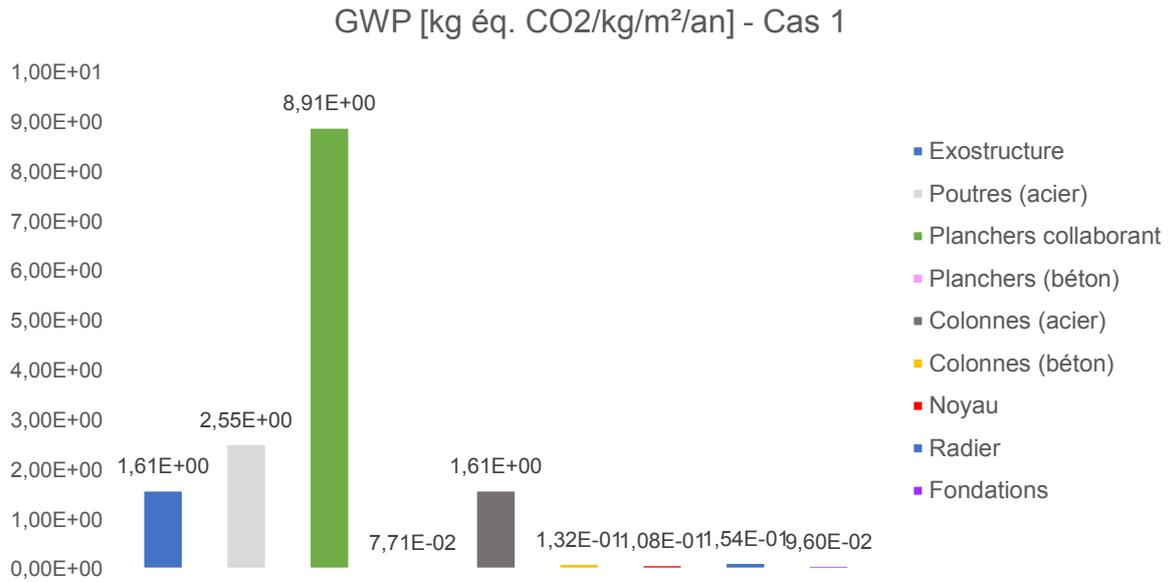


Figure 6-3 : GWP [kg éq. CO₂/kg/m²/an] – cas 1

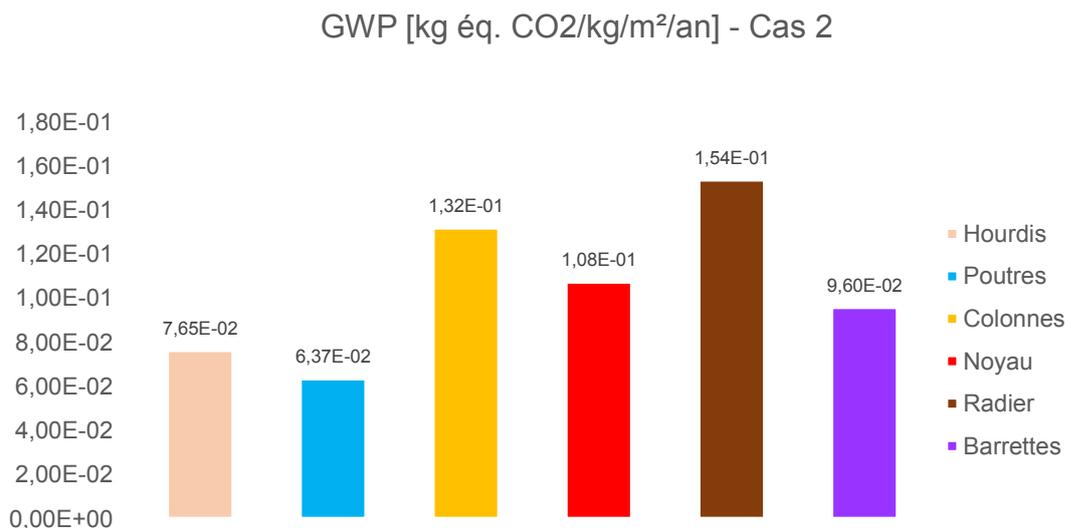


Figure 6-4 : GWP [kg éq. CO₂/kg/m²/an] - cas 2

Sur base de ces constats, on peut se demander pourquoi utiliser ces systèmes constructifs. En effet, en ce qui concerne les planchers, leur impact environnemental au kg est bien supérieur à celui des hourdis et, bien que les hourdis représentent un poids plus important dans le cas 2 que les planchers collaborants du cas 1, nous avons pu voir que l'impact environnemental des premiers restait moindre.

D'autres critères ont donc pu être pris en compte lors de la conception. Par exemple, l'utilisation de hourdis a pour conséquence une hauteur de plancher cumulée plus importante que les planchers collaborants : l'épaisseur des hourdis est d'environ 30 cm alors que

l'épaisseur des planchers collaborants est d'environ 20 cm, soit pour 40 étages, une différence d'environ 4 m et donc, d'au moins un étage. De plus, l'accès au chantier est plus facile pour les tôles des planchers collaborants (le béton étant fabriqué sur place), tandis que les hourdis préfabriqués en usine demandent un charroi beaucoup plus important pour les acheminer sur le chantier, surtout au cœur des villes (pour les équivalents fonctionnels étudiés, les hourdis sont 70 fois plus lourds que les profilés métalliques des planchers collaborants).

Concernant l'exostructure, nous avons constaté que, malgré son faible poids global au sein de la structure, son impact environnemental était très important. Cependant, une telle exostructure permet une liberté architecturale beaucoup plus difficile à atteindre avec une structure classique en béton.

De même, en ce qui concerne les poutres en acier, celles-ci, malgré leur petite contribution au poids total de la structure, ont un impact environnemental important puisque, avec l'exostructure, il s'agit des éléments prédominants pour les potentiels des indicateurs environnementaux, notamment durant leur production (comme le montre le Tableau 6-1).

Cependant, l'acier à l'avantage d'être recyclable quasi indéfiniment et, au-delà des frontières du système (étape D), c'est majoritairement grâce aux éléments en acier que des bénéfices sont effectués, comme il ressort de la Figure 5-3.

De plus, des critères autres que les critères environnementaux peuvent pousser les concepteurs à s'orienter vers une structure composée d'acier.

Par exemple, même si la résistance au feu du béton est supérieure à celle de l'acier, le comportement de ce dernier a un énorme avantage pour les pompiers, qui grâce à la ductilité du matériau, peuvent mieux évaluer le danger d'effondrement. En outre, une structure en acier s'effondre vers l'intérieur ce qui permet aux hommes du feu d'attaquer un éventuel incendie au plus près (« Acier vs béton », s. d.). Cette propriété ductile permet également de faire face à des actions sismiques plus importantes que dans le cas d'une structure en béton beaucoup plus rigide.

De plus, le temps consacré à la mise en œuvre sur chantier est réduit pour les éléments préfabriqués en usine, de même que le nombre d'intervenants, ce qui diminue d'autant les délais d'exécution et les frais fixes de chantier.

Dans le cas 1, le Tableau 5-3 montre que les phases de mise en œuvre et de fin de vie des planchers collaborants sont assez importantes et participent grandement aux potentiels des indicateurs environnementaux. En ce qui concerne l'étape de mise œuvre, cela peut s'expliquer par la distance à parcourir jusqu'au chantier donné dans la FDES. En effet, pour

les planchers collaborants, celle-ci est de 489 km, ce qui est bien supérieur aux distances à parcourir pour les autres éléments. Par exemple, dans le cas 2, les hourdis ont une distance de 170 km à parcourir pour arriver au chantier.

Également pour l'étape de fin de vie, les planchers collaborants sont prédominants pour l'ensemble des indicateurs environnementaux. Encore une fois, cela peut s'expliquer par les distances à parcourir, dans ce cas-ci, vers le centre de valorisation et vers la décharge. En effet, la FDES utilisée pour les planchers collaborants compte une distance de 250 km pour le centre de valorisation et 50 km vers la décharge ce qui est supérieur aux distances comptées pour les autres éléments. Par exemple, pour le noyau en béton, les distances à parcourir vers le centre de valorisation ou la décharge sont de 30 km. De plus, la carbonatation du béton en décharge pour le plancher collaborant n'est pas prise en compte alors qu'elle l'est pour les autres éléments en béton.

À présent, si on compare l'étape D de chacun des cas, on constate une plus grande capacité de réutilisation, de recyclage et de réutilisation de l'acier par rapport au béton. En effet, l'acier à recycler entre intégralement dans la production du nouveau produit fini. Dans le cas du béton, les graves ne sont généralement pas réutilisées dans la production du même produit fini (bien que des essais sont actuellement en cours afin de pouvoir réutiliser ces graves dans des bétons structuraux) mais plutôt comme fondation dans des infrastructures routières. Les éléments apportant le plus de bénéfices au-delà des frontières du système sont donc aussi ceux ayant l'impact négatif le plus important lors de l'étape de production.

6.1.2 Recommandations

Ce travail montre que les appellations « biomimétique », « bio-inspirée »... connotées plutôt positivement ne sont pas forcément synonymes de bonnes performances environnementales, du moins pour la structure (car il faut garder en tête que dans le cadre de ce TFE, seule la partie structurelle des bâtiments a été étudiée et que d'autres critères pourraient influencer le résultat vers une autre issue). En effet, on pourrait penser que la structure biomimétique est celle dont les performances environnementales sont les meilleures alors que les résultats obtenus disent le contraire, prouvant ainsi qu'il ne faut pas se fier à une terminologie au demeurant parfois « tapageuse ».

Ensuite, de premier abord, on pourrait penser que le cas 1, avec sa structure métallique, allait être beaucoup plus léger qu'un bâtiment dont la structure est en béton et que cette économie de matière mènerait vers des performances environnementales meilleures. Cependant, l'acier ne représente qu'une petite partie de la structure, étant donné que plusieurs éléments sont « communs » à une structure en acier béton et une structure en béton. Par

exemple, ici, l'hypothèse que le radier en béton armé était le même dans les 2 cas d'étude a été faite et le noyau central, en béton armé également, a le même ordre de grandeur dans les 2 cas.

Comme le montre la Figure 5-1 qui compare les poids des structures des 2 cas d'étude, ce paramètre diffère de 15 % entre les 2 cas d'étude et, dès lors, rien n'assure qu'une structure ou l'autre aura de meilleures performances environnementales.

De plus, les hypothèses qui peuvent être faites lors d'une analyse de cycle de vie et donc, les écarts qui peuvent avoir lieu d'une analyse de cycle de vie à l'autre, l'utilisation d'une base de données ou l'autre, peuvent influencer de manière importante les résultats finaux. En effet, des écarts significatifs peuvent exister, même lorsque les bases de données utilisées sont reconnues et approuvées (Lasvaux et al., 2015). Il est dès lors recommandé de ne pas prendre les résultats obtenus au pied de la lettre sachant que des résultats différents auraient pu être obtenus avec un autre logiciel ou une autre base de données. Cette réflexion peut s'appliquer également à d'autres concepts que l'analyse de cycle de vie comme les différents labels ou certifications qui existent : lors de la conception, ces éléments constituent un critère parmi beaucoup d'autres qui peut influencer le choix de l'auteur de projet mais qui ne doit pas s'imposer impérativement.

Une autre recommandation est qu'il n'y a pas de bon ou de mauvais matériau, il faut « juste » utiliser chaque matériau de construction à bon escient et en ayant pleinement conscience des impacts qu'il peut avoir en termes d'environnement (ce qui fait l'objet de ce travail) mais aussi en termes d'économie, de social, d'esthétique...

En effet, même si l'acier et le béton sont des matériaux de construction qui ont des impacts indéniables sur l'environnement, ce sont des matériaux très courants qui continueront certainement à être utilisés dans le domaine de la construction pour un ensemble de propriétés bien connues (pour l'acier : résilience, rapport résistance-poids important... et pour le béton : matériaux économiques, bonne résistance en compression...). Cependant, il faut les utiliser à bon escient, là où ils concourent le mieux à la réalisation de l'idée du concepteur. Comme nous avons pu voir dans ce travail, le béton a des impacts environnementaux moindres que ceux de l'acier, donc, là où l'acier n'est pas nécessaire, il vaut mieux privilégier le béton, par exemple dans des espaces où l'encombrement des poutres/colonnes a peu d'importance (comme en caves par exemple).

Dans la même optique, l'utilisation de planchers collaborants est peu recommandée au vu des impacts environnementaux qu'ils ont, notamment sur le potentiel d'épuisement

abiotique. Cependant, un plancher collaborant permet une mise en œuvre économe (en coût, en moyens de manutention et transport) ce qui, dans certains cas, justifie son utilisation.

De plus, il est difficile de trouver des FDES qui correspondent exactement aux produits recherchés (par exemple, ma demande de FDES auprès des fabricants est restée sans suite) ou qui correspondent aux frontières du système fixées. Une recommandation serait donc d'élargir au maximum les bases de données de FDES afin que les concepteurs puissent y trouver les fiches répondant exactement à leurs besoins en ne perdant pas de vue que cet outil est relativement neuf, qu'il est en plein développement actuellement et qu'il se perfectionne continuellement.

Une autre recommandation pour les concepteurs de projets consiste à privilégier des structures modulables. En effet, nous avons pu voir que la phase de production des matériaux est celle qui impacte le plus les performances environnementales d'une structure. Il pourrait donc paraître intéressant de réfléchir en termes d'allongement de la durée de vie des matériaux en anticipant d'éventuels changements d'affectation qui n'impacteraient pas la structure. Par exemple, penser à une réaffectation de bureaux en logements dès la conception. De cette manière, l'étape d'utilisation s'en trouverait allongée d'une seconde vie qui ne nécessite pas la production de nouveaux matériaux.

Les résultats de ce travail montrent que les impacts environnementaux des structures utilisées fréquemment (acier et béton) sont très importants. Cependant il existe des pistes qui pourraient être explorées dans le but de les améliorer, des pistes classiques pouvant être mises en concurrence avec des pistes novatrices. Par exemple, des structures en bois pour les bâtiments élevés, des bétons structurels à base d'agrégats de récupération, un choix raisonné dans l'utilisation d'acier avec une valeur de récupération importante, l'emploi de matériaux biosourcés...

Bien que les résultats obtenus lors de ce travail montrent que la structure « biomimétique » n'a pas d'impacts environnementaux plus favorables sur l'environnement qu'une structure classique, le biomimétisme peut quand même être un moyen d'améliorer la structure de bâtiments. En effet, l'inspiration d'un organisme biologique peut effectivement mener à une structure optimale, cependant, les matériaux de construction courants ne sont pas les plus adaptés pour donner à la structure biomimétique tout son potentiel. L'acier et le béton restent des matériaux très polluants, il faudrait donc se tourner vers des matériaux plus naturels. Par exemple, le « Hy-Fi » par The Living est une construction réalisée en briques à base de mycélium de champignon.



Figure 6-5 : Hy-Fi par The Living - source : <https://www.dezeen.com/2014/07/01/tower-of-grown-bio-bricks-by-the-living-opens-at-moma-ps1-gallery/>

Le futur laisse entrevoir des conceptions architecturales dans lesquelles les matériaux, actuellement à l'état de projet ou encore inconnus, permettront cette transition vers une architecture respectueuse de notre environnement.

Finalement, à la genèse de tout projet, le concepteur a à sa disposition une multitude d'outils et de données lui permettant une liberté créatrice qui, en intégrant le plus grand nombre de critères tant environnementaux que techniques ou artistiques, mettra en avant sa capacité à répondre à ses aspirations. Le concepteur est alors libre de choisir quel(s) critère(s) (environnemental, économique, esthétique...) il privilégie mais il doit être pleinement conscient de l'impact de ses choix.

6.2 Validation – comparaison avec d'autres travaux

Pour rappel, dans la littérature existante, les avis divergent sur la structure ayant le moins d'impacts environnementaux (acier ou béton).

Afin de valider les résultats obtenus, ceux-ci sont comparés avec d'autres travaux déjà existants. Des études obtenant des résultats similaires aux miens sont détaillées ci-après.

Sur 11 études comparant des structures en béton, en acier et en bois, les résultats obtenus pour le GWP montrent que le béton peut avoir une meilleure performance que l'acier (Saade et al., 2020). Sur la Figure 6-6 tirée du travail de Saade et al., les chiffres représentent le nombre de cas d'étude pour lesquels le matériau, représenté par sa couleur, a obtenu de meilleurs résultats que son « opposant ». On peut donc voir que, pour le GWP, le béton a de meilleures performances que l'acier pour la plupart des cas, ce qui rejoint mes résultats.

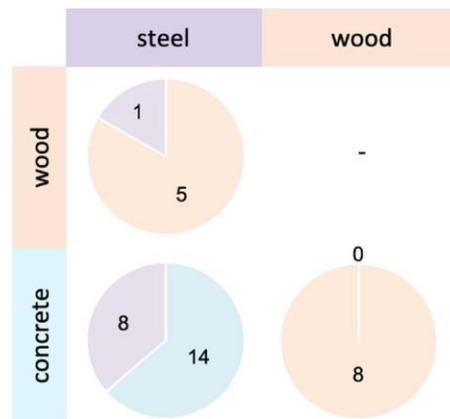


Figure 6-6 : Aperçu des résultats des études comparant des structures en béton, en acier et en bois selon le GWP (Saade, Guest, & Amor, 2020)

Parmi les études qui placent le béton devant l'acier en termes de performance environnementale, on retrouve le travail de Guggemos & Horvath (2005) pour lequel les résultats du béton sont légèrement meilleurs que ceux de l'acier, mais ces résultats restent du même ordre de grandeur lorsque l'ensemble des étapes de vie est considéré.

Une seconde étude, menée par Alshamrani et reprise dans le travail de Saade et al., arrive à des conclusions un peu plus favorables pour le béton. En effet, cette étude montre que, effectivement, la structure en acier a de moins bonnes performances que la structure en béton (qui elle-même a de moins bonnes performances que la structure en béton préfabriqué) selon le GWP ainsi que sur les émissions nocives pour l'air, l'eau et le sol, et ce sur l'ensemble des étapes du cycle de vie (sauf après la fin de vie où l'acier a de meilleures performances).

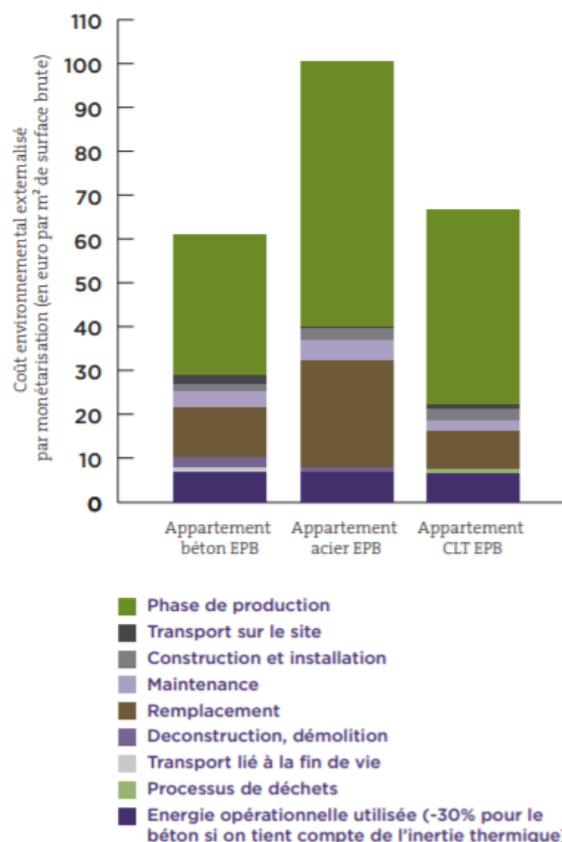
De plus, l'énergie grise des matériaux a un impact sur le résultat final des performances environnementales puisqu'elle peut représenter de 2 % à 38 % de l'énergie totale consommée tout au long de la vie du bâtiment et, comme 50 % de l'énergie grise d'un bâtiment provient des matériaux composant la structure et que l'énergie grise de l'acier est supérieure à celle du béton, cela peut expliquer les résultats obtenus dans le cadre de ce travail. (Zabalza Bribián, Valero Capilla, & Aranda Usón, 2011).

Il faut aussi garder en tête que les lieux de production de matériaux tel que l'acier sont généralement plus éloignés que les lieux de production du béton, ce qui entraîne des impacts environnementaux supplémentaires liés au transport des matériaux (Zabalza Bribián et al., 2011).

Une étude menée par la KULeuven à la demande de Febelcem compare 3 types d'immeubles à appartements de même performance énergétique et de même surface : l'un en béton, le second en acier et le dernier en bois a été. Cette étude, réalisée avec l'outil TOTEM

a montré que le bâtiment en béton réalise un meilleur score environnemental que le bâtiment en acier mais un moins bon que le bâtiment en bois, et que c'est surtout durant la phase de production que des différences significatives entre les 3 matériaux apparaissent (Febelcem, 2018). La Figure 6-7 ci-après, issue du rapport annuel de Febelcem illustre ces résultats.

Impacts environnementaux des différentes phases du cycle de vie (immeuble à appartements, conforme à la réglementation PEB)



Source : TOTEM - KULeuven, 2019

Figure 6-7 : Résultats de l'étude de KULeuven

À la demande de CIMbéton, PwC a évalué la qualité environnementale des bâtiments de bureaux. Comme l'illustre la Figure 6-8, les résultats de cette étude montrent que les bâtiments en béton ou en acier ont des performances environnementales similaires. En effet, les écarts observés entre leurs performances sont inférieurs à 20 % (CIMbéton, 2011).

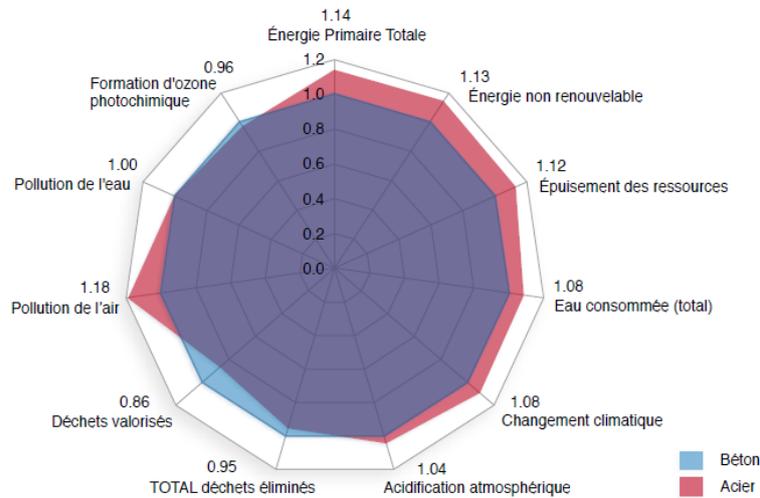


Figure 6-8 : Résultats obtenus par PwC et CIMbéton (CIMbéton, 2011)

Finalement, la comparaison entre plusieurs travaux est assez compliquée.

Tout d'abord, toutes les études, bien qu'elles suivent la même méthodologie, ont chacune leurs propres hypothèses et elles ne font pas toutes appel aux mêmes indicateurs environnementaux.

De plus, des différences peuvent avoir lieu lorsque les produits ne proviennent pas de la même base de données et donc, que les hypothèses à leur égard ne sont pas forcément les mêmes. (Dossche, Boel, & De Corte, 2017). Par exemple, Lasvaux et al. ont comparé la base de données Ecoinvent avec une base de données d'EPD française et ont remarqué des variations entre les résultats obtenus en utilisant l'une ou l'autre base de données. Et même entre des bases de données reconnues, comme Ecoinvent et la base de données Gabi, les résultats obtenus diffèrent beaucoup (Takano, Winter, Hughes, & Linkosalmi, 2014).

6.3 Forces et limites de la recherche

6.3.1 Forces du travail

Une des forces de ce travail réside dans le fait que la méthodologie suivie est issue d'une norme européenne. Dès lors, la démarche suivie est validée, ce qui permet une comparaison avec les résultats obtenus dans d'autres études se référant à cette même norme. De plus, l'unité fonctionnelle choisie est le m^2/an , et est facilement transposable en m^2 connaissant la surface du bâtiment ainsi que sa durée de vie. Cela permet de comparer facilement mes résultats avec d'autres travaux car l'unité fonctionnelle m^2 est une des plus utilisées dans les études d'analyse de cycle de vie de bâtiments (Bahramian et Yetilmezsoy, 2020).

De plus, la thématique de ce travail est peu traitée dans la littérature existante. En effet, il existe très peu d'études similaires portant sur l'analyse de cycle de vie de la structure « biomimétique » d'un bâtiment comparée à celle d'un bâtiment « classique ».

Finalement, ce travail a permis de mettre en lumière des impacts environnementaux de matériaux dont l'utilisation ne fera sans doute que croître dans les années à venir. Ce travail peut ainsi conscientiser des (futurs) concepteurs sur l'impact que l'industrie du bâtiment peut avoir sur l'environnement.

6.3.2 Limites du travail

Une des limites du travail est que seuls 2 cas d'étude ont été comparés. Afin de préciser les résultats, il serait intéressant de comparer d'autres cas d'étude.

Une autre limite de ce travail est que la comparaison de l'impact environnemental de la structure « biomimétique » d'un bâtiment et celle d'un bâtiment « classique » s'est traduite en une comparaison de 2 systèmes structurels différents : structure acier-béton vs structure en béton. Le biomimétisme doit couvrir et couvrir d'autres domaines que le seul domaine structurel (systèmes de ventilation, éclairage passif...).

6.4 Répercussions du travail

6.4.1 Pour les architectes

L'exercice de comparaison de la performance environnementale de 2 systèmes structurels différents peut être intéressant pour le concepteur qui serait amené à justifier les choix qu'il pose, tout en gardant en tête que la performance environnementale n'est pas forcément le seul critère à prendre en compte lors de la conception d'un bâtiment.

6.4.2 Pour les scientifiques

Pour les scientifiques, ce travail peut être intéressant car il s'agit d'une expérience et d'un témoignage de plus dans le « débat » actuel visant à déterminer quel type de structure a un impact environnemental moindre.

Ce travail peut induire des pistes pour de futures recherches.

Par exemple, il serait intéressant de mener un travail similaire avec d'autres cas d'étude pour voir si les résultats obtenus seraient les mêmes avec des cas différents. De plus, prendre en compte la totalité du bâtiment et son occupation tout au long de l'ensemble des étapes de cycle de vie et pas la structure uniquement donnerait un résultat en termes de performances environnementales plus proche de la réalité.

Il serait également intéressant d'analyser les coûts engendrés par les structures via une analyse du coût du cycle de vie. Ces résultats, mis en parallèle avec l'analyse de cycle de vie, pourraient être une autre piste justifiant le choix de tel ou tel système ou matériau.

Ensuite, le biomimétisme dont on fait question ici ne se réfère qu'à la structure. D'autres cas où le biomimétisme se rapporte à un autre aspect du bâtiment pourraient également être analysés.

Enfin, ce travail consiste également en une comparaison de 2 systèmes constructifs et il serait intéressant de comparer d'autres types de structure (« biomimétiques » ou non). Par exemple, de plus en plus de projets de bâtiment de grande hauteur en structure bois voient le jour et appliquer la même méthodologie que celle ici suivie pourrait déterminer l'impact environnemental de ce type de bâtiment/structure. Une telle étude, combinée à celle-ci pourrait d'autant mieux justifier/aider les choix des concepteurs en début de projet.

6.5 Conclusion de la discussion

La comparaison avec d'autres études a confirmé mes résultats : la structure du cas 1 en acier-béton a de moins bonnes performances environnementales que celle du cas 2 en béton « classique ». Néanmoins, ces résultats sont à prendre avec prudence puisqu'ils dépendent de la base de données utilisées et des hypothèses prises au cours de l'analyse de cycle de vie, des scénarios... qui diffèrent d'un travail à l'autre.

La principale recommandation à retenir est l'esprit critique qu'il faut garder en regardant les résultats de telles études ainsi que l'usage justifié de chaque matériau composant un bâtiment.

Chapitre 7: Conclusion

Dans cette étude, on a cherché à comparer la performance environnementale de deux types de structures caractérisant des bâtiments élevés à vocation tertiaire.

Le premier cas d'étude a une structure en acier-béton inspirée de la nature. Habillée d'une résille métallique qui joue le rôle d'exostructure (à l'image du périoste d'un os animale), elle est dite « biomimétique ». Il s'agit d'un cas existant (Tour D2 construite dans le quartier de la Défense à Paris). Le second cas d'étude est le « jumeau » fictif du bâtiment réel à ceci près que sa structure est composée d'un système « classique » de poteaux-poutres en béton autour d'un noyau central.

Les concepteurs et les promoteurs du bâtiment réel argumentent le choix du « biomimétisme » structurel en l'inscrivant dans une démarche globale qui vise l'excellence en termes de performances environnementales, se traduisant par l'obtention de certifications reconnues. On pourrait dès lors supposer à priori que le « biomimétisme » structurel tel que mis en œuvre dans ce bâtiment génère un bénéfice environnemental compatible avec l'image positive que l'on cherche à développer autour du projet. C'est ce que nous avons tenté d'objectiver.

Afin de réaliser l'évaluation environnementale des deux configurations structurelles, des analyses de cycle de vie du berceau à la tombe ont été menées suivant la méthodologie décrite dans la norme NBN EN 15978 et 7 indicateurs environnementaux ont été analysés : le potentiel de réchauffement climatique (GWP), le potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique (ODP), le potentiel d'acidification du sol et de l'eau (AP), le potentiel d'eutrophisation (EP), le potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone stratosphérique (POCP), le potentiel de dégradations abiotiques des ressources pour les éléments (ADP_éléments) et le potentiel de dégradations abiotiques des combustibles fossiles (ADP_fossiles).

Les résultats montrent que le cas 1 (structure acier-béton « biomimétique ») a des impacts environnementaux supérieurs à ceux du cas 2 (structure en béton) pour les 7 indicateurs et sur l'ensemble du cycle de vie. On peut donc en conclure que, avec les paramètres dont nous disposons ainsi que dans le cadre des hypothèses et des limites que nous nous sommes imposées, le caractère biomimétique limité à la seule analyse de la structure n'est pas automatiquement synonyme d'une meilleure performance environnementale.

Bibliographie

Acier vs. béton. (s. d.). Consulté le 26 mai 2020, à l'adresse <https://www.brandveiligbouwen.be/acier-vs-beton.html>

Alves, T., Machado, L., de Souza, R. G., & de Wilde, P. (2018). Assessing the energy saving potential of an existing high-rise office building stock. *Energy and Buildings*, 173, 547-561. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.044>

Amer, N. (2019). Biomimetic Approach in Architectural Education: Case study of 'Biomimicry in Architecture' Course. *Ain Shams Engineering Journal*, 10(3), 499-506. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.11.005>

ArcelorMittal. (s. d.). La structure en acier optimisée de la Tour D2 présente les solutions innovantes d'ArcelorMittal. Consulté le 27 mars 2020, à l'adresse https://constructalia.arcelormittal.com/fr/galerie_des_etudes_de_cas/france/tour-d2

Asdrubali, F., Baldassarri, C., & Fthenakis, V. (2013). Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy and Buildings*, 64, 73-89. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.04.018>

Attia, S. (2016). Towards regenerative and positive impact architecture: A comparison of two net zero energy buildings. *Sustainable Cities and Society*, 26, 393-406. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.04.017>

Attia, S. (2018). *Regenerative and positive impact architecture: Learning from case studies*. Springer International Publishing.

Aziz, M. S., & El sherif, A. Y. (2016). Biomimicry as an approach for bio-inspired structure with the aid of computation. *Alexandria Engineering Journal*, 55(1), 707-714. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.10.015>

Bahramian, M., & Yetilmezsoy, K. (2020). Life cycle assessment of the building industry: An overview of two decades of research (1995–2018). *Energy and Buildings*, 219, 109917. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109917>

batiactu. (2013, septembre 9). La tour D2 croit au béton 2.0. Consulté le 27 mars 2020, à l'adresse <https://www.batiactu.com/edito/la-tour-d2-croit-au-beton-20-36035.php>

Bechu + Associés. (s. d.). Projets | Tour D2. Consulté le 27 mars 2020, à l'adresse <https://www.bechuetassocies.com/fr/projet/tour-d2>

Benyus, J. M. (2017). *Biomimétisme: Quand la nature inspire des innovations durables*. Paris, France : Rue de l'échiquier.

Bœuf, G. (2019). Préface. In T. Bout (éd.), *Biomimétisme & architecture* (pp. 8-11). Paris, France : Editions Rue de l'échiquier.

Boeuf, G., Toussaint, J. F., Swynghedauw, B., & Muséum national d'histoire naturelle (France). (2012). *L'homme, peut-il s'adapter à lui-même*. Versailles, France : Quae.

Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 379-388. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>

Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394-416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>

CEEBIOS. (2018). *Habitat bio-inspiré : rapport de synthèse 2018*. Consulté à l'adresse https://www.communaute-paysbasque.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/Documents/Enquete_publicue/Enquete_publicue_mise_en_compatibilite_du_PLU_de_Biarritz_dans_le_cadre_d_une_declaration_de_projet_Ocean_Start_17c_-_Annexe_Synthese_Habitat_Bioinspire.pdf

CERIB (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Dalle alvéolée en béton précontraint. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=12511>

Chayaamor-Heil, N., Guéna, F., & Hannachi-Belkadi, N. (2018). Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils. *Cahiers de la recherche architecturale, urbaine et paysagère*, (1). <https://doi.org/10.4000/craup.309>

CIMbéton. (2011). *Qualité environnementale des bâtiments de bureaux : Recherche des paramètres influençant la qualité environnementale des bureaux à basse consommation énergétique Comparaison des impacts environnementaux*. Consulté à l'adresse <https://www.infociments.fr/sites/default/files/article/fichier/CT-B57.pdf>

Comité européen de normalisation. (2012). EN 15804. *Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction*. Bruxelles, Belgique

Comité européen de normalisation. (2011). EN 15978. *Contribution des ouvrages de construction au développement durable – Évaluation de la performance environnementale des bâtiments – Méthode de calcul*. Bruxelles, Belgique

Commission européenne. (2020). *L'efficacité énergétique des bâtiments*. Consulté à l'adresse https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/energy_climate_change_environment/events/documents/in_focus_energy_efficiency_in_buildings_fr.pdf

CSTB. (2015, février 11). Valoriser la performance environnementale des produits et équipements. Consulté le 18 mai 2020, à l'adresse <http://www.cstb.fr/fr/actualites/detail/performance-environnementale-110215/>

CSTC. (2016). *Principes et aspects importants pour le choix de matériaux de construction durables* (17). Consulté à l'adresse <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=search&id=REF00007684>

CSTC. (2013). Analyse du cycle de vie ou LCA. Consulté le 29 mai 2020, à l'adresse <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=search&serie=14&id=REF0000471>

CTICM. (2016). FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Profilés reconstitué soudé en acier utilisé comme élément d'ossature (poteau, poutre, portique...) Juin 2016 v2. Disponible à : <https://www.baseinies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=9054>

CTICM. (2016). FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Poutrelle en acier utilisée comme élément d'ossature (poteau, poutre, lisse, solive, panne...) Juin 2016 v2. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=9055>

Cuce, E., Nachan, Z., Cuce, P. M., Sher, F., & Neighbour, G. B. (2017). Strategies for ideal indoor environments towards low/zero carbon buildings through a biomimetic approach. *International Journal of Ambient Energy*, 40(1), 86-95. <https://doi.org/10.1080/01430750.2017.1372807>

- Deshayes, P. (2012). Le secteur du bâtiment face aux enjeux du développement durable : logiques d'innovation et/ou problématiques du changement. *Innovations*, 37(1), 219. <https://doi.org/10.3917/inno.037.0219>
- Desmyter, J., & Martin, Y. (2001). Impact des matériaux et des constructions sur l'environnement: un critère de plus dans le processus de choix/. *Revue CSTC*, 4, 3-13. Consulté à l'adresse <https://www.cstc.be/homepage/index.cfm?cat=publications&sub=search&id=CSTC55978>
- Doan, D. T., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Zhang, T., Ghaffarianhoseini, A., & Tookey, J. (2017). A critical comparison of green building rating systems. *Building and Environment*, 123, 243-260. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.07.007>
- Dossche, C., Boel, V., & De Corte, W. (2017). Use of Life Cycle Assessments in the Construction Sector: Critical Review. *Procedia Engineering*, 171, 302-311. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.338>
- European Commission. (2015, septembre 25). Sustainable Development Goals and the Agenda2030. Consulté le 28 mai 2020, à l'adresse https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_15_5709
- Febelcem. (2018). *Rapport annuel de l'industrie cimentière belge 2018*. Consulté à l'adresse https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/rapports_annuels/fr/RA_Febelcem_2018_fr.pdf
- Gagg, C. R. (2014). Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*, 40, 114-140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- Gan, V. J. L., Cheng, J. C. P., Lo, I. M. C., & Chan, C. M. (2017). Developing a CO2-e accounting method for quantification and analysis of embodied carbon in high-rise buildings. *Journal of Cleaner Production*, 141, 825-836. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.126>
- Gervasio, H., Santos, P., da Silva, L.-S., Vassart, O., Hettinger, A.L., & Huet, V. (2014). *LVS³ : Valorisation de la contribution des structures en acier au développement durable : document de référence*. Portugal. ISBN 978-80-01-05439-0
- Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2015). Assessment tools for the environmental evaluation of concrete, plaster and brick elements production. *Journal of Cleaner Production*, 99, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.006>
- Graffin, E. (2015). *LA TOUR D2 ANTHONY BECHU/TOM SHEEHAN*. Paris, France : Archibooks + Sautereau Editeur.
- Guggemos, A. A., & Horvath, A. (2005). Comparison of Environmental Effects of Steel- and Concrete-Framed Buildings. *Journal of Infrastructure Systems*, 11(2), 93-101. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1076-0342\(2005\)11:2\(93\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1076-0342(2005)11:2(93))
- Inies. (s. d.-a). Produits de construction (FDES) – INIES. Consulté le 31 mai 2020, à l'adresse <https://www.inies.fr/produits-de-construction/>
- Inies. (s. d.-b). Qui sommes-nous ? – INIES. Consulté le 18 mai 2020, à l'adresse <https://www.inies.fr/qui-sommes-nous/>
- Institut Veolia. (2019). RECRÉER DU LIEN ENTRE VILLE ET NATURE PAR L'ARCHITECTURE. *LA REVUE DE L'INSTITUT VEOLIA FACTS REPORT*, (20). Consulté à l'adresse <https://www.institut.veolia.org>

ISO (international Standardization Organization). (2006). Norme internationale ISO 14040. *Management environnemental – Analyse de cycle de vie – Principes et cadre*.

ISO (international Standardization Organization). (2016). Norme internationale ISO 18547. *Biomimétisme – Matériaux, structure et composants biomimétiques*

Jégou, A. (2007). Les géographes français face au développement durable. *L'Information géographique*, vol. 71(3), 6-18. doi:10.3917/lig.713.0006.

Lasvaux, S., Habert, G., Peuportier, B., & Chevalier, J. (2015). Comparison of generic and product-specific Life Cycle Assessment databases: application to construction materials used in building LCA studies. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(11), 1473-1490. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0938-z>

L'enveloppe métallique du bâtiment. (2018). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Plancher collaborant acier/béton (masse surfacique de béton comprise entre 120 kg/m² et 408 kg/m² et d'armatures en acier comprise entre 1,5 kg/m² et 26 kg/m²) Juin 2018. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=16379>

López, M., Rubio, R., Martín, S., & Ben Croxford. (2017). How plants inspire façades. From plants to architecture: Biomimetic principles for the development of adaptive architectural envelopes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, 692-703. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018>

Ministère de l'Égalité des Territoires et du Logement, & Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. (2014). *Liste des indicateurs de la réglementation du 23 décembre 2013 relative à la déclaration environnementale de certains produits de construction destinés à un usage dans les ouvrages de bâtiment*. Consulté à l'adresse <https://www.inies.fr/wp-content/uploads/2018/04/liste-des-indicateurs-declaration-environnementale-mars-20141.pdf>

Mizobuti, V., & Vieira Junior, L. C. M. (sous presse). Bioinspired architectural design based on structural topology optimization. *Frontiers of Architectural Research*.

Moukoko, D. (2010). Le périoste vascularisé et la reconstruction osseuse. *Chirurgie de la Main*, 29, S214-S220. <https://doi.org/10.1016/j.main.2010.09.008>

MUUUZTV. (2015, avril 2). Visite de la Tour D2 avec Anthony Béchu, architecte [Fichier vidéo]. *YouTube*. Consulté à l'adresse https://www.youtube.com/watch?v=13Hd-VS_11s

Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28-39. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>

Pawlyn, M. (2019). *Biomimétisme et architecture* (2^e éd.). Paris, France : Editions Rue de l'échiquier.

Pitrou, P., Dalsuet, A., & Hurand, B. (2015). Modélisation, construction et imitation des processus vitaux. Approche pluridisciplinaire du biomimétisme. *Natures Sciences Sociétés*, 23(4), 380-388. <https://doi.org/10.1051/nss/2015063>

Radwan, Gehan. A. N., & Osama, N. (2016). Biomimicry, an Approach, for Energy Efficient Building Skin Design. *Procedia Environmental Sciences*, 34, 178-189. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.04.017>

Reichert, S., Menges, A., & Correa, D. (2015). Meteorosensitive architecture: Biomimetic building skins based on materially embedded and hygroscopically enabled responsiveness. *Computer-Aided Design*, 60, 50-69. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.010>

Reichert, S., Schwinn, T., La Magna, R., Waimer, F., Knippers, J., & Menges, A. (2014). Fibrous structures: An integrative approach to design computation, simulation and fabrication for lightweight, glass and carbon fibre composite structures in architecture based on biomimetic design principles. *Computer-Aided Design*, 52, 27-39. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.02.005>

Saade, M. R. M., Guest, G., & Amor, B. (2020). Comparative whole building LCAs: How far are our expectations from the documented evidence? *Building and Environment*, 167, 106449. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106449>

Shahda, M. M., Abd Elhafeez, M. M., & El Mokadem, A. A. (2018). Camel's nose strategy: New innovative architectural application for desert buildings. *Solar Energy*, 176, 725-741. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.072>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour dalle, C25/30 XC1/XC2 CEM II/A. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=12895>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour pieux, C25/30 XC1/XC2 CEM II/A. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=11070>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour poutre intérieure, C25/30 XC1/XC2 CEM II A L ou LL. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=11014>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour poteau intérieur, C25/30 XC1/XC2 CEM II A Poteau rectangulaire en béton de dimension 0.25x0.40 m, C25/30 XC2 CEM II/A-S. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=12512>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton Autoplaçant armé pour radier, C25/30 XF1 CEM II/A. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=11027>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Mur en béton d'épaisseur 0.20 m, C25/30 XC1CEM II/A-S. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=16422>

Strazza, C., Del Borghi, A., Magrassi, F., & Gallo, M. (2016). Using environmental product declaration as source of data for life cycle assessment: a case study. *Journal of Cleaner Production*, 112, 333-342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.058>

Takano, A., Winter, S., Hughes, M., & Linkosalmi, L. (2014). Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Building and Environment*, 79, 20-30. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.025>

Tavsan, C., Tavsan, F., & Sonmez, E. (2015). Biomimicry in Architectural Design Education. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 182, 489-496. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.04.832>

United Nations. (s. d.). Goal 11: Make cities inclusive, safe, resilient and sustainable. Consulté le 28 mai 2020, à l'adresse <https://www.un.org/sustainabledevelopment/cities/>

- Van den Heede, P., & De Belie, N. (2012). Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 431-442. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004>
- Ximenes, F. A., & Grant, T. (2012). Quantifying the greenhouse benefits of the use of wood products in two popular house designs in Sydney, Australia. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(4), 891-908. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0533-5>
- Yurtkuran, S., Kırılı, G., & Taneli, Y. (2013). Learning from Nature: Biomimetic Design in Architectural Education. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 89, 633-639. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.907>
- Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., & Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133-1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
- Zaccai, E. (2014, novembre). Le rapport Brundtland. Consulté le 2 juin 2020, à l'adresse http://homepages.ulb.ac.be/~ezaccai/publications/Rapport_Brundtland.pdf
- Zari, M. (2007). BIOMIMETIC APPROACHES TO ARCHITECTURAL DESIGN FOR INCREASED SUSTAINABILITY. Consulté le 4 juin 2020, à l'adresse <https://www.cmnzl.co.nz/assets/sm/2256/61/033-PEDERSENZARI.pdf>
- Zari, M. (2019). Devising Urban Biodiversity Habitat Provision Goals: Ecosystem Services Analysis. *Forests*, 10(5), 391. <https://doi.org/10.3390/f10050391>

Annexe 1 : Scénarios tirés des FDES

Pour les profilés reconstitués soudés en acier (CTICM, 2016) :

Tableau 1: scénarios des profilés reconstitués soudés en acier (CTICM, 2016)

SCÉNARIOS	
ÉTAPE A1	Approvisionnement des matières premières Production d'acier, combustible, emballage et électricité 93 % d'acier primaire, 7 % d'acier secondaire
ÉTAPE A2	Production et combustion du diesel pour le transport de l'acier, combustible et emballages Informations fournies par les constructeurs participants. Si pas de données : transport de 24 tonnes sur 500 km, consommation 0,38 L/km
ÉTAPE A3	Émissions dues à la combustion énergétique des combustibles Production de déchets et fin de vie des chutes Chute d'acier : 0,081 kg/kg de produit fini (recyclé) Valorisation prise en compte mais mise en décharge négligeable
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 296 km Consommation de 0,38 L/km 30 % de retour à vide
ÉTAPE A5	Grue : consommation de 5,4 E-03 L/kg de gasoil Production d'acier et produits supplémentaires : accessoires d'assemblages (5 % de la masse du produit) Transport jusqu'au chantier Fin de vie des chutes Fin de vie des emballages négligeable Chute d'acier : 5 % (recyclée)
ÉTAPE B1-B7	/
ÉTAPE C1	Grue
ÉTAPE C2	Production et combustion du diesel pour le transport : Distance de transport vers le centre de valorisation : 250 km Distance de transport vers la décharge : 50 km
ÉTAPE C3	Tri : séparation de l'acier et du béton 37,6 kWh de diesel par tonne de produit de déconstruction Nb : on considère une poutre supportant un plancher béton peu importe la fonction réelle de l'élément
ÉTAPE C4	La part d'acier (minime) éliminée est mise en centre d'enfouissement 98 % d'acier valorisé – 2 % mis en décharge
ÉTAPE D	Impacts dus à la production de l'acier secondaire ainsi que ceux évités lors de la production de l'acier primaire Valorisation des déchets d'emballage négligée

Pour les poutrelles en acier (CTICM, 2016) :

Tableau 2: scénarios des poutrelles en acier (CTICM, 2016)

SCÉNARIOS	
ÉTAPE A1	Approvisionnement des matières premières Production d'acier, combustible, emballage et électricité 33 % d'acier primaire, 67 % d'acier secondaire
ÉTAPE A2	Production et combustion du diesel pour le transport de l'acier, combustible et emballages Informations fournies par les constructeurs participants. Si pas de données : transport de 24 tonnes sur 500 km, consommation 0,38 L/km
ÉTAPE A3	Émissions dues à la combustion énergétique des combustibles Production de déchets et fin de vie des chutes Chute d'acier : 0,081 kg/kg de produit fini (recyclé) Valorisation prise en compte mais mise en décharge négligeable
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 272 km Consommation de 0,38 L/km 30 % de retour à vide
ÉTAPE A5	Grue : consommation de 5,4 E-03 L/kg de gasoil Production d'acier et fabrication des produits supplémentaires : accessoires d'assemblages (5 % de la masse du produit) Transport jusqu'au chantier Fin de vie des chutes Fin de vie des emballages négligeable Chute d'acier : 5 % (recyclée)
ÉTAPE B1-B7	/
ÉTAPE C1	Grue
ÉTAPE C2	Production et combustion du diesel pour le transport : Distance de transport vers le centre de valorisation : 250 km Distance de transport vers la décharge : 50 km
ÉTAPE C3	Tri : séparation de l'acier et du béton 37,6 kWh de diesel par tonne de produit de déconstruction Nb : on considère une poutre supportant un plancher béton peu importe la fonction réelle de l'élément
ÉTAPE C4	La part d'acier (minime) éliminée est mise en centre d'enfouissement 98 % d'acier valorisé – 2 % mis en décharge
ÉTAPE D	Impacts dus à la production de l'acier secondaire ainsi que ceux évités lors de la production de l'acier primaire Valorisation des déchets d'emballage négligée

Pour le béton armé (SNBPE, 2019) :

Tableau 3: scénarios pour les éléments en béton (SNBPE, 2019)

SCÉNARIOS	
ÉTAPE A1 – A3	Fabrication du béton sur site Production des matières premières Transport Production d'énergie nécessaire à la production
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 18,5 km Consommation de 0,08 L/km Capacité de 8 m ³ 50 % de retour à vide
ÉTAPE A5	Grue et pompe : <ul style="list-style-type: none"> - 38,52 MJ colonne intérieure - 385,2 MJ pour la poutre intérieure et la dalle - 77,04 MJ pour le mur - 18 MJ pour le radier et les pieux Production d'acier et transport des produits supplémentaires : armatures et coffrage Production et transport des chutes : 3 % du béton (75 % des chutes valorisées et 25 % mises en décharge) Fin de vie des chutes
ÉTAPE B1-B7	Aucune maintenance Impact positif de la carbonatation
ÉTAPE C1	Démolition
ÉTAPE C2	Transport vers le lieu de fin de vie (75 % valorisé et 25 % mis en décharge) Distance vers le centre de valorisation : 30 km Distance vers la décharge : 30 km
ÉTAPE C3	Séparation des armatures métalliques (pour la poutre intérieure) Concassage
ÉTAPE C4	Mise en décharge Carbonatation : 75 % du produit mis en décharge
ÉTAPE D	Bénéfice dû à la revalorisation des graves pour les infrastructures routières et l'acier recyclé

Pour le plancher collaborant (L'enveloppe métallique du bâtiment, 2018) :

Tableau 4: scénarios pour le plancher collaborant (L'enveloppe métallique du bâtiment, 2018)

SCÉNARIOS	
ÉTAPE A1	Approvisionnement des matières premières Production d'acier, combustible, emballage et électricité
ÉTAPE A2	Production et combustion du diesel pour le transport de l'acier, combustible et emballages Informations fournies par les constructeurs participants. Si pas de données : transport de 20 tonnes sur 500 km, consommation 0,38 L/km
ÉTAPE A3	Fabrication du profil de coffrage en atelier Émissions dues à la combustion énergétique des combustibles Production de déchets et fin de vie des chutes La mise en décharge des déchets est négligée
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 489 km pour l'acier et de 20 km pour le béton Consommation correspondant à une flotte de camions moyenne en Europe en 2005 30 % de retour à vide
ÉTAPE A5	Installation du produit Production d'acier et fabrication des produits supplémentaires : vis, connecteurs, tirefonds et armatures ainsi que les produits pour compenser les chutes Transport jusqu'au chantier Grue négligée Chute d'acier : 5 % (recyclée) Chute de béton : 1 % Fin de vie des emballages négligeable Fin de vie des chutes négligeable
ÉTAPE B1-B7	/
ÉTAPE C1	Grue négligeable Engin fonctionnant au diesel consommant 4,55 L/m ³ démolé
ÉTAPE C2	Production et combustion du diesel pour le transport : Distance de transport vers le centre de valorisation : 250 km Distance de transport vers la décharge : 50 km Tri et concassage sur le chantier
ÉTAPE C3	Broyeur 3L de gasoil + 19 kWh par tonne de mélange ferraille/béton
ÉTAPE C4	La part d'acier éliminée est mise en centre d'enfouissement 98 % d'acier valorisé Acier : 85 % valorisés et 15 % mis en décharge Béton : 67 % valorisés et 33 % mis en décharge
ÉTAPE D	Impacts dus à la production de l'acier secondaire ainsi que ceux évités lors de la production de l'acier primaire Impacts bénéfiques dus à la production de granulats à partir des déchets de béton Valorisation des déchets d'emballage négligée

Finalement, pour les dalles alvéolées en béton précontraint (CERIB, 2019) :

Tableau 5: scénarios pour les dalles alvéolées (CERIB, 2019)

SCÉNARIOS (POUR 1 M² DE DALLE)	
ÉTAPE A1 – A3	Production des matières premières Transport Production d'énergie nécessaire à la production
ÉTAPE A4	Production et combustion du diesel pour le transport jusqu'au chantier sur une distance de 170 km Consommation de 38 L au 100 km à pleine charge et 25,3 L au 100 km à vide Utilisation de la capacité : 85 %
ÉTAPE A5	Clavetage des dalles avec un BPE (dont 4 % de pertes) Mise en œuvre : - 0,0224 kWh pour la mise en place de dalles - 0,0049 L de diesels pour la mise en place du béton Production et transport des chutes : 0,655 kg de béton, 64 g de bois et 15 g de PSE Traitement des déchets
ÉTAPE B1-B7	Aucune maintenance Impact positif de la carbonatation
ÉTAPE C1	Démolition
ÉTAPE C2	Transport vers le lieu de fin de vie - 70 % du béton valorisé et 30 % mis en décharge - 94 % de l'acier valorisé et 6 % mis en décharge Distance vers le centre de valorisation : - 30 km pour le béton - 100 km pour l'acier Distance vers la décharge : 30 km
ÉTAPE C3	Séparation des armatures métalliques (pour la poutre intérieure) Concassage
ÉTAPE C4	Mise en décharge Carbonatation : 75 % du produit mis en décharge
ÉTAPE D	Bénéfice dû à la revalorisation des graves pour les infrastructures routières Revalorisation de l'acier négligeable

Les FDES utilisées sont disponibles aux liens suivants :

CTICM. (2016). FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Profilé reconstitué soudé en acier utilisé comme élément d'ossature (poteau, poutre, portique...) Juin 2016 v2. Disponible à : <https://www.baseinies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=9054>

CTICM. (2016). FICHE DE DECLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Poutrelle en acier utilisée comme élément d'ossature (poteau, poutre, lisse, solive, panne...) Juin 2016 v2. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=9055>

CERIB (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Dalle alvéolée en béton précontraint. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=12511>

L'enveloppe métallique du bâtiment. (2018). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Plancher collaborant acier/béton (masse surfacique de béton comprise entre 120 kg/m² et 408 kg/m² et d'armatures en acier comprise entre 1,5 kg/m² et 26 kg/m²) Juin 2018. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=16379>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour dalle, C25/30 XC1/XC2 CEM II/A. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=12895>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour pieux, C25/30 XC1/XC2 CEM II/A. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=11070>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour poutre intérieure, C25/30 XC1/XC2 CEM II A L ou LL. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=11014>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton armé pour poteau intérieur, C25/30 XC1/XC2 CEM II A Poteau rectangulaire en béton de dimension 0.25x0.40 m, C25/30 XC2 CEM II/A-S. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=12512>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Béton Autoplaçant armé pour radier, C25/30 XF1 CEM II/A. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=11027>

SNBPE. (2019). FICHE DE DÉCLARATION ENVIRONNEMENTALE ET SANITAIRE Mur en béton d'épaisseur 0.20 m, C25/30 XC1CEM II/A-S. Disponible à : <https://www.base-inies.fr/iniesV4/dist/consultation.html?id=16422>

Annexe 2 : Plans et coupes - Matériaux utilisés - Note de calcul du prédimensionnement du cas 2

1 Cas 1

1.1 Plans et coupes

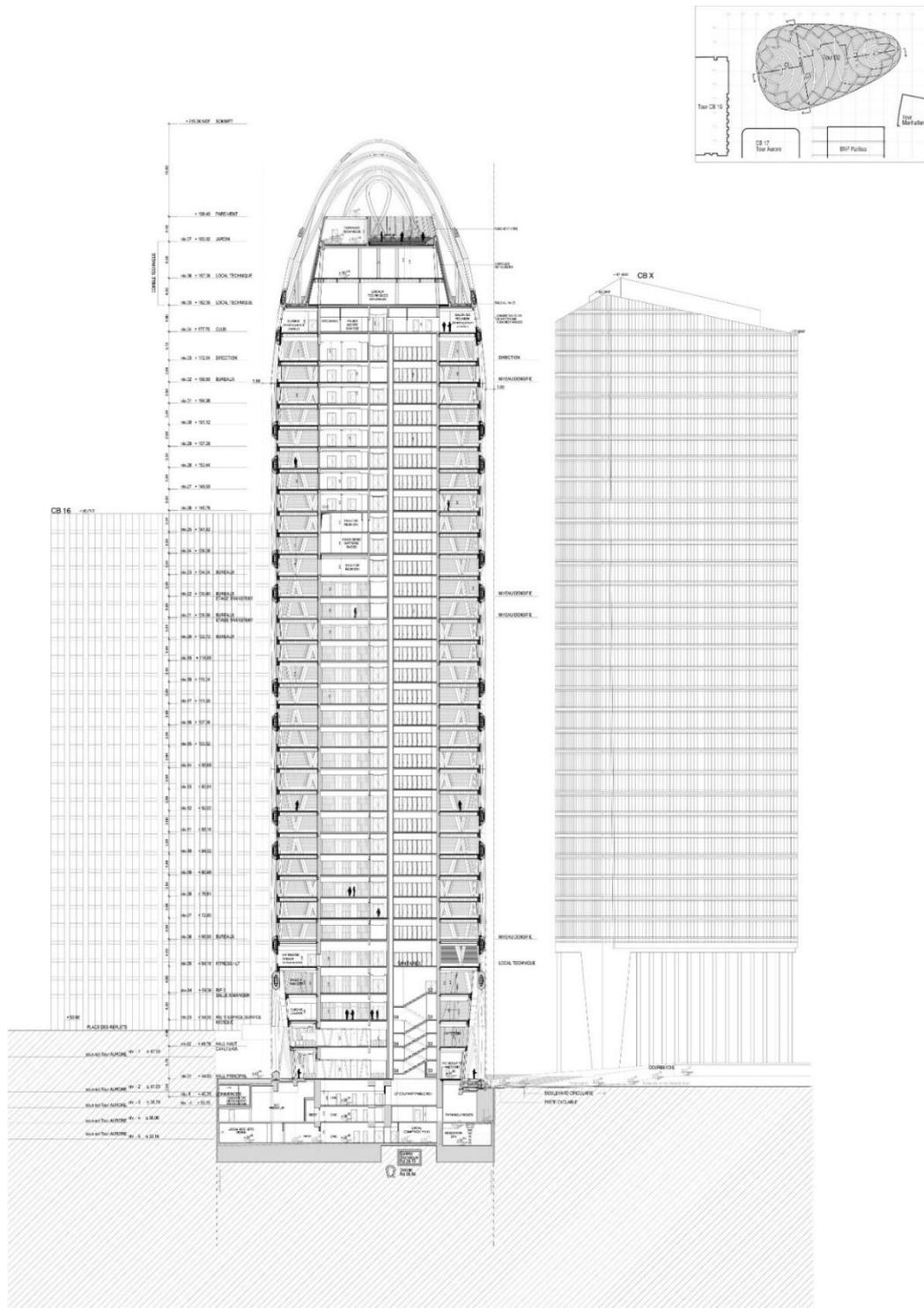


Figure 1 Tour D2 – coupe transversale

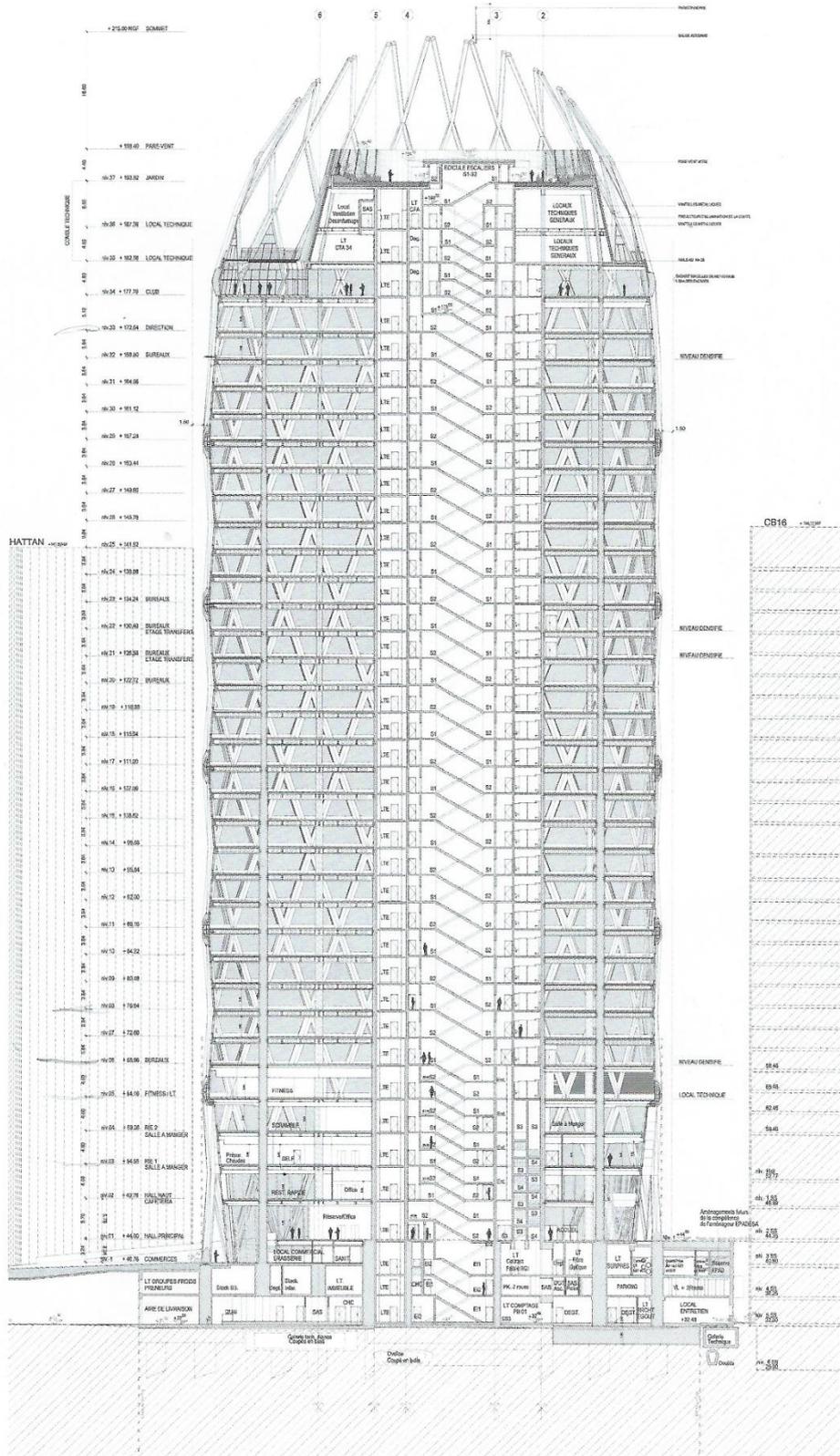


Figure 2 Tour D2 - coupe longitudinale

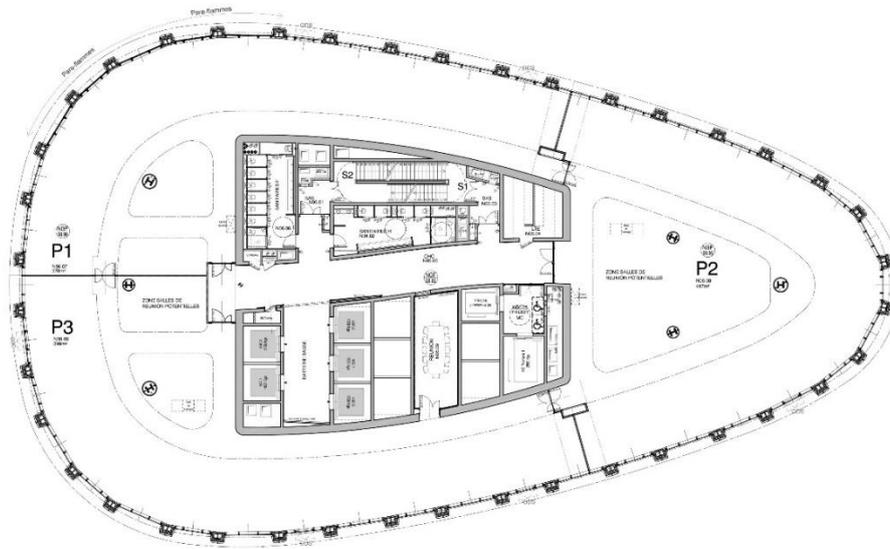


Figure 3 Tour D2 - plan type

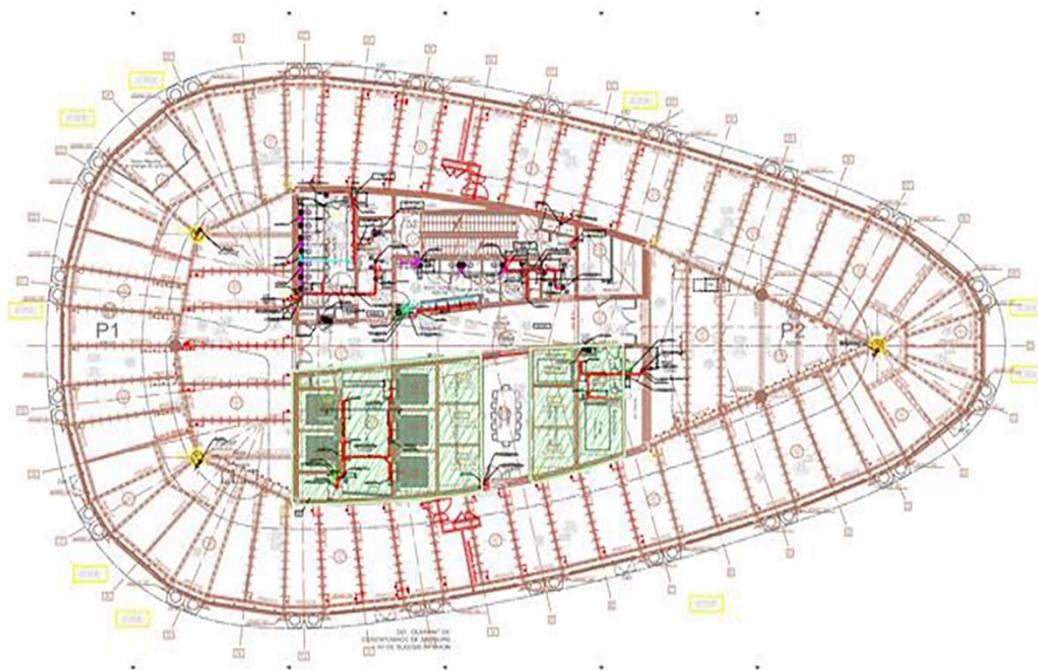


Figure 4 Tour D2 - plan structure

1.2 Matériaux utilisés

Il est à noter que les dimensions des éléments sont tirées des plans et coupes mis à disposition (quand l'information vient d'une autre source, celle-ci est précisée).

1.2.1 Exostructure

L'exostructure est composée de profilés HISTAR 460 MPa HD400 produits par ArcelorMittal dont les dimensions changent en fonction de la hauteur du bâtiment. La longueur totale de ces profilés est estimée à 6240 m. Sachant qu'un élément pèse environ 583 kg/m¹, j'ai fait l'**hypothèse** que tous les profilés utilisés sont des HD 400x551 (voir fiche technique https://constructalia.arcelormittal.com/files/5_3_1_HISTAR_web--9ce0a38ece4828ee9792e01d74a38f48.pdf)

Désignation Designation Bezeichnung	Dimensions Abmessungen						Dimensions de construction Dimensions for detailing Konstruktionsmaße						Surface Oberfläche	
	G kg/m	h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A mm ² x10 ²	h _t mm	d mm	Ø	p _{min} mm	p _{max} mm	A _L m ² /m	A _C m ² /t
HD 400 x 187 ^{*/}	187	368	391	15,0	24,0	15	237,6	320,0	290,0	M 27	104	286	2,244	12,03
HD 400 x 216 ^{*/}	216	375	394	17,3	27,7	15	275,5	320,0	290,0	M 27	106	288	2,266	10,48
HD 400 x 237 ^{*/}	237	380	395	18,9	30,2	15	300,9	320,0	290,0	M 27	108	290	2,276	9,637
HD 400 x 262 ^{*/}	262	387	398	21,1	33,3	15	334,6	320,0	290,0	M 27	110	292	2,298	8,749
HD 400 x 287 ^{*/}	287	393	399	22,6	36,6	15	366,3	320,0	290,0	M 27	112	294	2,311	8,038
HD 400 x 314 ^{*/}	314	399	401	24,9	39,6	15	399,2	320,0	290,0	M 27	114	296	2,326	7,425
HD 400 x 347 ^{*/}	347	407	404	27,2	43,7	15	442,0	320,0	290,0	M 27	116	298	2,350	6,773
HD 400 x 382 ^{*/}	382	416	406	29,8	48,0	15	487,1	320,0	290,0	M 27	118	300	2,371	6,200
HD 400 x 421 ^{*/}	421	425	409	32,8	52,6	15	537,1	320,0	290,0	M 27	122	304	2,395	5,680
HD 400 x 463 ^{*/}	463	435	412	35,8	57,4	15	589,5	320,0	290,0	M 27	124	306	2,421	5,231
HD 400 x 509 ^{*/}	509	446	416	39,1	62,7	15	649,0	320,0	290,0	M 27	128	310	2,452	4,813
HD 400 x 551 ^{*/}	551	455	418	42,0	67,6	15	701,4	320,0	290,0	M 27	132	312	2,472	4,490
HD 400 x 592 ^{*/}	592	465	421	45,0	72,3	15	754,9	320,0	290,0	M 27	134	316	2,498	4,216
HD 400 x 634 ^{*/}	634	474	424	47,6	77,1	15	808,0	320,0	290,0	M 27	140	312	2,523	3,978
HD 400 x 677 ^{*/}	677	483	428	51,2	81,5	15	863,4	320,0	290,0	M 27	144	316	2,550	3,762
HD 400 x 744 ^{*/}	744	498	432	55,6	88,9	15	948,1	320,0	290,0	M 27	148	320	2,587	3,476

Figure 5 : Extrait de la fiche technique d'ArcelorMittal <https://constructalia.arcelormittal.com/files/HD--9dc36b8ad1b7eca18d6dad22499036a4.pdf>

Au vu des coupes, on fait l'**hypothèse** que les charges reprises par l'exostructure sont transférées aux fondations grâce à des colonnes en béton situées aux niveaux en sous-sol. Celles-ci ont les dimensions suivantes (tirées des coupes) : 1,4 x 1,4 m. Ces colonnes se déploient sur une hauteur de 12 m et se comptent au nombre de 20.

1.2.2 Les poutres

Le plancher est un plancher collaborant Cofraplus 60 (ArcelorMittal) soutenu par des poutres ABC (ArcelorMittal) formées à partir d'IPE 450 et HEA450 ². N'ayant pas d'information sur la répartition de ces éléments dans le bâtiment, j'ai fait l'**hypothèse** que les poutres formées à partir d'IPE 450 sont utilisées partout pour supporter le plancher (sauf pour les poutres

¹ <https://constructalia.arcelormittal.com/en/67/70/107/language/IT>
Sections de 12m de long pesant environs 7 tonnes

² https://constructalia.arcelormittal.com/fr/galerie_des_etudes_de_cas/france/tour-d2

périphériques). En effet, selon la fiche technique des poutrelles ACB, les profilés formés à partir de HEA450 sont utilisés à partir d'une portée de 9 m, or les portées des poutres sont toutes inférieures à cette valeur. Fiche technique :

<https://construction.arcelormittal.com/myspace//medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-zU3NDMxNjAzNTAucGRmfDlwMml5OTg3OTczZWNIZDBINGRkMDIjZDMzYjQwMGY1Yzk0YzlhNDMyZDU1ZTU2M2RhNDRIOWVINGI3MzM3Njl>

Profilé	Dimensions (mm)				Charge ultime q_u (kN/m) en fonction de la portée (m)															
	a_0	w	e	H_t	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	22	24	
Ⓐ	IPE 270	285	142,5	427,5	384	49,2	40,1	27,7												
Ⓑ	IPE 300	315	157,5	472,5	427	58,9	48,1	39,4	28,3	20,9										
Ⓒ	IPE 330	345	172,5	517,5	470	70,8	57,9	48,1	39,0	29,3	22,3									
Ⓓ	IPE 360	375	187,5	562,5	513	84,7	68,9	57,4	48,6	39,7	30,2	23,5								
Ⓔ	IPE 400	415	207,5	622,5	570	102,4	84,1	69,8	59,0	51,0	42,5	33,5	26,5	21,4						
Ⓕ	IPE 450	465	232,5	697,5	642	125,5	103,6	85,8	73,0	62,7	54,4	47,6	38,1	30,9	25,2	21,0				
Ⓖ	IPE 500	515	257,5	772,5	714	125,2	104,4	88,9	76,2	66,2	58,0	51,3	43,6	35,6	29,7	21,2				
Ⓗ	IPE 550	555	277,5	832,5	781			130,7	110,8	95,3	82,0	72,0	63,4	56,4	49,1	41,0	29,0	21,4		
Ⓙ	IPE 600	615	307,5	922,5	857				130,6	112,4	97,6	85,2	75,7	67,0	60,0	54,1	39,6	29,3	22,2	
Ⓝ	IPE 750 x 147	755	395	1150	1086					122,1	107,1	95,5	93,6	84,3	77,1	70,8	61,1	52,3	40,7	31,5
Ⓚ	IPE 750 x 173	765	397,5	1162,5	1097								126,5	111,9	100,7	90,2	74,1	61,3	49,9	38,7
Ⓛ	IPE 750 x 196	770	400	1170	1107									126,7	114,0	102,3	84,1	69,8	58,0	45,1
Ⓜ	IPE 750 x 220	780	402,5	1182,5	1118										126,3	113,9	93,8	78,2	65,8	52,1

Figure 6 : Extrait de la fiche technique <https://construction.arcelormittal.com/myspace//medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-zU3NDMxNjAzNTAucGRmfDlwMml5OTg3OTczZWNIZDBINGRkMDIjZDMzYjQwMGY1Yzk0YzlhNDMyZDU1ZTU2M2RhNDRIOWVINGI3MzM3Njl>

Profilé	Dimensions (mm)				Charge ultime q_u (kN/m) en fonction de la portée (m)															
	a_0	w	e	H_t	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	20	22	24	
(A) HE 300 A	270	135	405	398	55,1	47,5	39,9	35,7	31,3	28,6	25,2	20,1								
(B) HE 320 A	290	145	435	426	116,2	101,7	79,7	71,0	53,1	40,7	31,6	25,2	20,4							
(C) HE 340 A	300	150	450	451	123,1	105,7	92,1	82,4	63,1	48,0	37,6	29,9	24,2							
(D) HE 360 A	320	160	480	479		119,3	102,8	90,4	74,9	57,4	44,9	35,8	28,9	23,7						
(E) HE 400 A	360	180	540	537			129,3	109,6	93,8	77,2	61,0	48,5	39,2	32,2	26,7					
(F) HE 450 A	410	205	615	608				128,7	110,5	95,7	84,0	68,2	55,1	45,1	37,6	26,9				
(G) HE 500 A	460	230	690	680					128,3	111,6	98,0	86,7	74,7	61,1	51,2	36,5	26,9	20,4		
(H) HE 550 A	500	250	750	747						127,0	111,6	98,7	87,6	77,6	64,2	46,3	34,2	25,9	20,1	
(I) HE 600 A	550	275	825	819							125,0	110,2	98,3	88,1	79,3	58,0	43,0	32,6	25,4	
(J) HE 650 A	600	300	900	891								138,9	123,1	109,4	98,4	88,6	71,6	53,2	40,3	31,4
(K) HE 700 A	650	325	975	962									138,8	123,4	110,7	99,7	82,0	64,8	49,4	38,5
(L) HE 800 A	740	370	1110	1101											133,1	119,8	98,6	81,9	68,7	53,4
(M) HE 900 A	840	420	1260	1244													118,7	98,9	83,5	71,3

Figure 7 : Extrait de la fiche technique <https://construction.arcelormittal.com/myspace//medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-zU3NDMxNjAzNTAucGRmfDIwMml5OTg3OTczZWNIZDBINGRkMDIjZDMzYjQwMGY1Yzk0YzlhNDMyZDU1ZTU2M2RhNDRIOWVINGI3MzM3Njl>

	G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d	∅	P _{min}	P _{max}	A _L	A _G
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm	mm		mm	mm	m ² /m	m ² /t
							x10 ²							
IPE A 240*	26,2	237	120	5,2	8,3	15	33,3	220,4	190,4	M12	64	68	0,918	35,10
IPE 240	30,7	240	120	6,2	9,8	15	39,1	220,4	190,4	M12	66	68	0,922	30,02
IPE O 240+	34,3	242	122	7	10,8	15	43,7	220,4	190,4	M12	66	70	0,932	27,17
IPE A 270*	30,7	267	135	5,5	8,7	15	39,2	249,6	219,6	M16	70	72	1,037	33,75
IPE 270	36,1	270	135	6,6	10,2	15	45,9	249,6	219,6	M16	72	72	1,041	28,86
IPE O 270+	42,3	274	136	7,5	12,2	15	53,8	249,6	219,6	M16	72	72	1,051	24,88
IPE A 300*	36,5	297	150	6,1	9,2	15	46,5	278,6	248,6	M16	72	86	1,156	31,65
IPE 300	42,2	300	150	7,1	10,7	15	53,8	278,6	248,6	M16	72	86	1,160	27,46
IPE O 300+	49,3	304	152	8	12,7	15	62,8	278,6	248,6	M16	74	88	1,174	23,81
IPE A 330*	43,0	327	160	6,5	10	18	54,7	307	271	M16	78	96	1,250	29,09
IPE 330	49,1	330	160	7,5	11,5	18	62,6	307	271	M16	78	96	1,254	25,52
IPE O 330+	57,0	334	162	8,5	13,5	18	72,6	307	271	M16	80	98	1,268	22,24
IPE A 360*	50,2	357,6	170	6,6	11,5	18	64,0	334,6	298,6	M22	86	88	1,351	26,91
IPE 360	57,1	360	170	8	12,7	18	72,7	334,6	298,6	M22	88	88	1,353	23,70
IPE O 360+	66,0	364	172	9,2	14,7	18	84,1	334,6	298,6	M22	90	90	1,367	20,69
IPE A 400*	57,4	397	180	7	12	21	73,1	373	331	M22	94	98	1,464	25,51
IPE 400	66,3	400	180	8,6	13,5	21	84,5	373	331	M22	96	98	1,467	22,12
IPE O 400+	75,7	404	182	9,7	15,5	21	96,4	373	331	M22	96	100	1,481	19,57
IPE A 450*	67,2	447	190	7,6	13,1	21	85,6	420,8	378,8	M24	100	102	1,603	23,87
IPE 450	77,6	450	190	9,4	14,6	21	98,8	420,8	378,8	M24	100	102	1,605	20,69
IPE O 450+	92,4	456	192	11	17,6	21	118	420,8	378,8	M24	102	104	1,622	17,56

Figure 8 : Caractéristiques des IPE (Catalogue ArcelorMittal)

En ce qui concerne les poutres ceinture, comme celles-ci doivent reprendre les autres poutres (formées à base d'IPE 450), on fait l'**hypothèse** qu'il s'agit de IPE O 600+

Désignation	Dimensions						Dimensions de construction					Surface		
	G kg/m	h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A mm ²	h ₁ mm	d mm	∅	P _{min} mm	P _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t
							x 10 ²							
IPE A 500*		497	200	8,4	14,5	21	101	468	426	M24	100	112	1,741	21,94
IPE 500		500	200	10,2	16	21	116	468	426	M24	102	112	1,744	19,23
IPE O 500+	107	506	202	12	19	21	137	468	426	M24	104	114	1,760	16,40
IPE A 550*		547	210	9	15,7	24	117	515,6	467,6	M24	106	122	1,875	20,36
IPE 550	106	550	210	11,1	17,2	24	134	515,6	467,6	M24	110	122	1,877	17,78
IPE O 550+	123	556	212	12,7	20,2	24	156	515,6	467,6	M24	110	122	1,893	15,45
IPE A 600*	108	597	220	9,8	17,5	24	137	562	514	M27	114	118	2,013	18,72
IPE 600	122	600	220	12	19	24	156	562	514	M27	116	118	2,015	16,45
IPE O 600+	154	610	224	15	24	24	197	562	514	M27	118	122	2,045	13,24

Figure 9 : Caractéristiques des IPE (Catalogue ArcelorMittal)

Pour les niveaux 1 à 34, la longueur totale des poutres alvéolées de ce type pour un étage est estimée à 553 m. Celle des IPE O 600+ est estimée à 144,5 m.

Pour le niveau 35, la longueur d'IPE 450 est de 65,64 m et celle d'IPE O 600+ est de 43,12 m.

1.2.3 Le plancher

1.2.3.1 Tôle en acier

La surface d'un plateau est estimée à 1053,27 m² (surface totale moins la surface du noyau) sauf au niveau 36 où la surface de planchers collaborants est égale à 218 m².

On fait l'**hypothèse** que la tôle est de 1 mm (RF 2 h minimum pour un bâtiment de cette hauteur) :

Caractéristiques du profil	Epaisseur nominale du profil (mm)		
	0,75	0,88	1,00
Poids (daN/m ²)	8,53	10,00	11,37
Section Ap : (cm ² /ml)	10,29	12,17	13,91
Inertie efficace I_{eff} (cm ⁴ /ml)	44,37	52,64	60,08
Position fibre neutre vi (cm)	3,37	3,37	3,37
Module d'inertie I/vi (cm ³ /ml)	13,16	15,62	17,83

Figure 10 : Extrait de la fiche technique <https://construction.arcelormittal.com/myspace/medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-2019.pdf?context=bWFzdGVyfGFtYy1tZWRpYXwyMTY3NDJ8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFtYy1tZWRpYS9oOWYvaGQzLzZg5MzU3NDMxNjAzNTAucGRmfDIwMml5OTg3OTczZWNI>

1.2.3.2 Béton

L'épaisseur de la dalle est de 16 cm (RF 2 h).

Consommation nominale de béton

	Epaisseur d de la dalle (cm)									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Litrage (l/m ²)	75	85	95	105	115	125	135	145	155	165
Poids théorique du plancher daN/m ²	188	213	238	263	288	313	338	363	388	413
Poids volumique du béton 2 500 daN/m ³										
Epaisseur maximale admissible d = 28 cm										

Figure 11 : Extrait de la fiche technique <https://construction.arcelormittal.com/myspace/medias/FT-Cofraplus-60-Ed.8-Novembre-2019.pdf?context=bWFzdGVyfGFtYy1tZWRpYXwyMTY3NDJ8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGFtYy1tZWRpYS9oOWYvaGQzLzZg5MzU3NDMxNjAzNTAucGRmfDIwMml5OTg3OTczZWNI>

À l'intérieur du noyau (surface de 341 m²), la technique de plancher collaborant n'est pas utilisée, il s'agit d'une dalle en béton d'une épaisseur de 0,18 m..

En ce qui concerne les autres niveaux du bâtiment, leur plancher n'est pas un plancher collaborant mais un plancher en béton. Au niveau 36, l'épaisseur de la dalle est 0,3 m et la surface (y compris la surface du noyau) est 560,4 m² et aux niveaux en sous-sol, l'épaisseur de la dalle est 0,28 m et la surface est 1053,27 m².

1.2.4 Les colonnes

Au sous-sol, les 6 colonnes sont en béton (probablement pour des raisons économiques et car l'esthétique a peu d'importance). Les colonnes ont un rayon de 1,4 m et elles se déploient sur une hauteur de 12 m.

Pour les niveaux 1 à 15 (hauteur de 63,36 m), le profilé utilisé pour les colonnes est estimé en fonction des dimensions mesurées sur les plans et coupes et correspond à un HEA 550.

Pour les niveaux 16 à 27 (hauteur de 46,08 m), le profilé estimé est un HEA 400.

Pour les niveaux 28 à 34 (hauteur de 29,12 m), le profilé estimé est un HEA 300.

Pour les niveaux 35 et 36 (hauteur de 11,36 m), il y a désormais 7 colonnes évaluées comme des HEA 300.

Désignation	Dimensions						Dimensions de construction						Surface	
	G kg/m	h mm	b mm	t _w mm	t _f mm	r mm	A mm ²	h _i mm	d mm	∅	P _{min} mm	P _{max} mm	A _L m ² /m	A _G m ² /t
							x 10 ²							
HE 400 AA*	92,4	378	300	9,5	13	27	117,7	352	298	M 27	118	198	1,891	20,46
HE 400 A	125	390	300	11	19	27	159,0	352	298	M 27	120	198	1,912	15,32
HE 400 B	155	400	300	13,5	24	27	197,8	352	298	M 27	124	198	1,927	12,41
HE 400 M	256	432	307	21	40	27	325,8	352	298	M 27	132	202	2,004	7,835
HE 450 AA*	99,7	425	300	10	13,5	27	127,1	398	344	M 27	120	198	1,984	19,89
HE 450 A	140	440	300	11,5	21	27	178,0	398	344	M 27	122	198	2,011	14,39
HE 450 B	171	450	300	14	26	27	218,0	398	344	M 27	124	198	2,026	11,84
HE 450 M	263	478	307	21	40	27	335,4	398	344	M 27	132	202	2,096	7,959
HE 500 AA*	107	472	300	10,5	14	27	136,9	444	390	M 27	120	198	2,077	19,33
HE 500 A	155	490	300	12	23	27	197,5	444	390	M 27	122	198	2,110	13,60
HE 500 B	187	500	300	14,5	28	27	238,6	444	390	M 27	124	198	2,125	11,34
HE 500 M	270	524	306	21	40	27	344,3	444	390	M 27	132	202	2,184	8,079
HE 550 AA*	120	522	300	11,5	15	27	152,8	492	438	M 27	122	198	2,175	18,13
HE 550 A	166	540	300	12,5	24	27	211,8	492	438	M 27	122	198	2,209	13,29
HE 550 B	199	550	300	15	29	27	254,1	492	438	M 27	124	198	2,224	11,15
HE 550 M	278	572	306	21	40	27	354,4	492	438	M 27	132	202	2,280	8,195
HE 280 A	76,4	270	280	8	13	24	97,3	244	196	M 27	112	178	1,603	20,99
HE 280 B	103	280	280	10,5	18	24	131,4	244	196	M 27	114	178	1,618	15,69
HE 280 M	189	310	288	18,5	33	24	240,2	244	196	M 27	122	186	1,694	8,984
HE 300 AA*	69,8	283	300	7,5	10,5	27	88,9	262	208	M 27	116	198	1,705	24,42
HE 300 A	88,3	290	300	8,5	14	27	112,5	262	208	M 27	118	198	1,717	19,43
HE 300 B	117	300	300	11	19	27	149,1	262	208	M 27	120	198	1,732	14,80
HE 300 M	238	340	310	21	39	27	303,1	262	208	M 27	132	208	1,832	7,699

Figure 12 : Caractéristiques HEA (ArcelorMittal)

1.2.5 Le noyau

Le noyau est un noyau en béton armé.

Le noyau se divise en plusieurs parties :

- Les voiles périphériques
- Les voiles intérieurs dans le sens longitudinal
- Les voiles intérieurs dans le sens transversal

L'épaisseur du voile « périphérique » varie selon la hauteur dans le bâtiment (les épaisseurs sont tirées de mes propres mesures sur les plans et coupes):

- Du niveau -2 à -1 : 1 m (longs côtés) et 1,7 m (petits côtés) sur une hauteur de 12 m
- Du niveau 1 à 6 : 0,63 m sur une hauteur de 28,8 m
- Du niveau 7 à 12 : 0,54 m sur une hauteur de 23,04 m
- Du niveau 13 à 34 : 0,4 m sur une hauteur de 86,72 m
- Du niveau 35 à 36 : 0,4 m sur une hauteur de 11,36 m (mais la taille du noyau et donc, son périmètre diffère).

L'épaisseur du voile « intérieur » varie selon la hauteur dans le bâtiment (les épaisseurs sont tirées de mes propres mesures sur les plans et coupes):

- Du niveau -2 à -1 : 1,2 m sur une hauteur de 12 m
- Du niveau 1 à 6 : 0,42 m sur une hauteur de 28,8 m
- Du niveau 7 à 12 : 0,3 m sur une hauteur de 23,04 m
- Du niveau 13 à 34 : 0,23 m sur une hauteur de 86,72 m
- Du niveau 35 à 36 : 0,23 m sur une hauteur de 11,36 m

La longueur de voile dans le sens longitudinal est 41,6 m.

La longueur de voile dans le sens transversal est 32,7 m sauf pour les niveaux 35 et 36 ou la longueur est 18,16 m.

1.2.6 Le radier de fondation

Le radier a une épaisseur de 3 m et une surface de 2166 m².

1.2.7 Les fondations

Il y a 86 barrettes de fondations d'une profondeur de 23 m. L'aire des barrettes est évaluée à 4,2 m².

2 Structure fictive en béton

La structure fictive en béton a été conçue pour être la plus proche possible de la structure de la Tour D2 : noyau central en béton, même nombre de colonnes « intérieures », surface au sol la plus proche possible, même nombre de niveaux, toiture-terrace. Cependant, quelques simplifications ont été faites :

- Le niveau 34 et les niveaux inférieurs contiennent tous des bureaux
- La hauteur des étages du niveau 32 et inférieurs font tous 3,84 m
- Le terrain est plat

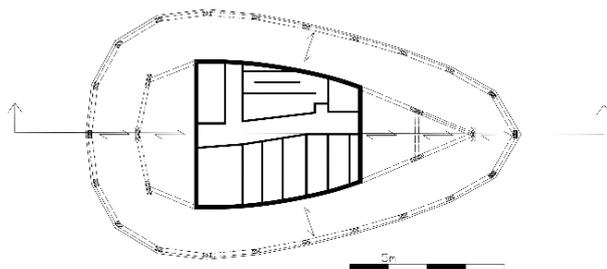
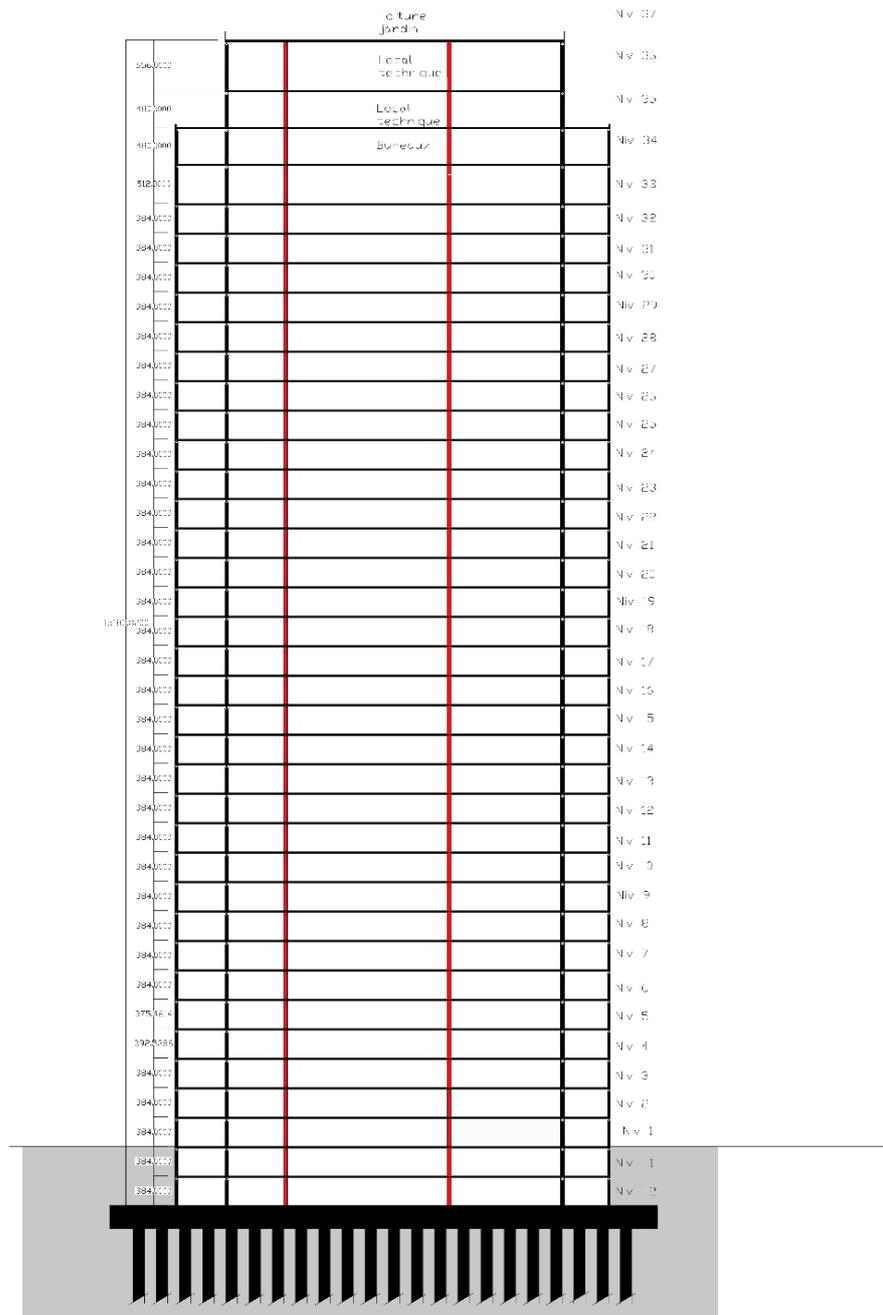


Figure 13 Tour fictive — coupe longitudinale type

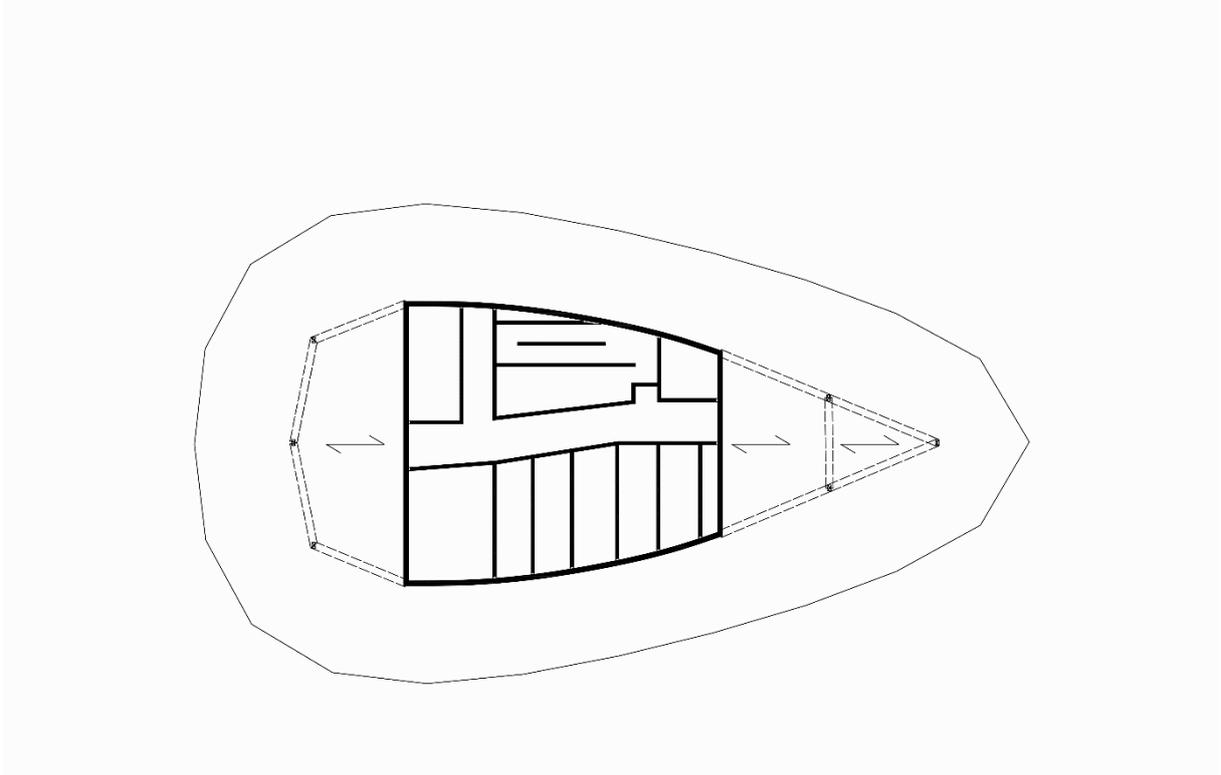


Figure 14 Tour fictive — niv 36 (plan type)

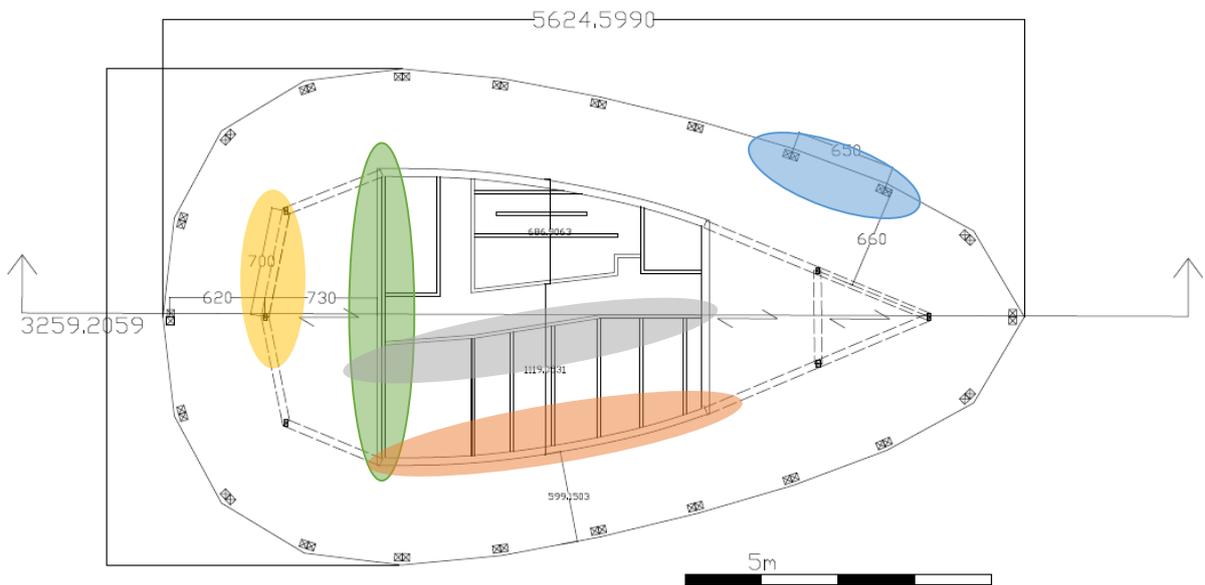


Figure 15 Tour fictive — niv 6 (plan type)

2.1 Éléments dimensionnants

Les éléments dimensionnants sont mis en évidence en couleur sur le plan type de la section précédente. On remarque 3 types d'éléments dimensionnant : colonne et poutre « intérieures » en jaune, colonne et poutre « extérieures » en bleu et le noyau central en vert, orange et gris.

2.2 Détermination des charges

2.2.1 Dues au vent

La charge de vent est déterminée à l'aide de l'Eurocode 1-4.

Vitesse de référence :

$$V_b = C_{dir} * C_{season} * V_{b0}$$

Où $C_{dir} = 1$ car la direction du vent est probable dans toutes les directions

$C_{season} = 1$ car le projet est durable sur plusieurs années

$V_{b0} = 24$ m/s à Paris

Donc,

$$V_b = 24 \text{ m/s}$$

Variation avec la hauteur :

La catégorie de notre terrain est la catégorie IV (tableau 4.1 de l'Eurocode 1 partie 1-4).

De ce fait :

- $Z_0 = 1$ m
- $Z_{min} = 10$ m

Et $z = 150$ m

$$V_m(z) = C_r(z) * C_0(z) * V_b$$

Où

- $C_0(z) = 1$ car le paysage est relativement plat (pente < 5% et pente < 3°)
- $C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ car $z_{min} < z$

$$\circ \text{ Et } k_r = 0.19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} = 0.19 * \left(\frac{1}{0.05}\right)^{0.07} = 0.234$$

$$\text{Donc, } C_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.234 * \ln\left(\frac{150}{1}\right) = 1.17$$

Finalement, $V_m(z) = C_r(z) * C_0(z) * V_b = 1.17 * 1 * 24$

$$\leftrightarrow v_m(150) = 28.17 \text{ m/s}$$

Turbulence du vent :

Pour $z_{min} < z$, on prend $k_l \sim 1$

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) * \ln(z/z_0)} = 0.199$$

Pression dynamique de pointe :

La pression dynamique de pointe est donnée par la formule suivante :

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * (v_m(z))^2$$

$$\leftrightarrow q_p(z) = [1 + 7 * 0.199] * \frac{1}{2} * 1.25 * (28.17)^2 = 1.19 \text{ kN/m}^2$$

Cependant, l'effet du vent peut varier en fonction de la hauteur. Le bâtiment étudié ayant une volumétrie peu commune, on considère qu'il s'agit d'un bâtiment à plan rectangulaire et comme $h > 2b$, le bâtiment peut être considéré comme 3 parties distinctes :

- Une partie supérieure dont la hauteur vaut b pour laquelle $q_p(z) = q_p(h)$
- Une partie inférieure dont la hauteur vaut b également pour laquelle $q_p(z) = q_p(b)$
- Une partie médiane pour laquelle on effectue une interpolation linéaire

Vent 1 (dans la longueur du bâtiment), on obtient :

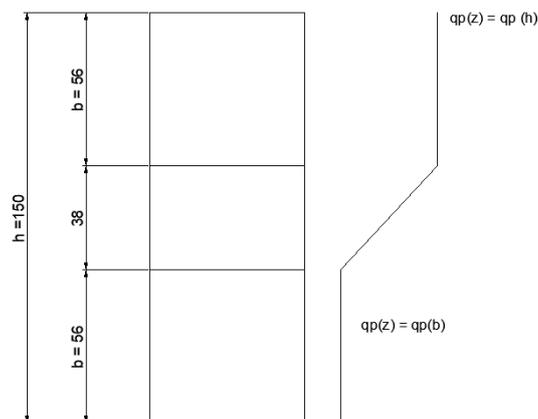


Figure 16 Profil de vent sur le long côté

$q_p(z) = 1.19 \text{ kN/m}^2$ comme détaillé ci-dessus et on obtient la valeur de $q_p(b)$ en procédant de la même manière : $q_p(b) = 0,88 \text{ kN/m}^2$

Vent 2 (dans la largeur du bâtiment), on obtient :

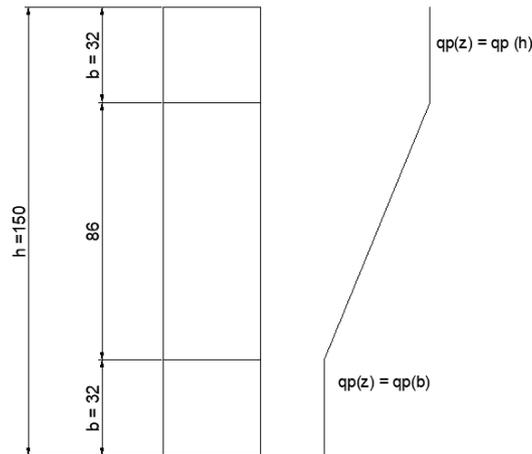


Figure 17 Profil de vent sur le petit côté

$q_p(z) = 1.19 \text{ kN/m}^2$ comme détaillé ci-dessus et on obtient la valeur de $q_p(b)$ en procédant de la même manière : $q_p(b) = 0,72 \text{ kN/m}^2$

Coefficient de force :

Le coefficient de force est obtenu par la formule suivante :

$$c_f = c_{f,0} * \psi_\lambda$$

$$\text{Et } c_{f,0} = 1.2 + \frac{0.18 * \log(10 * k/b)}{1 + 0.4 * \log(Re/10^6)}$$

Où

- k est la rugosité de surface équivalente (voir tableau 7.14 de l'EC1-4). Pour le verre, $k = 0,0015 \text{ mm}$.
- $Re = \frac{V * b}{\nu}$

Où

- o $V = \sqrt{\frac{2 * q_p}{\rho}}$ où $\rho_{air} = 1,25 \text{ kg/m}^3$
- o $b = 50 \text{ m}$ car on considère que le bâtiment est un cylindre à base circulaire de 50m de diamètre. Cette hypothèse de prédimensionnement est la plus proche des modèles proposés par l'eurocode. Il sera plutôt optimiste pour le vent 1 et pessimiste pour le vent 2.

Et ψ_λ est donné par la figure 7.36 de l'EC 1-4. Pour cela, il faut d'abord calculer λ qui est obtenu, pour un cylindre à base circulaire et pour $l \geq 50 \text{ m}$, par la formule suivante :

$$\lambda = 0.7 * \frac{l}{b} = 2.1 < 70$$

Pour $\lambda = 2.1$, $\psi_\lambda = 0.65$

Pour $h = 150 \text{ m}$,

- $V = 43.63 \text{ m/s}$
- $Re = 1.4 \cdot 10^8$
- $C_{f0} = 0.568$

Donc,

$$C_f = 0.369$$

Pour $h = 56 \text{ m}$

- $V = 37.47 \text{ m/s}$
- $Re = 1.2 \cdot 10^8$
- $C_{f0} = 0.559$

Donc,

$$C_f = 0.363$$

Pour $h = 30 \text{ m}$

- $V = 37.87 \text{ m/s}$
- $Re = 1.09 \cdot 10^8$
- $C_{f0} = 0.553$

Donc,

$$C_f = 0.359$$

Remarque : le coefficient de rugosité $k=0,0015 \text{ mm}$ du verre ne prend pas en compte les irrégularités telles que les joints. Il est donc trop favorable et, comme expliquée précédemment, l'hypothèse du cylindre est trop optimiste pour le vent 1.

Pour tenir compte de ces éléments, il paraît raisonnable et sécuritaire dans le cadre de ce prédimensionnement de retenir une valeur un peu plus élevée que celle obtenue avec les données collectées. Nous choisissons ici :

$C_f = 0.5$

Il est à noter que dans le projet de base avec l'exostructure le coefficient k de rugosité sera plus grand, le coefficient de force sera également plus grand et l'action du vent sur le bâtiment sera donc plus importante (à priori, environ 20 %).

Si on prend $k/b = 10^{-4}$, alors $C_{f0}=0.91$ et $C_f = 0.6$.

Effets dynamiques :

Il est à noter que les effets dynamiques et sismiques ne sont pas pris en compte car on fait l'hypothèse que le bâtiment est assez rigide grâce au noyau. En effet, le noyau central est une structure en béton coulé en place et permettra la dissipation d'énergie.

2.2.2 Dues à la neige

L'altitude de ce bâtiment à Paris est 43 m.
D'après les Eurocodes,

$$s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k$$

Avec

- $\mu_i=0.8$ (pente de toit de $0 < \alpha < 30^\circ$)
- $C_e=1$ car il s'agit d'un site normal
- $C_t=1$
- $s_k = s_{k,0} = 0.45$

Ainsi,

$$s = 0.36 \text{ kN/m}^2$$

Situation accidentelle : Paris étant une zone A1, il n'y a pas de charge exceptionnelle de neige à prendre en compte.

2.3 Principe de prédimensionnement des hourdis

Hyp : le poids de l'isolant et de la membrane EPDM est négligé

Les charges agissant sur les hourdis sont :

- La neige au niveau de la toiture (niveau 34 et 36)
- Les charges d'exploitation :
 - 5 kN/m² pour la catégorie E2 dans les locaux techniques (niv 34 et 35)
 - 3 kN/m² pour la catégorie B pour les bureaux (niv -2 à 33)
 - 0.71 kN/m² pour la catégorie H pour la toiture du niv 34 (pour les hourdis)
Car pour $\alpha \leq 20^\circ$: $q_k = \left(0,8 - \frac{A}{100}\right) \geq 0,2$ où l'aire reprise par le hourdi est $A = 1,2 * 7,3 = 8,76 \text{ m}^2$
 - 5 kN/m² pour la catégorie C5 pour la toiture du niv 36. **Hypothèse** : cette valeur est utilisée pour l'ensemble de la toiture, même pour les zones de végétation, donc non accessibles au public. En effet, les charges induites par l'infrastructure requise pour une toiture jardin engendrerait une charge permanente additionnelle : la toiture végétale en toiture (**hypothèse** : 5 kN/m²) mais la charge d'exploitation serait alors de 0.2 kN/m² (catégorie H). À l'ELU, la combinaison de charge serait légèrement inférieure à celle obtenue en considérant une charge d'exploitation uniforme de 5 kN/m². On considère alors cette valeur dans un souci de simplification.
- Les charges permanentes additionnelles :
 - Revêtement de sol : 2 kN/m²
 - Charges techniques et faux plafonds 0,5 kN/m²
 - Cloisons : 1,5 kN/m²

Combinaison de charges :

À l'ELU : $P_{\text{supporté par hourdi}} = 1.35G + 1.5Q_k(+1.5\psi_0S)$ où $\psi_{0,S} = 0.5$

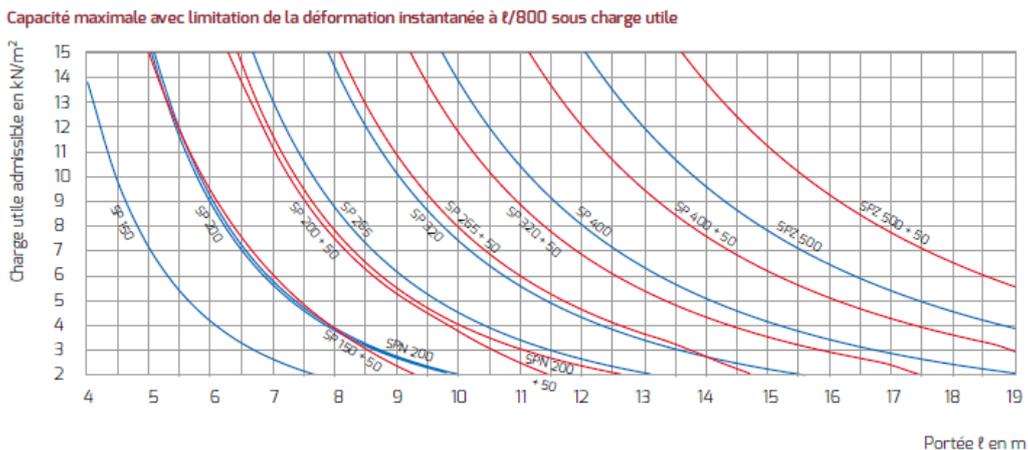
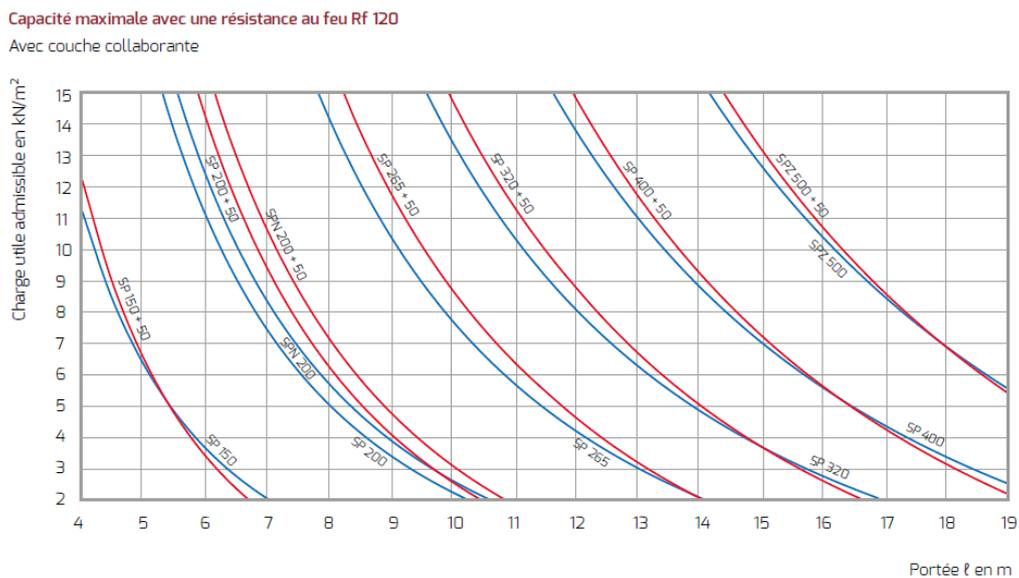
À l'ELS : $P_{\text{supporté par hourdi}} = G + Q_k(+\psi_0S)$ où $\psi_{0,S} = 0.5$

Hypothèse : les hourdis utilisés sur un étage sont les mêmes sur tout cet étage et correspondent à la dimension la plus grande obtenue lors du dimensionnement.

2.3.1 Fiche technique

Le dimensionnement a été fait à l'aide de fiche technique de produits Ergon. La fiche technique utilisée est disponible ici : https://www.ergon.be/wp-content/uploads/2018/04/02_ERG2018_TG_EI%C3%A9ments_Plancher_Toiture_FR.pdf

Les hourdis choisis ont une résistance au feu de 2 h



Remarque :
• Charge utile admissible = somme de toutes les charges sollicitant le hourdis à l'exclusion de son poids propre.

Figure 18 Extrait de la FT Ergon — hourdis

2.2.3 | Caractéristiques

Profil	h	b	Poids propre (avec joints)	
	mm	mm	kN/m	kN/m ²
SP 150	150	1196	2,94	2,45
SP 200	200	1196	3,33	2,78
SPN 200	200	1196	3,51	2,92
SP 265	265	1196	4,59	3,83
SP 320	320	1196	4,94	4,12
SP 400	400	1196	5,93	4,94
SPZ 500	500	1196	7,56	6,30

Figure 19 Caractéristiques des hourdis

2.3.2 Poids des hourdis

Le poids des hourdis est trouvé dans la fiche technique.

Pour 5 cm de chape de compression, on comptera 1.25 kN/m².

2.4 Principe de prédimensionnement des poutres

Les poutres doivent reprendre :

- Les charges dues à la neige (en toiture niv 36 et 34)
- Les charges permanentes additionnelles (revêtement de sol,...)
- Les charges d'exploitation

Il est à noter que pour les poutres, les charges d'exploitation de la toiture non accessible au public vaut 0,33 kN/m car pour $\alpha \leq 20^\circ$: $q_k = \left(0,8 - \frac{A}{100}\right) \geq 0,2$ où l'aire

reprise par la poutre est $A = \left(\frac{7,3}{2} + \frac{6,2}{2}\right) * 7 = 47,25m^2$

- Les hourdis

Combinaison de charges : $P_{supportéeparpoutre} = P_{supportéeparhourdi} + 1.35 * G_{hourdi}$

La charge linéaire est obtenue en multipliant le résultat précédent par la longueur de hourdis reprise par la poutre.

2.4.1 Fiche technique

La fiche technique de chez Ergon est disponible ici : https://www.ergon.be/wp-content/uploads/2018/02/03_ERG2018_TG_Structure_FR.pdf

Poutres RR avec hourdis SP 265 :

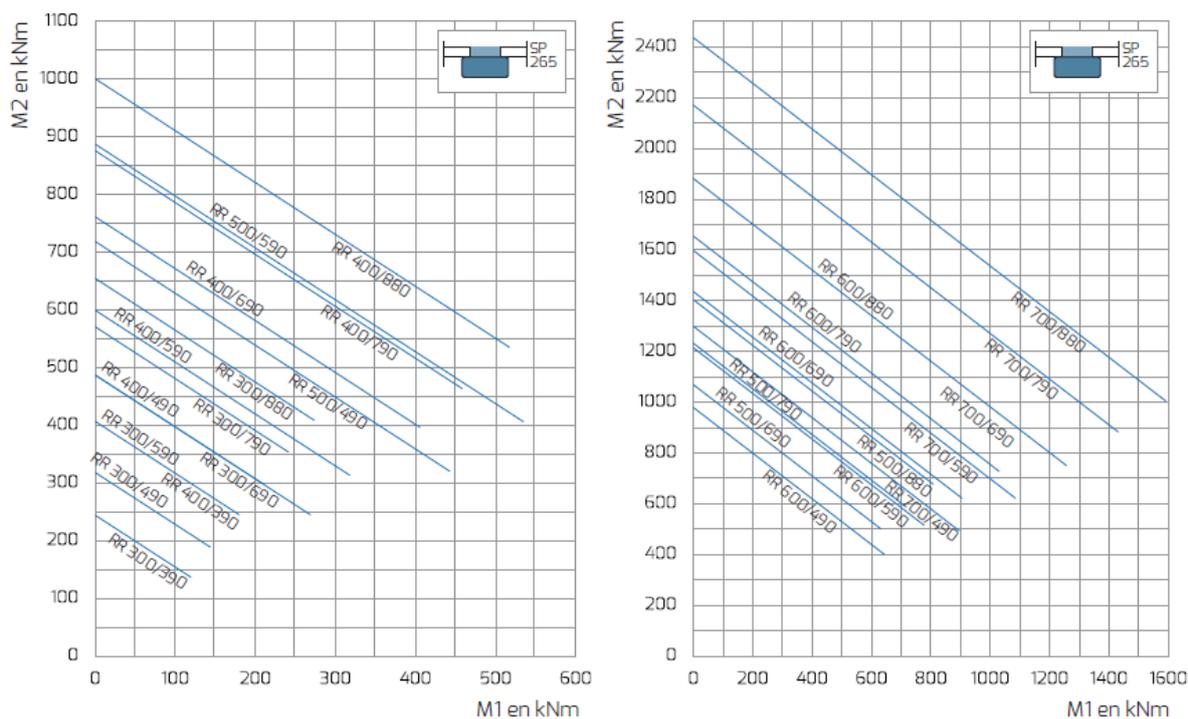


Figure 20 Extrait de la FT Ergon — poutres

Profil	h	b	Poids
	mm	mm	kN/m
RR 300/390	300	390	2,93
RR 300/490	300	490	3,68
RR 300/590	300	590	4,43
RR 300/690	300	690	5,18
RR 300/790	300	790	5,93
RR 300/880	300	880	6,60
RR 400/390	400	390	3,90
RR 400/490	400	490	4,90
RR 400/590	400	590	5,90
RR 400/690	400	690	6,90
RR 400/790	400	790	7,90
RR 400/880	400	880	8,80
RR 500/490	500	490	6,13
RR 500/590	500	590	7,38
RR 500/690	500	690	8,63
RR 500/790	500	790	9,88
RR 500/880	500	880	11,00
RR 600/490	600	490	7,35
RR 600/590	600	590	8,55
RR 600/690	600	690	9,75
RR 600/790	600	790	10,95
RR 600/880	600	880	12,15
RR 700/490	700	490	8,35
RR 700/590	700	590	9,55
RR 700/690	700	690	10,75
RR 700/790	700	790	11,95
RR 700/880	700	880	13,15

Figure 21 Caractéristiques des poutres RR (Ergon)

2.4.2 Calcul de M1

Pour calculer M1, il faut prendre en compte :

- Le poids propre de la poutre
- Le poids du hourdis et de la chape de compression : $1.35 \cdot G_{\text{hourdis+chape}} \cdot L_{\text{hourdis portée}}$

$$M1 = Q \cdot L_{\text{poutre}}^2 / 8$$

2.4.3 Calcul de M2

Pour calculer M2, il faut prendre en compte :

- Le poids propre de la poutre
- L'ensemble des charges (combinaison de charge calculée précédemment)

Donc, le moment engendré par cette charge est : $M = Q \cdot L_{\text{poutre}}^2 / 8$

Et $M2 = M - M1$

Remarque : dans cette hypothèse, les charges de finition seront posées 28 jours après le béton de 2^{ème} phase. Cette solution permet d'éviter l'étañonnement provisoire des poutres (voir fiche technique).

2.4.4 Poids des poutres

Le poids des poutres est donné dans la fiche technique.

2.5 Principe de prédimensionnement des colonnes

Les colonnes doivent reprendre des charges verticales :

- Les charges dues à la neige (en toiture niv 36 et 34)
- Les charges d'exploitation
- Les hourdis et leur chape de compression
- Les poutres
- Le poids propre des colonnes
- Les charges permanentes supplémentaires (chape de finition, cloison, charges techniques, faux plafond...)

La longueur de flambement des colonnes est $L_{fl} = L$.

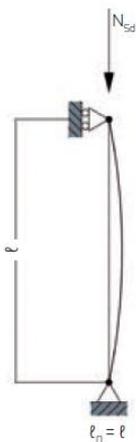


Figure 22 : Longueur de flambement (Ergon)

Hypothèse : les colonnes sont considérées comme se développant sur un seul niveau.

Combinaison de charge à l'ELU :

Charges verticales : $P_{support\acute{e}e\ par\ colonne} = P_{support\acute{e}e\ par\ poutre}/2 * 2 + 1.35 * G_{poutre}$

Hypothèse : pour les colonnes, on fait l'hypothèse que celles-ci ne reprennent aucune charge de vent et que ces actions sont directement transmises au noyau central par les planchers.

2.5.1 Calcul de N

On doit calculer l'effort normal dans la colonne. En faisant l'hypothèse que les poutres ont toute une portée identique, l'effort normal vaut 2x la réaction d'appui de la poutre (vu qu'une colonne supporte 2 poutres). En faisant l'**hypothèse** que la poutre est biappuyée, l'effort normal est calculé comme suit :

$$N = \frac{P * L}{2}$$

Où P comprend la charge transmise par les hourdis et le poids propre de la poutre.

Donc, l'effort normal repris dans la colonne est :

$$N = P * L + P_{support\acute{e}e\ par\ colonnes\ sup}$$

Pour ne pas calculer chaque colonne de chaque étage individuellement, on fait l'**hypothèse que** les charges transmises par les colonnes des niveaux supérieurs valent (la différence de charge entre les 2 derniers niveaux calculés) * $n_{\acute{e}tages}$. En additionnant ce résultat à la charge transmise par la dernière colonne calculée, on obtient $P_{support\acute{e}e\ par\ colonne\ sup}$.

Hypothèse : lorsque l'effort normal calculé est trop important pour pouvoir être repris par une colonne, on multiplie les colonnes (pour que la section finale obtenue soit plus grande) ce qui permet de diviser l'effort normal et le moment par le nombre de colonnes.

2.5.2 Calcul de M

Le vent n'a pas d'impact sur les colonnes (ces contraintes sont toutes reprises par le noyau). Par contre, un moment dans la colonne est induit par l'excentricité accidentelle des assemblages entre les colonnes et les poutres et est calculé comme suit :

$$M = N_{ed} * e_a$$

pour e_a , on comptera 20 mm dans les 2 directions (x et y) et N_{ed} est la charge transmise par la poutre :

$$M_x = M_y = N_{ed} * 0,02$$

$$M_{tot} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$$

2.5.3 Poids des colonnes

Le poids des colonnes est donné dans la fiche technique en kN/m. Connaissant la hauteur de la colonne, on en déduit facilement le poids en kN.

L'effort normal transmis à la colonne inférieure est donc : $N_{transmis} = N + 1.35 * G_{colonne}$

2.6 Principe de prédimensionnement du noyau

2.6.1 Simplification du noyau

Hypothèse : on considère que le noyau central est rectangulaire et que ses dimensions sont 15x21m.

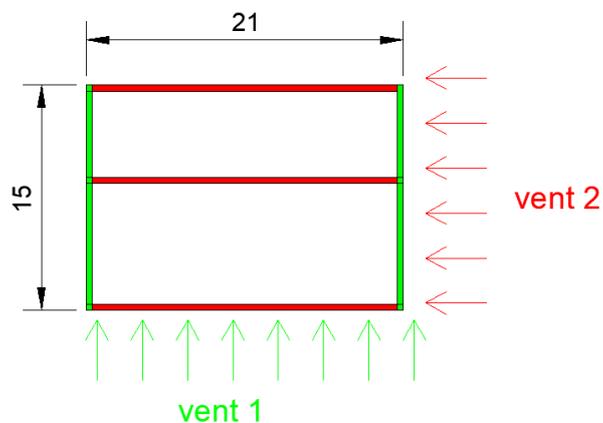


Figure 23 Noyau simplifié

Les moment et effort tranchant engendrés par le vent 1 sont repris par les voiles de 15 m de long tandis que les moment et effort tranchant engendrés par le vent 2 sont repris par les voiles de 21 m de long.

2.6.2 Charges reprises

2.6.2.1 Le vent

Vent 1 :

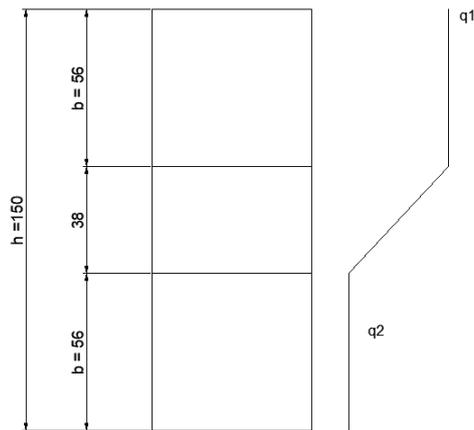


Figure 24 Charge de vent 1

À l'ELU,

- $q1 = qp(z) \cdot Cf \cdot b \cdot 1,5 = 49.96 \text{ kNm}$
- $q2 = qp(b) \cdot Cf \cdot b \cdot 1,5 = 36.84 \text{ kNm}$

Vent 2 :

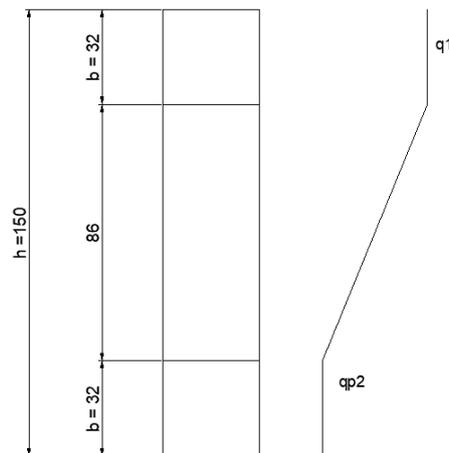


Figure 25 Charge de vent 2

À l'ELU,

- $q1 = qp(z) \cdot Cf \cdot b \cdot 1,5 = 28.55 \text{ kNm}$
- $q2 = qp(b) \cdot Cf \cdot b \cdot 1,5 = 17,21 \text{ kNm}$

2.6.2.2 Les charges transmises par les hourdis

- Les charges dues à la neige (en toiture niv 36 et 34)
- Les charges permanentes additionnelles (revêtement de sol...)
- Les charges d'exploitation

Il est à noter que pour les poutres, les charges d'exploitation de la toiture non accessible au public vaut $0,33 \text{ kN/m}$ car pour $\alpha \leq 20^\circ : q_k = \left(0,8 - \frac{A}{100}\right) \geq 0,2$ où l'aire

reprise par la poutre est $A = \left(\frac{7,3}{2} + \frac{6,2}{2}\right) \cdot 7 = 47,25 \text{ m}^2$

- Le poids propre des hourdis

2.6.3 Effort normal

Hypothèse : le béton utilisé est du C25/30 donc, $f_{ck}=25$ MPa

2.6.3.1 Vent 1 (*petit côté du noyau*)

Ce voile reprend

- les hourdis extérieurs au noyau. La longueur de hourdis reprise vaut $7.3/2 = 3,65$ m.
- la charge directement transmise par le voile supérieur
- son poids propre.

2.6.3.2 Vent 2 (*long côté du noyau*)

Ce voile (voile « périphérique ») reprend :

- Les hourdis extérieurs au noyau. La longueur de hourdis reprise vaut $6/2=3$ m
- Les hourdis intérieurs du noyau. La longueur de hourdis reprise vaut $11,2/2 = 5,6$ m.
- Son poids propre

N vaut la somme de ces charges.

Le voile « intérieur » reprend :

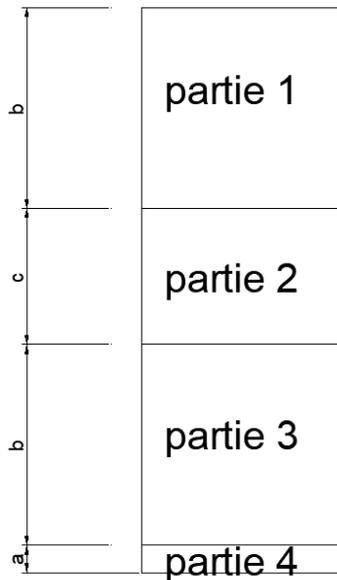
- Les hourdis intérieurs au noyau. Les longueurs de hourdis reprises sont $11.2/2 = 5.6$ m et $6.9/2 = 3.45$ m.
- Son poids propre

N vaut la somme de ces charges.

(Remarque : la distance entre les murs porteurs est variable dû à la géométrie du noyau et 6 m et 11 m sont les longueurs maximales entre les murs porteurs au sein du noyau).

2.6.4 Moment

Le bâtiment est composé de 4 parties :



$$M_{partie1} = q1 * b * \left(\frac{b}{2} + c + b + a\right)$$

$$M_{partie2} = \frac{(q1 + q2)}{2} * c * \left(\frac{c}{3} + b + a\right)$$

$$M_{partie3} = q2 * b * \left(\frac{b}{2} + a\right)$$

$$M = M_{partie1} + M_{partie2} + M_{partie3}$$

2.6.4.1 Épaisseur b

Afin de déterminer l'épaisseur b , nous utilisons la formule de prédimensionnement suivante :

$$M = 0.9 * b * f_y * A_s$$

De cette manière, nous faisons l'hypothèse que ce sont les armatures qui reprennent l'entièreté du moment et l'épaisseur est prise à 90 % pour prendre en compte le recouvrement du béton. On fait l'hypothèse que l'acier utilisé est de S500.

De plus, la section d'acier A_s doit être :

- $\leq A_{s,max} = 4\%A_c$
- $\geq A_{s,min} = 0,2\%A_c$

Hypothèse : l'épaisseur minimale pour une bonne mise en œuvre du béton est $b_{min} = 250$ mm

2.6.4.2 Vérification de la section d'acier A_s

On définit $d2 = 1000$ mm (armatures principales de flexion sur les 2 premiers mètres)

Donc, comme pour le vent 1, $h=15200$ mm donc $d_2/h = 0.065$ et pour le vent 2, $h=21000$ mm donc $d_2/h = 0.05$

On utilise alors les tables suivantes :

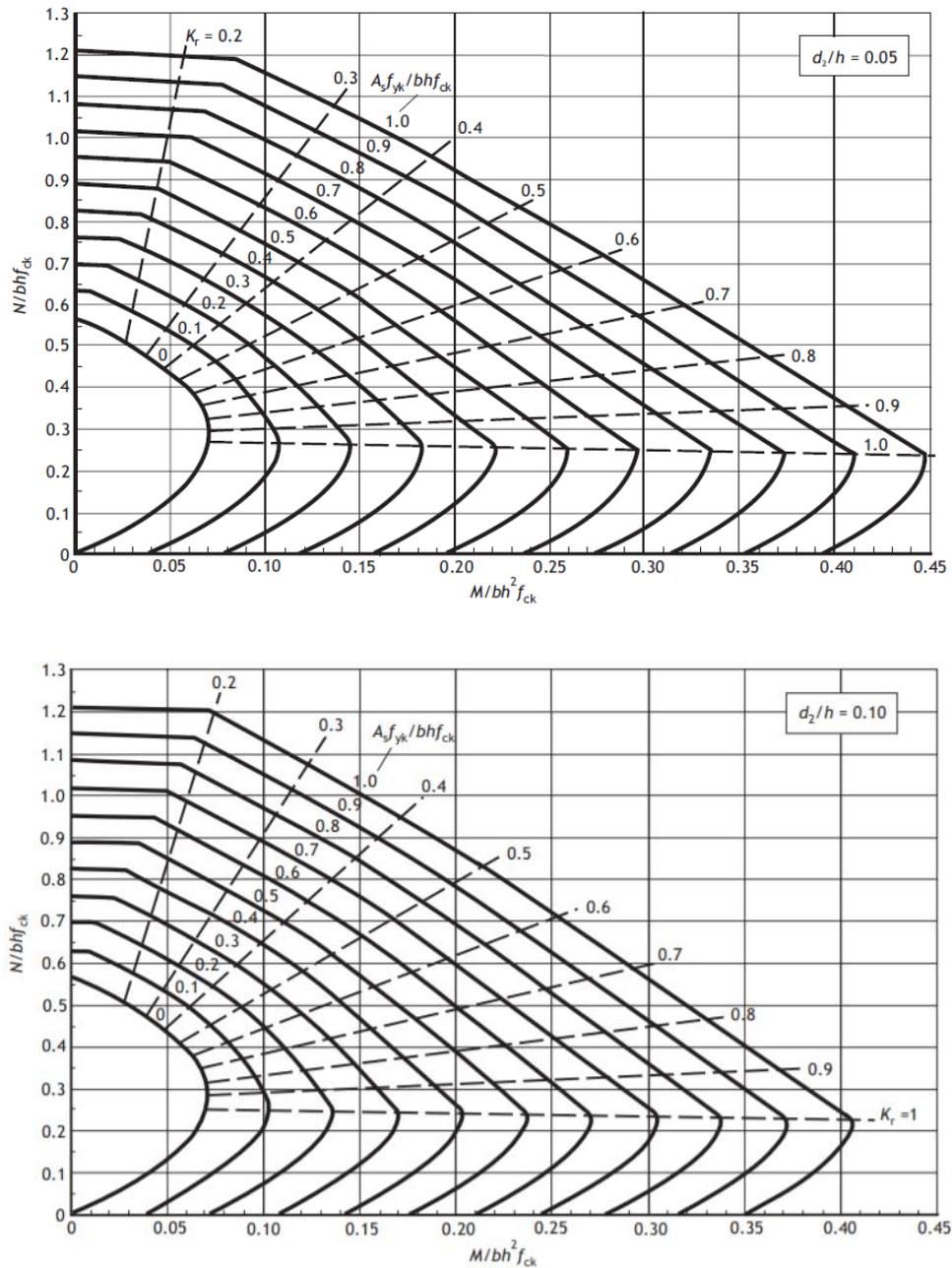


Figure 26 How to Design Concrete Structure Using Eurocode 2, The concrete Centre and British Cement Association

Connaissant les valeurs de $\frac{N}{bh f_{ck}}$ et de $\frac{M}{bh^2 f_{ck}}$, le graphique nous donne la valeur de

$$\frac{A_s f_{yk}}{bh f_{ck}}$$

L'acier utilisé est du S500, $f_{yk} = 500 \text{ Mpa}$ et que le béton utilisé est du C25/30, $f_{ck} = 25 \text{ Mpa}$. Il est à noter qu'une résistance en compression du béton plus élevée aurait pu être choisie.

Connaissant b et h également, on en déduit la section d'acier nécessaire A_s .

Cette valeur doit être :

- $\leq A_{s,max} = 4\% A_c$
- $\geq A_{s,min} = 0,2\% A_c$

Comme dans la table $\frac{A_s f_{yk}}{b h f_{ck}}$ a une valeur maximale de 1, b est déterminé de telle façon que la valeur de $\frac{A_s f_{yk}}{b h f_{ck}}$ soit égale ou inférieure à 1 et que A_s soit bien compris entre $A_{s,max}$ et $A_{s,min}$.

2.6.5 Vérification de l'effort tranchant V

Tout comme pour le calcul des moments, le bâtiment est composé de 4 parties et l'effort tranchant V est calculé comme suit :

$$V_{partie1} = q1 * b$$

$$V_{partie2} = \frac{q2 + q1}{2} * c$$

$$V_{partie3} = q2 * b$$

$$V = V_{partie1} + V_{partie2} + V_{partie3}$$

La section résiste à l'effort tranchant si $V < V_{Rd,c}$

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

Où

- $C_{Rd,c} = 0.18/\gamma_c$ où $\gamma_c = 1.5$
- $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2$
- $\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w d} \leq 0.02$
- $f_{ck} = 25 \text{ Mpa}$
- $k_1 = 0.15$
- $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0.2 f_{cd}$ où $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c$
- $v_{min} = 0.035 \sqrt{k^3 f_{ck}}$

2.7 Prédimensionnement des fondations

2.7.1 Tour D2

Pour déterminer les fondations, on procède par comparaison avec la tour D2. En effet, on sait que ce bâtiment à un radier d'une épaisseur de 3 m ainsi que 86 barrettes de fondation.

Pour cette tour, connaissant le poids des éléments, on connaît les charges appliquées permanentes :

- L'exostructure : $3.44 \cdot 10^4$ kN
- La tôle métallique du plancher collaborant : $4.59 \cdot 10^3$ kN
- Le béton du plancher collaborant : $1.13 \cdot 10^5$ kN
- Les planchers béton : $7.56 \cdot 10^4$ kN
- Les poutres : $2.23 \cdot 10^4$ kN
- Les colonnes en acier : $1.2 \cdot 10^3$ kN
- Les colonnes en béton : $1.41 \cdot 10^4$ kN
- Le noyau en béton : $2.39 \cdot 10^5$ kN

Pour un total de $1.35 \cdot \text{somme} = 679\,647.88$ kN à l'ELU

Les charges dues à l'exploitation (majoritairement des bureaux -> 3kN/m^2) sont : $3 \cdot \text{Surface} \cdot 1.5 = 237311.1$ kN où la surface au sol est estimée à 1395 m^2 sauf aux niveaux 36 et 37 (toiture) où elle est de 560 m^2 .

Au total, les fondations reprennent donc $9.17 \cdot 10^5$ kN (ELU).

Le radier de la Tour 2D fait 3m d'épaisseur pour un total de 6500 m^3 soit, pour une masse volumique de 2500 kg/m^3 , 162500 kN.

Les 86 barrettes de fondations (type de pieux moulés) vont jusqu'à 23 m de profondeur.

2.7.2 Tour fictive

De la même manière, en ce qui concerne le bâtiment fictif en béton, les charges appliquées sont :

- Les hourdis : $3.13 \cdot 10^5$ kN
- Les poutres : $3.54 \cdot 10^4$ kN
- Les colonnes : $4.67 \cdot 10^4$ kN
- Le noyau : $2.04 \cdot 10^5$ kN

Pour un total de 808766.22 kN

Les charges dues à l'exploitation (majoritairement des bureaux -> 3kN/m^2) sont également : $3 \cdot \text{Surface} \cdot 1.5 = 237311.1$ kN (ELU)

Au total, les fondations reprennent donc $1.05 \cdot 10^6$ kN.

2.7.3 Calcul des fondations

On fait l'**hypothèse** que le **radier a également une épaisseur de 3 m et un volume de 6500 m³** et qu'il y aura donc plus de barrettes de fondations que pour le bâtiment tour D2.

Hypothèse : on ne tient pas compte du frottement latéral car les barrettes de fondation sont mises en place sans refoulement latéral $\rightarrow Q_{su} = 0$. Il est à noter qu'en réalité, il faudrait prendre en compte le frottement (probablement 0.05 MPa pour ce cas de figure). Cependant, cette valeur étant relativement faible et n'ayant pas d'information exacte concernant les sols où est implantée la tour, le frottement est négligé et donc, les fondations légèrement surdimensionnées. De plus, cette hypothèse étant prise pour les 2 cas d'étude, elle n'altère par les résultats de la comparaison.

La charge limite à la pointe est $Q_{PU} = \rho_p * A * q_{pu}$

Où $\rho_p = 0.75$ si on fait l'**hypothèse** qu'il s'agit d'un pieu en H et que le sol est sablonneux à Paris.

On fait également l'**hypothèse** que, à 23 m de profondeur, le sol est de la marne compactée issue des alluvions de la vallée de la Seine de l'époque du Pliocène.

De ce fait, la résistance limite à la pointe est $p_l = 4Mpa$

2.7.4 Dimension des barrettes de fondation

$$Q_{PU} = \rho_p * A * q_{pu} \leftrightarrow A = \frac{Q_{PU}}{\rho_p * q_{pu}}$$

Où $q_{pu} = p_l = 4Mpa$

$\rho_p = 0.75$

Et Q_{PU} est la charge totale reprise par les fondations.

1. Pour la Tour D2

Les charges reprises sont $9.17 \cdot 10^5$ kN + 162500 kN (radier). Donc, $Q_{PU} = 1079458.98$ kN

Donc, $A = 359.82$ m²

Comme il y a 86 barrettes de fondation, chaque barrette reprend alors 4.2 m².

2. Tour fictive

Les charges reprises sont $1.05 \cdot 10^6$ kN + $1.63 \cdot 10^5$ kN (radier). Donc, $Q_{PU} = 1.21 \cdot 10^6$ kN

Donc, $A = 402.86$ m²

Si on garde les mêmes barrettes de fondation que pour le tour D2 et que seule la quantité change, sachant qu'une barrette reprend 4.2 m^2 , il faudra 97 barrettes.

2.8 Résultats obtenus

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
36	Portée : 7.3 m Charge ELU : 10.47 kN/m ² Charge ELS : 7.18 kN/m ² Type : SP265	L _{hourdi reprise} : 3.65 m Charge ELU : 57.09 kN/ml L _{poutre} : 7 m M1 = 139.48 kNm M2=234.07 kNm Type: RR 400/390	h = 6.56 m Charge de la poutre : 62.35 kN/m N _{RD} = 436.47 kN M _{RD} = 12.35 kNm Type: CR 290x290 N _{transmis} = 454.71 kN	/	/	Charge N = 1709 kN Moment M = 537.54 kNm b_{min} = 250 mm As = 7600 mm ² V = 3.28*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.03*10 ⁶ -> ok	Charge N = 3001,67 kN Moment M = 204.78 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 1.87*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.5*10 ⁶ -> ok	Charge N = 4134.83 kN Moment M = 204.78 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 1.87*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.67*10 ⁶ -> ok
35	Portée : 7.3 m Charge ELU : 13.57 kN/m ² Charge ELS : 9.5 kN/m ² Type : SP265	L _{hourdi reprise} : 3.65 m Charge ELU : 68.42 kN/ml L _{poutre} : 7 m M1 =145,6 kNm M2= 303.49 kNm Type: RR 400/490	h = 4.8 m Charge de la poutre : 73.03 kN/m N _{RD} = 979.96 kN M _{RD} = 14.86 kNm Type: CR 390x240 N _{transmis} = 994.8 kN	/	/	Charge N = 3364.65 kN Moment M = 1611.98 kNm b_{min} = 250 mm As = 7600 mm ² V = 5.68*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.28*10 ⁶ -> ok	Charge N = 6056.64 kN Moment M = 614.09 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 3.24*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.96*10 ⁶ -> ok	Charge N = 8547.9 kN Moment M = 614.09 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 3.24*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 2.33*10 ⁶ -> ok
34	Idem SP265	L _{hourdi reprise} : 6.75 Charge ELU : 126.53 kN/ml L _{poutre} : 7 m	h = 4.8 m Charge de la poutre : 137.19 kN/m	L _{hourdi reprise} : 3.3 m Charge ELU : 38.74 kN/ml L _{poutre} : 6.5 m	h = 4.8 m Charge de la poutre : 43.71 kN/m	Charge N = 5020.25 kN Moment M = 3262.01 kNm b_{min} = 250 mm	Charge N = 9719.44 kN Moment M = 1242.67 kNm b_{min} = 250 mm	Charge N = 12960.99 kN Moment M = 1242.67 kNm b_{min} = 250 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
		M1 = 262.15 kNm M2= 561.24 kNm Type: RR 400/790	N _{RD} = 1955.18 kN M _{RD} = 27.16 kNm Type: CR 390x390 soit 1.5*10 ³ cm ² N _{transmis} = 1979.35 kN	M1 =109.54 kNm M2= 114.5 kNm Type: RR 300/490	N _{RD} = 284.12 kN M _{RD} = 8.04 kNm Type: CR 290x290 soit 0.8*10 ³ cm ² N _{transmis} = 297.47 kN	As = 7600 mm ² V = 8.07*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 1.53*10 ⁶ -> ok	As = 10500 mm ² V = 4.61*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 2.51*10 ⁶ -> ok	As = 10500 mm ² V = 4.61*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 2.99*10 ⁶ -> ok
33	Portée : 7.3 m Charge ELU : 9.9 kN/m ² Charge ELS : 7 kN/m ² Type : SP265	L _{hourdi reprise} : 6.75 Charge ELU : 101.72 kN/ml L _{poutre} : 7 m M1 = 254.19 kNm M2= 409.3 kNm Type: RR 300/880	h = 5.12 m Charge de la poutre : 110.63 kN/m N _{RD} = 2753.81 kN M _{RD} = 21.9 kNm Type: CR 490x290 soit 1.4*10 ³ cm ² N _{transmis} = 2777.86 kN	L _{hourdi reprise} : 3.3 m Charge ELU : 49.73 kN/ml L _{poutre} : 6.5 m M1 = 109.54 kNm M2=172.54 kNm Type: RR 300/490	h = 5.12 m Charge de la poutre : 54.7 kN/m N _{RD} = 653.03 kN M _{RD} = 10.06 kNm Type: CR 290x290 soit 0.8*10 ³ cm ² N _{transmis} = 667.27 kN	Charge N = 6513.01 kN Moment M = 5656.47 kNm b_{min} = 250 mm As = 7600 mm ² V = 1.06*10 ⁶ < V _{Rdc, max} = 1.75*10 ⁶ -> ok	Charge N = 13348.37 kN Moment M = 2154.84 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 6.08*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 3.05*10 ⁶ -> ok	Charge N = 16732.34 kN Moment M = 2154.84 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = 6.08*10 ⁵ < V _{Rdc, max} = 3.56*10 ⁶ -> ok
32	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84 m Charge de la poutre : 110.63 kN/m N _{RD} = 3552.31 kN M _{RD} = 21.9 kNm	Idem RR300/490	h = 3.84 m Charge de la poutre : 54.7 kN/m N _{RD} = 1022.82 kN M _{RD} = 10.06 kNm	Charge N = 7841.6 kN Moment M = 7882.09 kNm b_{min} = 250 mm As = 7600 mm ²	Charge N = 16750.5 kN Moment M = 3002.7 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ²	Charge N = 20276.89 kN Moment M = 3002.7 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ²

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			Type: CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 3570.35 \text{ kN}$		Type: CR 390x240 soit $0.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 1034.69 \text{ kN}$	$V = 1.26 \cdot 10^6 < V_{\text{Rdc, max}} = 1.95 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	$V = 7.17 \cdot 10^5 < V_{\text{Rdc, max}} = 3.56 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	$V = 7.17 \cdot 10^5 < V_{\text{Rdc, max}} = 3.67 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$
31	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 28 CR 590x490 soit $2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 29 CR 390x390 soit $1.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
30	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 28 CR 590x490 soit $2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 29 CR 390x390 soit $1.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
29	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 28 CR 590x490 soit $2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m $N_{\text{RD}} = 2125.1 \text{ kN}$ $M_{\text{RD}} = 10.06 \text{ kNm}$ Type: CR 390x390 soit $1.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 2144.43 \text{ kN}$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
28	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84 m Charge de la poutre : 110.63 kN/m	Idem RR300/490	Idem niv 24 CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			$N_{RD} = 6722.28 \text{ kN}$ $M_{RD} = 21.9 \text{ kNm}$ Type: CR 590x490 soit $2.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{transmis} = 6758.98 \text{ kN}$					
27	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 23 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 24 CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
26	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 23 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 24 CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
25	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 23 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 24 CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 24 b = 250 mm
24	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 23 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m $N_{RD} = 3979.64 \text{ kN}$ $M_{RD} = 10.06 \text{ kNm}$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Charge N = 48633.28 kN Moment M = 16997.7 kNm b_{min} = 250 mm As = 10500 mm ² V = $1.63 \cdot 10^6 <$ V _{Rdc, max} = $3.67 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
					Type: CR 490x390 soit $1.9 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 4003.9 \text{ kN}$			
23	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84 m Charge de la poutre : 110.63 kN/m $N_{RD/2} = 5361.03 \text{ kN}$ $M_{RD/2} = 10.95 \text{ kNm}$ Type: CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{\text{transmis}} = 10783.02 \text{ kN}$	Idem RR300/490	Idem niv 20 CR 490x490 soit $2.4 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 22 b = 500 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
22	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit $7.2 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 20 CR 490x490 soit $2.4 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Charge N = 21127.51 kN Moment M = 50101.84 kNm b = 500 mm As = 15200 mm ² $V = 3.12 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, \text{max}} = 4.71 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	Charge N = 50771.83 kN Moment M = 16997.7 kNm b_{min} = 500 mm As = 21000 mm ² $V = 1.63 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, \text{max}} = 7.34 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	Idem niv 14 b = 600 mm
21	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490	Idem RR300/490	Idem niv 20 CR 490x490	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			x3 soit 7.2*10 ³ cm ²		soit 2.4*10 ³ cm ²			
20	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit 7.2*10 ³ cm ²	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m N _{RD} = 5475.14 kN M _{RD} = 10.06 kNm Type: CR 490x490 soit 2.4*10 ³ cm ² N _{transmis} = 5505.62 kN	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
19	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit 7.2*10 ³ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit 3.8*10 ³ cm ²	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
18	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit 7.2*10 ³ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit 3.8*10 ³ cm ²	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
17	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 16 CR 490x490 x3 soit 7.2*10 ³ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit 3.8*10 ³ cm ²	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
16	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84m Charge de la poutre : 110.63 kN/m	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit 3.8*10 ³ cm ²	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			$N_{RD/3} = 5486.54 \text{ kN}$ $M_{RD/3} = 7.3 \text{ kNm}$ Type: CR 490x490 x3 soit $7.2 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$ $N_{transmis} = 16551.08 \text{ kN}$					
15	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 700 mm	Idem niv 14 b = 600 mm
14	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Charge N = 32642.71 kN Moment M = 103315 kNm b = 700 mm As = 21280 mm² $V = 4.46 \cdot 10^6 < V_{Rdc, max} = 7.52 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$	Charge N = 79213.6 kN Moment M = 107931.54 kNm b = 700 mm As = 29400 mm ² $V = 2.34 \cdot 10^6 < V_{Rdc, max} = 1.25 \cdot 10^7 \rightarrow \text{ok}$	Charge N = 85031.32 kN Moment M = 107931.54 kNm b = 600 mm As = 25200 mm ² $V = 2.34 \cdot 10^6 < V_{Rdc, max} = 8.81 \cdot 10^6 \rightarrow \text{ok}$
13	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem RR300/490	Idem niv 12 CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3 \text{ cm}^2$	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
12	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4	Idem RR300/490	h = 3.84m	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²		Charge de la poutre : 54.7 kN/m N _{RD} /2= 4261.3 kN M _{RD} /2= 5.03 kNm Type: CR 490x390 x2 soit $3.8 \cdot 10^3$ cm ² N _{transmis} = 8571.13 kN			
11	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
10	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
9	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
8	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm
7	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv 6 CR 590x490 x4	Idem RR300/490	Idem niv 6 CR 490x490 x2	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 900 mm	Idem niv 6 b = 800 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²		soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ²			
6	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84m Charge de la poutre : 110.63 kN/m $N_{RD/4} =$ 6240.11 kN $M_{RD/4} = 5.48$ kNm Type: CR 590x490 x4 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ² $N_{transmis} =$ 25077.41 kN	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m $N_{RD/2} =$ 5443.69 kN $M_{RD/2} = 5.03$ kNm Type: CR 490x490 x2 soit $4.8 \cdot 10^3$ cm ² $N_{transmis} =$ 10948.35 kN	Charge N = 45327.54 kN Moment M = 180456.6 kNm b = 900 mm As = 27360 mm ² V = $5.59 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, max} =$ $9.57 \cdot 10^6 \rightarrow ok$	Charge N = 109271.33 kN Moment M = 208363.04 kNm b = 900 mm As = 37800 mm ² V = $3 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, max} =$ $1.32 \cdot 10^7 \rightarrow ok$	Charge N = 115551.38 kN Moment M = 208363.04 kNm b = 800 mm As = 33600 mm ² V = $3 \cdot 10^6 <$ $V_{Rdc, max} =$ $1.17 \cdot 10^7 \rightarrow ok$
5	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
4	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
3	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
2	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm

Niveau	Hourdis	Poutre « intérieure »	Colonne « intérieure »	Poutre « extérieure »	Colonne « extérieure »	Voile vent 1 (petit côté) : h=15200 mm	Voile vent 2 (long côté) h= 21000 mm	Voile « intérieur » (long côté) h= 21000 mm
			soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²		soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²			
1	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
-1	Idem SP265	Idem RR 300/880	Idem niv -2 CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ²	Idem RR300/490	Idem niv -2 CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ²	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1100 mm	Idem niv -2 b = 1000 mm
-2	Idem SP265	Idem RR 300/880	h = 3.84m Charge de la poutre : 110.63 kN/m $N_{RD}/5 =$ 6214.21 kN $M_{RD}/5 = 4.38$ kNm Type: CR 590x390 x5 soit $11.5 \cdot 10^3$ cm ² $N_{transmis} =$ 31217.24 kN	Idem RR300/490	h = 3.84m Charge de la poutre : 54.7 kN/m $N_{RD}/2 =$ 6840.56 kN $M_{RD}/2 = 5.03$ kNm Type: CR 590x490 x2 soit $5.8 \cdot 10^3$ cm ² $N_{transmis} =$ 13754.53 kN	Charge N = 57844.19 kN Moment M = 281198.35 kNm b = 1100 mm As = 33440 mm ² V = $6.51 \cdot 10^6 <$ V _{Rdc, max} = $1.18 \cdot 10^7 \rightarrow ok$	Charge N = 137530.12 kN Moment M = 340499.91 kNm b = 1100 mm As = 46200 mm ² V = $3.43 \cdot 10^6 <$ V _{Rdc, max} = $1.61 \cdot 10^7 \rightarrow ok$	Charge N = 144027.18 kN Moment M = 340499.91 kNm b = 1000 mm As = 42000 mm ² V = $3.43 \cdot 10^6 <$ V _{Rdc, max} = $1.47 \cdot 10^7 \rightarrow ok$

Annexe 3 : Quantification des matériaux

Tableau 1 : quantification des matériaux du cas 1

	POIDS TOTAL [KG]	POIDS TOTAL [KG/M ² /AN]	PROPORTION [%]
EXO-STRUCTURE EN ACIER	3,44E+06	0,66	4,0
COLONNES EN ACIER	1,2E+05	0,02	0,1
COLONNES EN BÉTON	1,41E+06	0,27	1,6
POUTRES EN ACIER	2,23E+06	0,43	2,6
PLANCHER COLLABORANT – PROFILÉ ACIER	4,59E+05	0,09	0,5
PLANCHER COLLABORANT – BÉTON	1,13E+07	2,17	13,1
PLANCHER EN BÉTON	7,56E+06	1,45	8,8
NOYAU EN BÉTON	2,39E+07	4,58	27,7
RADIER EN BÉTON	1,55E+07	2,98	18,0
FONDACTIONS EN BÉTON	2,02E+07	3,88	23,4
TOTAL	8,60E+07	16,58	100

Tableau 2 : quantification des matériaux du cas 2

	POIDS TOTAL [KG]	POIDS TOTAL [KG/M ² /AN]	PROPORTION [%]
HOUDIS EN BÉTON	3,13E+07	6,01	31,9
POUTRES EN BÉTON	3,54E+06	0,68	3,6
COLONNES EN BÉTON	4,67E+06	0,90	4,8
NOYAU EN BÉTON	2,04E+07	3,93	20,8
RADIER EN BÉTON	1,55E+07	2,98	15,8
FONDACTIONS EN BÉTON	2,27E+07	4,37	23,2
TOTAL	9,81E+07	18,86	100,0

Annexe 4 : Contribution des éléments à l'ACV

1 Résultats ACV selon l'unité de référence

Les résultats de l'ACV de la structure (selon l'unité de référence) du premier cas d'étude, la Tour D2 sont les suivants :

Tableau 1: Résultats de l'ACV du cas selon l'unité de référence

Potentiel de :	Unités	TOT A1- A3	TOT A4- A5	TOT B1- B7	TOT C1- C4	TOTAL	D
GWP	kg éq. CO ₂	1,83E+07	4,92E+06	-3,12E+05	5,35E+05	2,34E+07	-5,09E+06
EDP	kg éq. CFC11	9,45E-01	5,03E-01	0,00E+00	5,55E-01	2,00E+00	-1,29E-02
EP	kg éq. SO ₂ ⁻	4,73E+04	1,45E+04	0,00E+00	7,49E+03	6,93E+04	-6,57E+03
EP	kg éq. (PO ₄) ³⁻	5,57E+03	1,77E+03	0,00E+00	1,64E+03	9,00E+03	-7,75E+02
POCP	kg éq. Éthylène	6,59E+03	2,55E+03	0,00E+00	4,84E+02	9,65E+03	-2,74E+03
ADP_éléments	kg éq. Sb	6,55E+01	3,40E+00	0,00E+00	1,94E-02	6,94E+01	-7,77E-01
ADP_fossiles	MJ	1,56E+08	5,69E+07	0,00E+00	1,47E+07	2,28E+08	-4,84E+07

Ceux obtenus pour le deuxième cas d'étude (selon l'unité de référence), la tour fictive en béton, sont les suivants :

Tableau 2: Résultats de l'ACV du cas 2 selon l'unité de référence

Potentiel de :	Unités	TOT A1- A3	TOT A4- A5	TOT B1- B7	TOT C1- C4	TOTAL	D
GWP	kg éq. CO ₂	7,75E+06	2,62E+06	-4,06E+05	3,42E+04	1,00E+07	-3,89E+05
EDP	kg éq. CFC11	4,31E-01	2,60E-01	0,00E+00	2,32E-01	9,24E-01	-1,61E-02
EP	kg éq. SO ²⁻	1,80E+04	7,26E+03	0,00E+00	4,92E+03	3,02E+04	-1,12E+03
EP	kg éq. (PO ₄) ³⁻	2,62E+03	9,21E+02	0,00E+00	1,07E+03	4,61E+03	-1,23E+02
POCP	kg éq. Éthylène	8,79E+02	1,15E+03	0,00E+00	2,16E+02	2,25E+03	-1,93E+02
ADP_éléments	kg éq. Sb	1,02E+00	8,79E-02	0,00E+00	9,85E-02	1,21E+00	-5,22E-01
ADP_fossiles	MJ	2,85E+07	3,01E+07	0,00E+00	1,03E+07	6,88E+07	-4,49E+06

2 Potentiel de réchauffement climatique

Tableau 3 : GWP - cas 1

		GWP – CAS 1					
		[kg CO2-Eq/m²/an]					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	9,32E-01	1,10E-01	0,00E+00	2,84E-02	1,06E+00	-2,45E-01
	Colonnes (acier)	3,26E-02	3,86E-03	0,00E+00	9,93E-04	3,72E-02	-8,54E-03
	Colonnes (béton)	2,14E-02	1,51E-02	-1,08E-03	3,55E-04	3,58E-02	-2,40E-03
Système de plancher	Poutres (acier)	9,70E-01	1,03E-01	0,00E+00	1,84E-02	1,09E+00	-4,60E-01
	Planchers collaborants	4,71E-01	2,70E-01	0,00E+00	4,56E-02	7,87E-01	-1,90E-01
	Plancher (béton)	1,16E-01	5,59E-02	-6,17E-03	1,70E-03	1,67E-01	-8,65E-03
	Noyau	3,62E-01	1,58E-01	-3,80E-02	1,09E-02	4,93E-01	1,41E-08
	Radier	3,10E-01	1,63E-01	-9,79E-03	-5,17E-03	4,58E-01	9,19E-09
	Fondations	3,09E-01	6,68E-02	-4,87E-03	1,63E-03	3,72E-01	-1,27E-02
	TOT	3,52E+00	9,46E-01	-5,99E-02	1,03E-01	4,50E+00	-9,27E-01

Tableau 4 : GWP - cas 2

		GWP – CAS 2					
		[kg CO2-Eq/m ² /an]					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	7,10E-02	5,00E-02	-3,58E-03	1,18E-03	1,19E-01	-7,95E-03
	Système de plancher	Poutres	4,05E-02	6,07E-03	-2,27E-03	-9,61E-04	4,33E-02
Hourdis		4,09E-01	7,48E-02	-2,43E-02	3,08E-04	4,60E-01	-2,87E-03
Noyau		3,10E-01	1,35E-01	-3,26E-02	9,38E-03	4,22E-01	-2,32E-02
Radier		3,10E-01	1,63E-01	-9,79E-03	-5,17E-03	4,58E-01	-2,42E-02
Fondations		3,48E-01	7,54E-02	-5,49E-03	1,84E-03	4,20E-01	-1,44E-02
TOT		1,49E+00	5,04E-01	-7,80E-02	6,57E-03	1,92E+00	-7,47E-02

Des Tableaux 3 et 4, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, l'exostructure et les poutres en acier produisent à elles seules quasiment la moitié de kg éq. CO₂. Les colonnes (en acier et en béton) quant à elles ont une contribution minime. Dans le cas 2, le radier et les hourdis contribuent chacun à environ 1/4 de la production de kg éq. CO₂. Les fondations et le noyau les suivent de peu.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, les éléments en acier, principalement l'exostructure (26 %) et les poutres (28 %) sont les éléments émettant le plus de kg éq. CO₂. Dans le cas 2, le noyau, le radier et les fondations contribuent de manière assez similaire au GWP (20 %), légèrement en dessous des hourdis (27 %).

Nous pouvons ainsi remarquer que, malgré que les 2 cas aient le même radier (voir hypothèses), ces derniers n'ont pas le même impact. En effet, dans le cas 1, sa contribution est minime en comparaison avec celles de l'exostructure et des poutres en acier, alors que dans le cas 2, le radier contribue à 20 %. Cela montre l'impact important de la production d'acier sur le potentiel de réchauffement climatique.

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1, les éléments ayant le plus d'impact sont, en tête, les planchers collaborants (28 %), suivis du noyau (17 %) et du radier (17 %). Dans le cas 2, le noyau (27 %) et le radier (32 %) sont les éléments sources de la majorité de kg éq. CO₂.

Encore une fois, la comparaison montre la différence de contribution du radier, identique dans les 2 cas, dont l'importance dans le GWP est moindre dans le cas 1. Cela montre la grande importance d'autres éléments comme les planchers collaborants.

Pour le **module B1-B7**, dans le cas 1, le noyau central a l'impact positif le plus conséquent (-62 %). Les autres éléments en béton impactent également positivement le résultat (dû à la carbonatation du béton, phénomène durant lequel le béton absorbe du CO₂ et qui a donc un impact positif sur le GWP). Il est à noter que les bénéfices engendrés par le béton des planchers collaborant ne sont ici pas pris en compte (voir FDES). Dans le cas 2, c'est également le noyau central qui a le plus grand impact positif (-42 %) mais les autres éléments contribuent tous au bénéfice étant donné que l'intégralité de la structure est en béton et donc, que tous les éléments sont soumis à la carbonatation.

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, le plancher collaborant est l'élément le plus néfaste (40 %), suivi de l'exostructure (25 %) et des poutres en acier (16 %). Dans le cas 2, l'élément le plus néfaste lors de la fin de vie du bâtiment est le noyau (50 %).

Il est à noter que, bien que le noyau du cas 2 soit moins imposant que celui du cas 1, il constitue l'élément contribuant au GWP en fin de vie, alors que dans le cas 1, la contribution du noyau est bien inférieure à celle du plancher collaborant et des éléments en acier (exostructure et poutre), ce qui montre bien la grande influence de ces éléments.

Pour le **module D**, dans le cas 1, c'est majoritairement grâce aux poutres en acier que la structure a un impact positif sur le GWP après la fin de vie. Dans le cas 2, les bénéfices réalisés après l'étape de fin de vie réutilisation du béton sous forme de graves concassées dans les infrastructures routières, recyclage de l'acier d'armature) sont majoritairement issus du radier et du noyau.

3 Potentiel de destruction de la couche d'ozone stratosphérique

La Figure 1 montre que la structure mixte acier-béton du cas 1 a des effets plus néfastes sur la couche d'ozone que la structure en béton du cas 2. Les bénéfices engendrés par la réutilisation, la récupération et le recyclage après la fin de vie sont quant à eux assez proches l'un de l'autre.

Comparaison ODP [kg éq. CFC-11/m²/an]

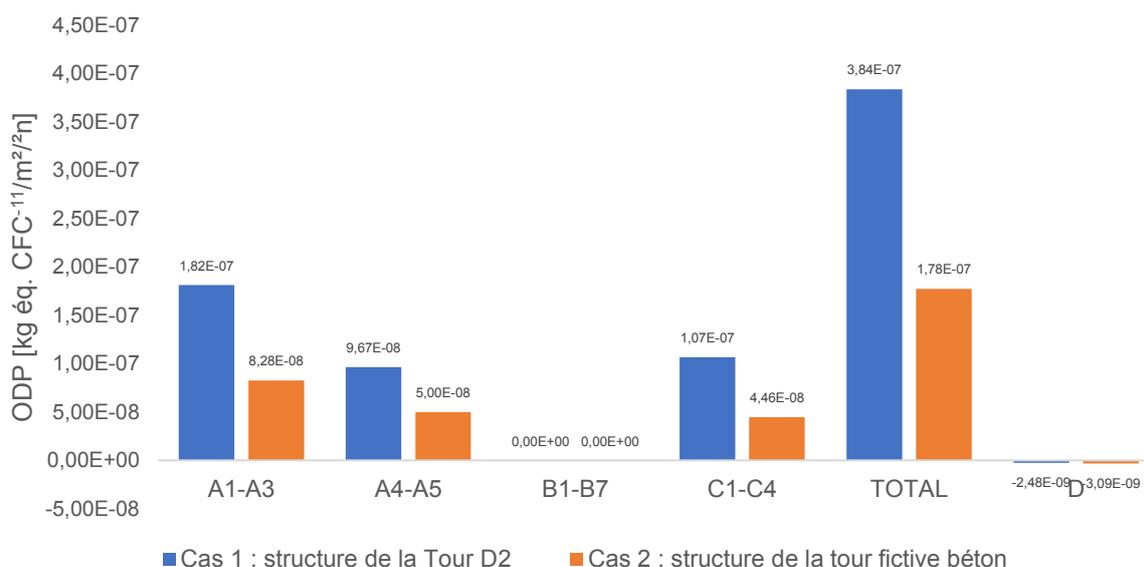


Figure 27 : Comparaison ODP

Tableau 5 : ODP - cas 1

		ODP – CAS 1					
		kg CFC11-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	6,61E-08	2,05E-08	0,00E+00	2,05E-08	1,06E-07	0,00E+00
	Colonnes (acier)	2,31E-09	7,16E-10	0,00E+00	7,16E-10	3,69E-09	0,00E+00
	Colonnes (béton)	1,23E-09	8,54E-10	0,00E+00	8,36E-10	2,92E-09	-5,10E-11
Système de plancher	Poutres (acier)	2,34E-08	1,24E-08	0,00E+00	1,36E-08	4,91E-08	0,00E+00
	Planchers collaborants	2,62E-08	2,19E-08	0,00E+00	3,13E-08	8,01E-08	0,00E+00
	Plancher (béton)	6,39E-09	4,57E-09	0,00E+00	4,48E-09	1,54E-08	-2,73E-10
	Noyau	2,09E-08	1,44E-08	0,00E+00	1,41E-08	0,00E+00	-8,62E-10
	Radier	1,81E-08	9,35E-09	0,00E+00	9,19E-09	3,66E-08	-5,60E-10
	Fondations	1,70E-08	1,20E-08	0,00E+00	1,19E-08	4,09E-08	-7,29E-10
	TOT	1,82E-07	9,67E-08	0,00E+00	1,07E-07	3,35E-07	-2,48E-09

Tableau 6 : ODP - cas 2

		ODP – CAS 2					
		kg CFC11-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	4,09E-09	2,83E-09	0,00E+00	2,77E-09	9,69E-09	-1,69E-10
Système de plancher	Poutres	2,17E-09	1,11E-09	0,00E+00	1,15E-09	4,50E-09	-7,73E-11
	Hourdis	2,14E-08	1,09E-08	0,00E+00	5,92E-09	3,82E-08	-7,24E-10
	Noyau	1,79E-08	1,24E-08	0,00E+00	1,21E-08	4,23E-08	-7,38E-10
	Radier	1,81E-08	9,35E-09	0,00E+00	9,19E-09	3,66E-08	-5,60E-10
	Fondations	1,92E-08	1,35E-08	0,00E+00	1,35E-08	4,62E-08	-8,22E-10
	TOT	8,28E-08	5,00E-08	0,00E+00	4,46E-08	1,78E-07	-3,09E-09

Des Tableaux 5 et 6, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, plus de 1/4 de l'impact de la structure sur la destruction de la couche d'ozone stratosphérique est dû à l'exostructure. Dans le cas 2, le noyau, le radier et les barrettes de fondation contribuent ensemble à 3/4 de l'impact.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, l'exostructure contribue grandement au potentiel de destruction de la couche d'ozone (36 %). Dans le cas 2, le potentiel de destruction de la couche d'ozone est causé principalement par les hourdis (26 %), suivi du noyau (21 %), du radier (22 %) et des fondations (23 %).

Pour le **module A4-A5**, dans cas 1, l'influence des éléments sur l'ODP est plutôt bien répartie, en ne tenant pas compte des colonnes en acier ou béton que ne contribuent qu'à 2 % du potentiel. Dans le cas 2, ce sont les fondations qui sont les plus défavorables (27 %), suivies de peu par le noyau (25 %) et les hourdis (22 %).

On peut également remarquer que, pour l'étape de mise en œuvre, la contribution des planchers (planchers collaborants et hourdis) est identique (22 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, l'ODP durant l'étape de fin de vie est majoritairement causé par la fin de vie des planchers collaborants (29 %). Dans le cas 2, ce sont les fondations et le noyau qui ont le plus mauvais impact (30 %).

Pour le **module D**, dans le cas 1, en dehors des frontières du système, des bénéfiques sont faits grâce au noyau principalement (-35 %). Dans le cas 2, c'est surtout grâce aux

fondations (-27 %) et au noyau (-24 %) que les bénéfices au-delà des frontières du systèmes sont effectués.

On remarque que pour l'ODP, en dehors des frontières du système, l'acier n'a aucun impact alors que le béton apporte des bénéfices.

4 Potentiel d'acidification du sol et de l'eau

La Figure 3 montre que le cas 1 a un AP plus élevé durant toutes les étapes de cycle de vie hormis l'étape de vie en œuvre B1-B7 pendant laquelle les 2 cas d'étude n'ont pas d'impact. De plus, la structure du cas 1 génère de plus grands bénéfices liés à la réutilisation, la récupération et le recyclage après la fin de vie des éléments.

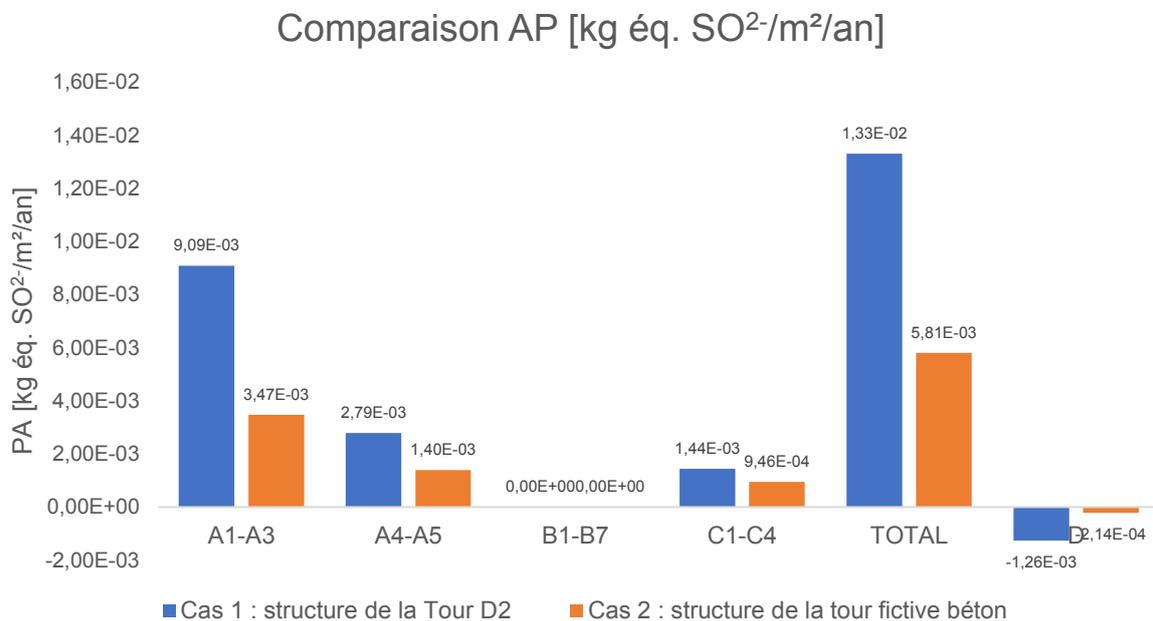


Figure 28 : Comparaison AP

Tableau 7 : AP - cas 1

		AP – CAS 1					
		kg SO2-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	2,64E-03	3,70E-04	0,00E+00	1,85E-04	3,17E-03	-1,98E-04
	Colonnes (acier)	9,24E-05	1,29E-05	0,00E+00	6,46E-06	1,11E-04	-6,93E-06
	Colonnes (béton)	4,80E-05	4,14E-05	0,00E+00	1,63E-05	1,06E-04	-5,99E-06
Système de plancher	Poutres (acier)	2,47E-03	3,16E-04	0,00E+00	1,20E-04	2,90E-03	-8,04E-04
	Planchers collaborants	1,38E-03	8,01E-04	0,00E+00	3,35E-04	2,55E-03	-3,93E-05
	Plancher (béton)	2,59E-04	1,58E-04	0,00E+00	8,76E-05	5,04E-04	-2,43E-05
	Noyau	8,12E-04	4,49E-04	0,00E+00	2,76E-04	1,54E-03	-7,61E-05
	Radier	6,88E-04	4,43E-04	0,00E+00	1,80E-04	1,31E-03	-6,18E-05
	Fondations	6,90E-04	2,03E-04	0,00E+00	2,33E-04	1,13E-03	-4,54E-05
	TOT	9,09E-03	2,79E-03	0,00E+00	1,44E-03	1,33E-02	-1,26E-03

Tableau 8 : AP - cas 2

		AP – CAS 2					
		kg SO2-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	1,59E-04	1,37E-04	0,00E+00	5,41E-05	3,50E-04	-1,99E-05
Système de plancher	Poutres	9,24E-05	2,03E-05	0,00E+00	2,35E-05	1,36E-04	-4,19E-06
	Hourdis	1,05E-03	1,82E-04	0,00E+00	1,88E-04	1,43E-03	-1,21E-05
	Noyau	6,95E-04	3,84E-04	0,00E+00	2,37E-04	1,32E-03	-6,52E-05
	Radier	6,88E-04	4,43E-04	0,00E+00	1,80E-04	1,31E-03	-6,18E-05
	Fondations	7,79E-04	2,29E-04	0,00E+00	2,63E-04	1,27E-03	-5,12E-05
	TOT	3,47E-03	1,40E-03	0,00E+00	9,46E-04	5,81E-03	-2,14E-04

Des Tableaux 7 et 8, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, l'exostructure est responsable de 1/4 de la production de kg éq. de SO₂, suivie de peu par les poutres en acier. Dans le cas 2, le noyau, le radier et les barrettes de fondations sont tous les 3 responsables d'environ 1/4 de la production de kg éq. de SO₂.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 2, ce sont l'exostructure (29 %) et les poutres en acier (27 %) qui contribuent le plus au potentiel d'acidification lors de la phase de fabrication. Dans le cas 2, la production des hourdis est celle qui impacte le plus le potentiel d'acidification (30 %).

On remarque cependant que, dans l'étape de production, les planchers collaborants du cas 1 ont une contribution proportionnelle plus faible que les hourdis du cas 2 pour le potentiel d'acidification alors que ces éléments ont un impact similaire. Cela montre la prédominance de l'exostructure et des poutres en acier dans le potentiel d'acidification total.

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1 la mise en œuvre du plancher collaborant est responsable de presque 1/3 du AP. Dans le cas 2, c'est la mise en œuvre du radier qui impacte le plus le AP (32 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, c'est la fin de vie des planchers collaborants qui contribue le plus au potentiel d'acidification (23 %). Les contributions des autres éléments sont plutôt bien réparties, mise à part les colonnes en acier ou en béton dont la contribution est minime par rapport aux autres éléments. Dans le cas 2, le AP est réparti surtout entre les fondations (28 %) et le noyau (25 %), suivis du radier (19 %) et des hourdis (20 %).

Pour le **module D**, dans le cas 1, les bénéfices effectués après la fin de vie de la structure sont principalement faits grâce aux poutres en acier (-64 %). Ce détail est interpellant : l'énorme contribution des poutres en acier par rapport à l'exostructure (-16 %), également en acier alors que leur masse sont du même ordre de grandeur. Dans le cas 2, c'est grâce aux noyau, fondations et radier que les bénéfices au-delà des frontières du système sont réalisés.

Pour le AP, l'acier permet des bénéfices bien supérieurs que le béton après la fin de vie de la structure. En effet, malgré que les radiers soient identiques dans les 2 cas d'étude, leur contribution aux bénéfices après la fin de vie diffère : dans le cas 1, ils ne représentent que 5 % du bénéfice total alors que dans le second, ils en représentent 25 %.

5 Potentiel d'eutrophisation

La Figure 7 montre que mise à part durant l'étape de vie en œuvre B1-B7, la structure du cas 2 a un potentiel d'eutrophisation plus élevé que la structure en béton. Elle réalise cependant plus de bénéfices durant l'étape D qui prend en compte la réutilisation, la récupération et le recyclage.

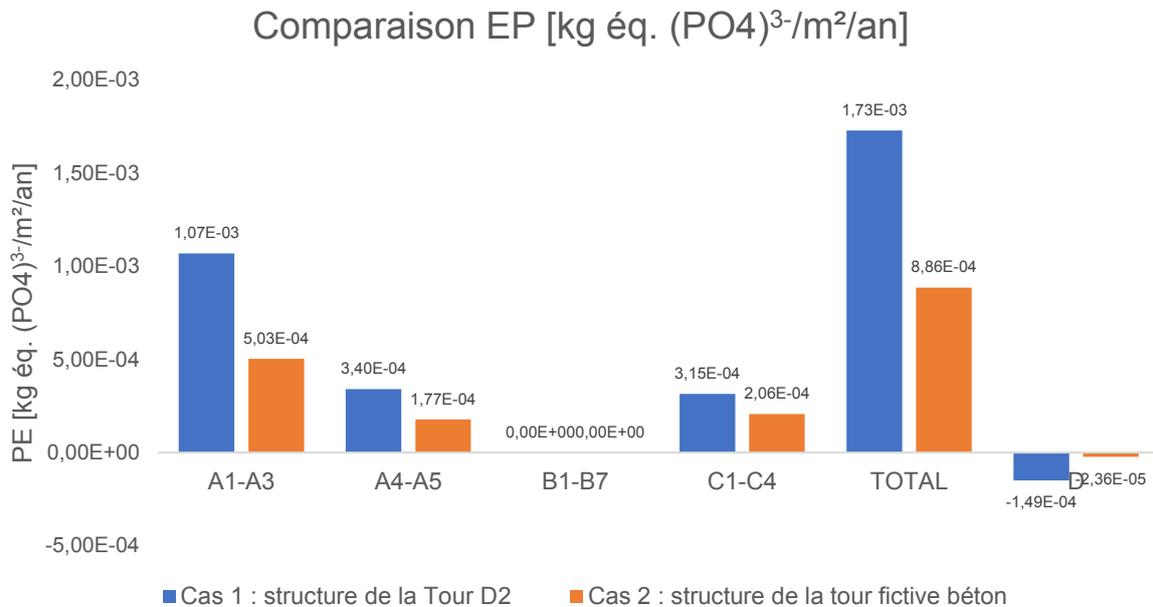


Figure 29 : Comparaison EP

Tableau 9 : EP - cas 1

		EP – CAS 1					
		kg (PO4)3-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	2,91E-04	5,49E-05	0,00E+00	4,03E-05	3,90E-04	-1,98E-05
	Colonnes (acier)	1,02E-05	1,92E-06	0,00E+00	1,41E-06	1,36E-05	-6,93E-07
	Colonnes (béton)	7,51E-06	4,53E-06	0,00E+00	3,58E-06	1,56E-05	-9,87E-07
Système de plancher	Poutres (acier)	2,22E-04	4,03E-05	0,00E+00	2,64E-05	2,90E-04	-6,63E-05
	Planchers collaborants	1,60E-04	8,74E-05	0,00E+00	7,29E-05	3,21E-04	-4,15E-05
	Plancher (béton)	4,06E-05	1,87E-05	0,00E+00	1,92E-05	7,85E-05	-4,65E-06
	Noyau	1,27E-04	5,47E-05	0,00E+00	6,06E-05	2,42E-04	-1,46E-05
	Radier	1,04E-04	4,81E-05	0,00E+00	3,94E-05	1,91E-04	1,05E-05
	Fondations	1,08E-04	2,98E-05	0,00E+00	5,12E-05	1,89E-04	-1,08E-05
	TOT	1,07E-03	3,40E-04	0,00E+00	3,15E-04	1,73E-03	-1,49E-04

Tableau 10 : EP - cas 2

		EP – CAS 2					
		kg (PO4)3-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	2,49E-05	1,50E-05	0,00E+00	1,19E-05	5,18E-05	-3,27E-06
Système de plancher	Poutres	1,39E-05	3,25E-06	0,00E+00	5,16E-06	2,23E-05	-1,26E-06
	Hourdis	1,30E-04	3,01E-05	0,00E+00	4,01E-05	2,00E-04	-4,79E-06
	Noyau	1,09E-04	4,69E-05	0,00E+00	5,19E-05	2,07E-04	-1,25E-05
	Radier	1,04E-04	4,81E-05	0,00E+00	3,94E-05	1,91E-04	1,05E-05
	Fondations	1,22E-04	3,36E-05	0,00E+00	5,78E-05	2,13E-04	-1,22E-05
	TOT	5,03E-04	1,77E-04	0,00E+00	2,06E-04	8,86E-04	-2,36E-05

Des Tableaux 9 et 10, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous :

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, 1/4 de la production de kg éq. de (PO₄)³⁻ produite par la structure est due à l'exostructure mais la contribution des autres éléments sur le potentiel d'eutrophisation est répartie équitablement (sauf pour les colonnes en acier ou en béton qui ont un impact minime). Dans le cas 2, le noyau, le radier et les barrettes de fondation contribuent chacun en environ 1/4 de la production de kg éq. (PO₄)³⁻.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, durant l'étape de production, ce sont majoritairement les éléments en acier qui causent le potentiel d'eutrophisation. L'exostructure représente à elle seule 27 % de ce potentiel et les poutres en acier 21 %. Dans le cas 2, ce sont les fondations (24 %) et des hourdis (26 %) qui impactent le plus le potentiel d'eutrophisation durant la phase de production.

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1 et pour la phase de mise en œuvre, le plancher collaborant intervient pour plus de 1/4 du EP. Dans le cas 2, le EP est réparti majoritairement entre le noyau (27 %), le radier (27 %), les fondations (19 %) et les hourdis (17 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, la contribution de chacun des éléments montre une répartition assez équitable du EP (mise à part les colonnes en acier ou en béton qui ne contribuent qu'à 2 % du potentiel). Néanmoins les éléments participant le plus au potentiel sont les planchers collaborants (23 %). Dans le cas 2, on remarque également une répartition équitable du potentiel d'eutrophisation entre les éléments suivant : noyau (25 %), radier (19 %), fondations (28 %) et hourdis (19 %).

Pour le **module D**, dans le cas 1, un impact positif très important sur le EP est réalisé par les poutres en acier (-39 %). Dans le cas 2, ce sont les fondations, le radier et le noyau qui contribuent le plus aux bénéfices engendrés après la fin de vie. Ensemble, ces 3 éléments constituent plus de 75 % du EP pour le module D.

6 Potentiel de formation d'oxydants photochimiques de l'ozone stratosphérique.

La Figure 4 montre que la structure du cas 1 est la structure la plus défavorable en ce qui concerne cette catégorie d'impact. De plus, elle montre une grande différence surtout durant l'étape de production A1-A3. Néanmoins, ses bénéfices de charge au-delà des frontières du système sont nettement supérieurs à ceux de la structure de la tour fictive en béton.

Comparaison POCP [kg éq. éthylène/m²/an]

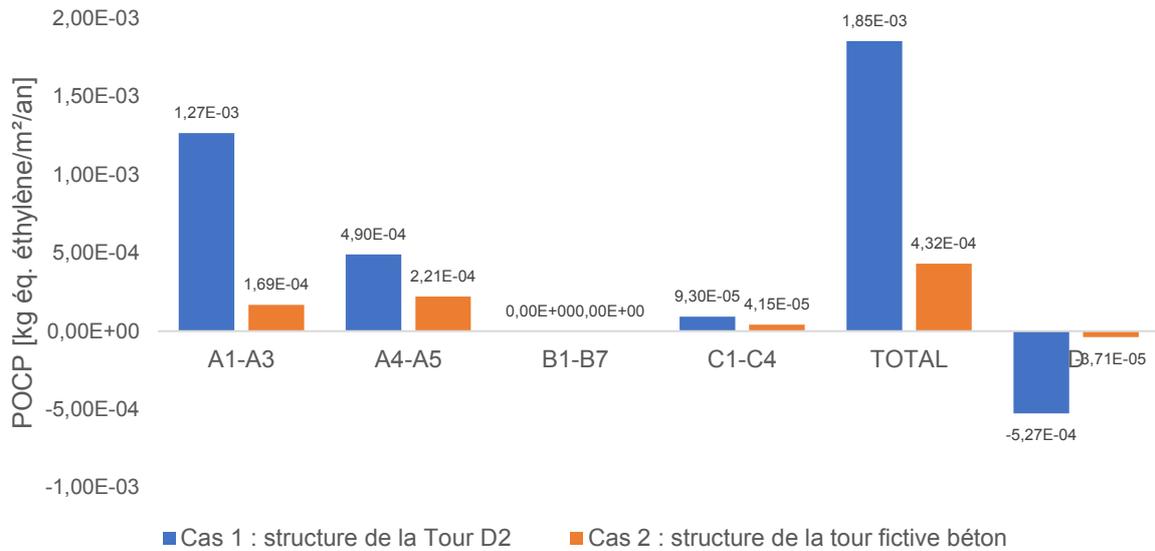


Figure 30 : Comparaison POCP

Tableau 11 : POCP - cas 1

		POCP – CAS 1					
		kg éthylène-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	4,56E-04	5,62E-05	0,00E+00	1,72E-05	5,29E-04	-9,25E-05
	Colonnes (acier)	1,59E-05	1,96E-06	0,00E+00	6,00E-07	1,85E-05	-3,23E-06
	Colonnes (béton)	2,41E-06	7,50E-06	0,00E+00	7,74E-07	1,07E-05	-1,32E-06
Système de plancher	Poutres (acier)	4,95E-04	5,19E-05	0,00E+00	1,14E-05	5,68E-04	-2,68E-04
	Planchers collaborants	1,75E-04	1,53E-04	0,00E+00	2,62E-05	3,50E-04	-1,24E-04
	Plancher (béton)	1,29E-05	2,77E-05	0,00E+00	4,15E-06	4,48E-05	-4,50E-06
	Noyau	4,08E-05	7,82E-05	0,00E+00	1,31E-05	1,32E-04	-1,41E-05
	Radier	3,46E-05	8,05E-05	0,00E+00	8,51E-06	1,24E-04	-1,32E-05
	Fondations	3,45E-05	3,36E-05	0,00E+00	1,11E-05	7,91E-05	-5,77E-06
	TOT	1,27E-03	4,90E-04	0,00E+00	9,30E-05	1,85E-03	-5,27E-04

Tableau 12 : POCP - cas 2

		POCP – CAS 2					
		kg éthylène-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	7,99E-06	2,48E-05	0,00E+00	2,57E-06	3,54E-05	-4,36E-06
Système de plancher	Poutres	4,45E-06	2,81E-06	0,00E+00	1,13E-06	8,38E-06	-7,98E-07
	Hourdis	4,82E-05	8,44E-06	0,00E+00	5,62E-06	6,23E-05	-2,35E-07
	Noyau	3,49E-05	6,70E-05	0,00E+00	1,12E-05	1,13E-04	-1,20E-05
	Radier	3,46E-05	8,05E-05	0,00E+00	8,51E-06	1,24E-04	-1,32E-05
	Fondations	3,89E-05	3,79E-05	0,00E+00	1,25E-05	8,93E-05	-6,51E-06
	TOT	1,69E-04	2,21E-04	0,00E+00	4,15E-05	4,32E-04	-3,71E-05

Des Tableaux 11 et 12, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, l'exostructure et les poutres en acier sont chacune responsable d'environ 30 % du POCP. Dans le cas 2, le noyau, le radier et les barrettes de fondation sont les éléments qui prédominent et sont responsable d'environ 1/3 du potentiel.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, les éléments métalliques sont prédominants dans la contribution totale de la structure sur le POCP. Dans le cas 2, le potentiel est réparti équitablement entre le noyau (21 %), le radier (20 %), les fondations (23 %) et les hourdis (28 %).

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1, les résultats montrent l'importante contribution des planchers collaborants sur le POCP (31 %). Dans le cas 2, les résultats montrent que le noyau et les fondations ont un impact important sur le POCP (respectivement 30 et 37 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, les éléments en acier contribuent à plus de 50 % du POCP durant l'étape de fin de vie. Dans le cas 2, le POCP est causé principalement par le noyau (27 %) et les fondations (30 %).

Pour le **module D**, dans le cas 1, on remarque l'effet très positif des éléments en acier, notamment les poutres (-51 %), sur le POCP au-delà des frontières du système. Dans le cas 2, les bénéfiques engendrés après la fin de vie de la structure sont principalement dus au noyau (-32 %) et au radier (-35 %).

7 Potentiel de dégradation abiotique des ressources pour les éléments

La Figure 5 montre que la structure du cas 1 a un ADP_éléments largement supérieur à celui de la structure du cas 2. Cette différence se montre essentiellement durant l'étape de production A1-A3. Les bénéfices liés à la réutilisation, récupération et le recyclage de l'étape D sont quant à eux fort similaires.

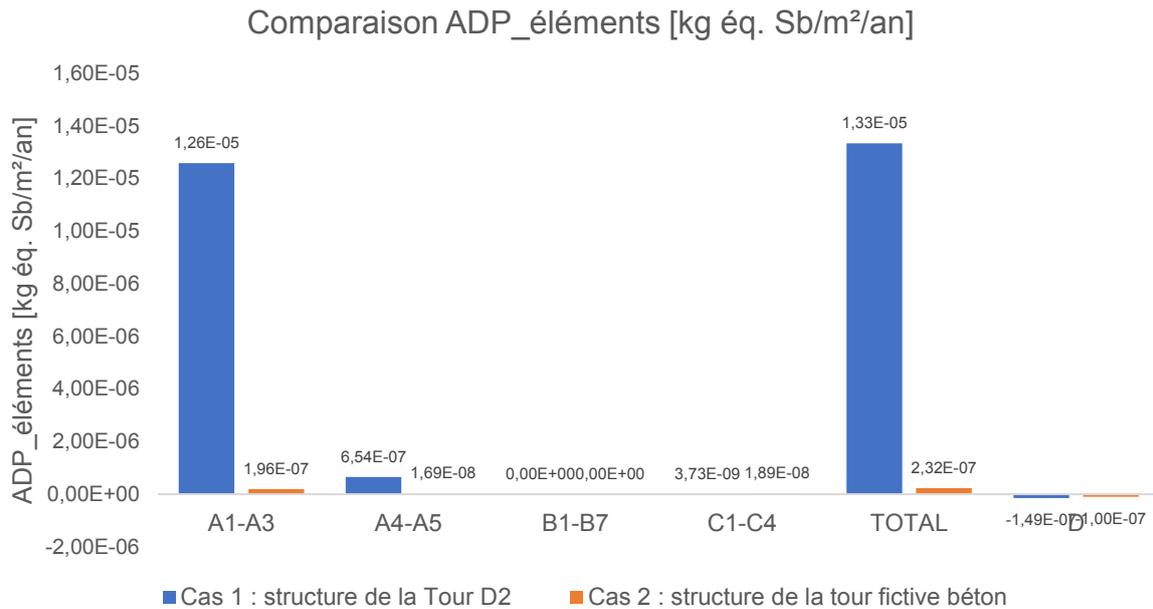


Figure 31 : Comparaison ADP_éléments

Tableau 13 : ADP_éléments - cas 1

		ADP_éléments – CAS 1					
		kg Sb-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	2,84E-08	2,31E-09	0,00E+00	3,57E-11	3,11E-08	-6,61E-09
	Colonnes (acier)	9,93E-10	8,08E-11	0,00E+00	1,25E-12	1,09E-09	-2,31E-10
	Colonnes (béton)	3,03E-09	4,86E-10	0,00E+00	6,55E-12	3,54E-09	-2,17E-09
Système de plancher	Poutres (acier)	3,45E-08	2,65E-09	0,00E+00	2,31E-11	3,79E-08	-2,03E-08
	Planchers collaborants	1,24E-05	6,34E-07	0,00E+00	3,35E-09	1,31E-05	-1,89E-08
	Plancher (béton)	1,63E-08	1,87E-09	0,00E+00	3,51E-11	1,83E-08	-1,14E-08
	Noyau	5,15E-08	5,39E-09	0,00E+00	1,11E-10	5,70E-08	-3,60E-08
	Radier	3,22E-08	5,11E-09	0,00E+00	7,20E-11	3,74E-08	-2,37E-08
	Fondations	4,36E-08	2,58E-09	0,00E+00	9,36E-11	4,63E-08	-3,00E-08
	TOT	1,26E-05	6,54E-07	0,00E+00	3,73E-09	1,33E-05	-1,49E-07

Tableau 14 : ADP_éléments - cas 2

		ADP_éléments – CAS 2					
		kg Sb-Eq/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	1,00E-08	1,61E-09	0,00E+00	2,17E-11	1,17E-08	-7,18E-09
	Poutres	4,59E-09	2,50E-10	0,00E+00	9,58E-12	4,85E-09	-3,22E-09
Système de plancher	Hourdis	5,58E-08	2,42E-09	0,00E+00	1,86E-08	7,68E-08	-1,54E-09
	Noyau	4,41E-08	4,61E-09	0,00E+00	9,48E-11	4,89E-08	-3,08E-08
	Radier	3,22E-08	5,11E-09	0,00E+00	7,20E-11	3,74E-08	-2,37E-08
	Fondations	4,92E-08	2,91E-09	0,00E+00	1,06E-10	5,22E-08	-3,38E-08
	TOT	1,96E-07	1,69E-08	0,00E+00	1,89E-08	2,32E-07	-1,00E-07

Des Figures 13 et 14, nous pouvons tirer les résultats ci-dessous.

Pour le **total de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, on remarque que le potentiel de dégradation abiotique est essentiellement causé par les planchers collaborants. Les autres éléments de la structure n'ont qu'un impact très faible. Dans le cas 2, une répartition des contributions beaucoup plus équilibrée que dans le cas 1 et les hourdis et les barrettes de fondations sont chacun responsables de 1/4 du potentiel, suivis de peu par le noyau et le radier.

Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, la quasi-totalité de l'ADP_éléments est due aux planchers collaborants. Dans le cas 2, plus de 50 % de l'ADP_éléments proviennent des hourdis et du noyau.

On remarque que les contributions des éléments au potentiel de dégradation abiotique sont les mêmes que celles obtenues pour le total de l'analyse de cycle de vie. Cela montre bien la prédominance de la phase de production A1-A3 sur l'ensemble de l'analyse de cycle de vie.

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1, tout comme dans le module précédent, ce sont quasi uniquement les planchers collaborants qui contribuent au ADP (éléments) (97 %). Dans le cas 2, par contre, les hourdis ont une part moins prépondérante que dans la phase de production A1-A3 par rapport aux autres éléments. À la mise en œuvre, les éléments qui contribuent le plus au ADP (éléments) sont le radier (30 %) et le noyau (27 %).

Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, la contribution des planchers collaborants est toujours prépondérante. Dans le cas 2, c'est la contribution des hourdis qui est prépondérante. En effet, la fin de vie des hourdis représente 98 % du potentiel total de la structure. Pour l'étape de fin de vie, les éléments constituant les planchers sont donc nettement les plus défavorables.

Pour le **module D**, dans le cas 1, les bénéfices liés au recyclage, la réutilisation et la récupération après la fin de vie de la structure sont équitablement répartis entre les différents éléments. Cependant, on peut voir que ce sont les éléments en béton qui apportent le plus de bénéfices (ensemble, -60 %). Dans le cas 2, les bénéfices liés au recyclage, la réutilisation et la récupération après la fin de vie de la structure sont importants essentiellement pour le noyau (-31 %), le radier (-24 %) et les fondations (-34 %) qui constituent la majeure partie de la structure

8 Potentiel de dégradations abiotiques des combustibles fossiles

Encore une fois, nous pouvons voir une nette différence, en défaveur de la structure du cas 1. Néanmoins, ses bénéfices au-delà des frontières du système sont supérieurs à ceux de la structure fictive en béton.

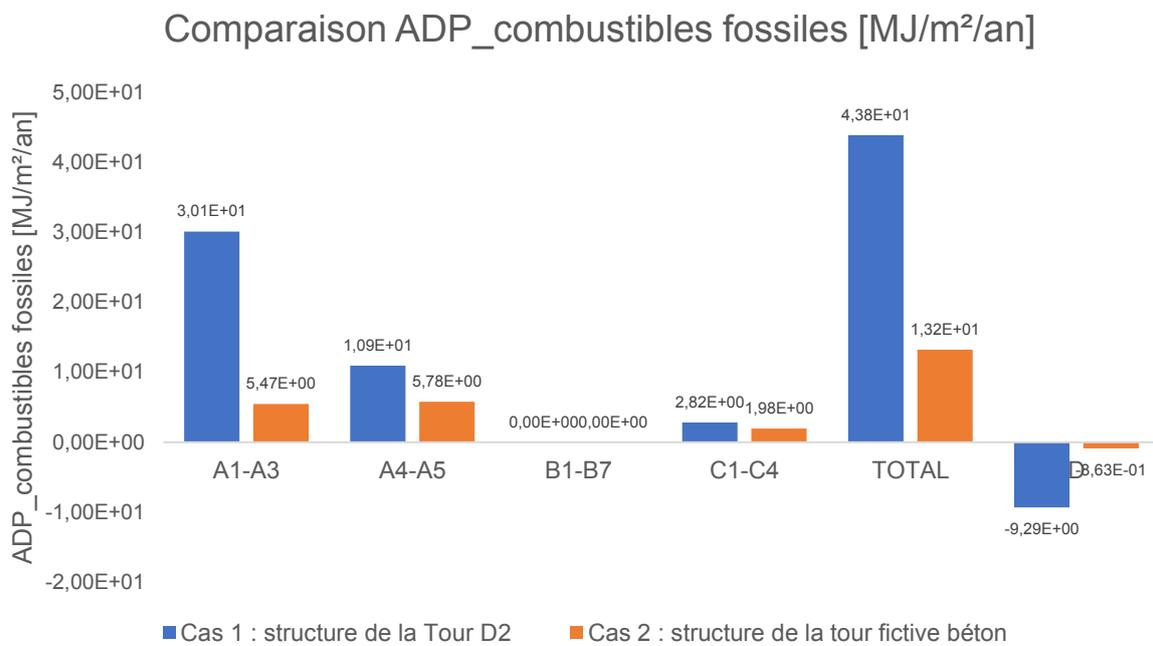


Figure 32 : Comparaison ADP_fossiles

Tableau 15 : ADP_fossiles - cas 1

		ADP_fossiles – CAS 2					
		MJ/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Exostructure	1,16E+01	1,35E+00	0,00E+00	3,63E-01	1,33E+01	-1,59E+00
	Colonnes (acier)	4,04E-01	4,71E-02	0,00E+00	1,27E-02	4,64E-01	-5,56E-02
	Colonnes (béton)	6,83E-02	1,78E-01	0,00E+00	3,29E-02	2,79E-01	-2,72E-02
Système de plancher	Poutres (acier)	1,10E+01	1,21E+00	0,00E+00	2,38E-01	1,24E+01	-4,72E+00
	Planchers collaborants	3,68E+00	3,02E+00	0,00E+00	6,05E-01	7,30E+00	-2,05E+00
	Plancher (béton)	3,54E-01	6,52E-01	0,00E+00	1,76E-01	1,18E+00	-1,01E-01
	Noyau	1,16E+00	1,83E+00	0,00E+00	5,56E-01	3,54E+00	-3,15E-01
	Radier	9,55E-01	1,90E+00	0,00E+00	3,62E-01	3,22E+00	-2,76E-01
	Fondations	9,45E-01	7,44E-01	0,00E+00	4,70E-01	2,16E+00	-1,57E-01
	TOT	3,01E+01	1,09E+01	0,00E+00	2,82E+00	4,38E+01	-9,29E+00

Tableau 16 : ADP_fossiles - cas 2

		ADP_fossiles					
		MJ/m ² /an					
		A1-A3	A4-A5	B1-B7	C1-C4	TOT	D
Éléments verticaux	Colonnes	2,26E-01	5,89E-01	0,00E+00	1,09E-01	9,25E-01	-9,02E-02
	Poutres	1,26E-01	6,24E-02	0,00E+00	4,76E-02	2,37E-01	-2,48E-02
Système de plancher	Hourdis	2,11E+00	8,21E-01	0,00E+00	4,53E-01	3,39E+00	-2,52E-02
	Noyau	9,90E-01	1,56E+00	0,00E+00	4,76E-01	3,03E+00	-2,70E-01
	Radier	9,55E-01	1,90E+00	0,00E+00	3,62E-01	3,22E+00	-2,76E-01
	Fondations	1,07E+00	8,39E-01	0,00E+00	5,30E-01	2,44E+00	-1,77E-01
	TOT	5,47E+00	5,78E+00	0,00E+00	1,98E+00	1,32E+01	-8,63E-01

Des Tableaux 15 et 16, nous pouvons tirer les résultats suivants

Pour la **totalité de l'analyse de cycle de vie**, dans le cas 1, l'exostructure et les poutres en acier sont la cause de presque 60 % du ADP. Dans le cas 2, le noyau (23 %) et le radier (26 %) sont les 2 éléments les plus impactant du ADP, suivis de peu par les barrettes de fondation et les hourdis.

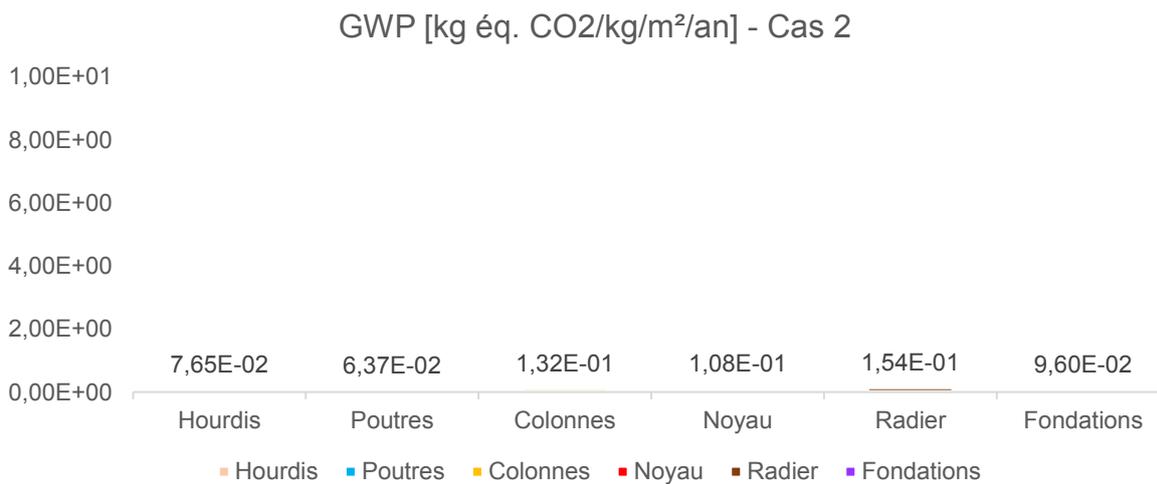
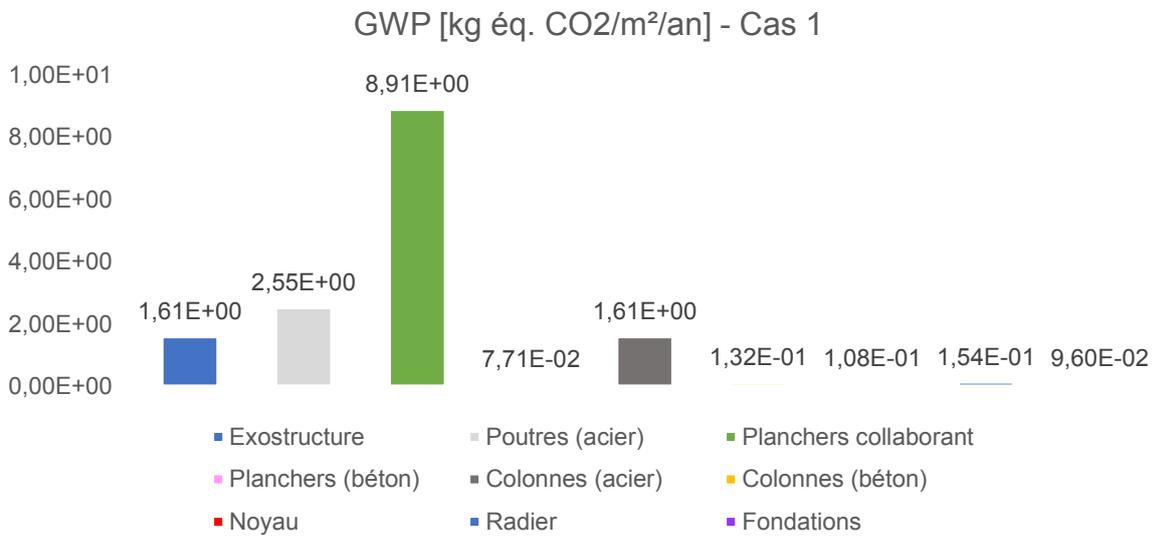
Pour le **module A1-A3**, dans le cas 1, la consommation d'énergie fossile nécessaire à la production de l'acier de l'exostructure et des poutres est prépondérante. En effet, leur production représente respectivement 39 % et 37 % de la contribution totale de la structure pour cette étape. Dans le cas 2, c'est la production des hourdis qui consomme le plus d'énergie fossile (39 %).

Pour le **module A4-A5**, dans le cas 1, on peut voir que l'énergie fossile nécessaire à la mise en œuvre des planchers collaborants est la plus importante et représente 1/4 de l'ADP (fossiles). Dans le cas 2, ce sont le radier et le noyau qui sont les plus gros consommateurs d'énergie pour la mise en œuvre (respectivement 33 % et 27 %).

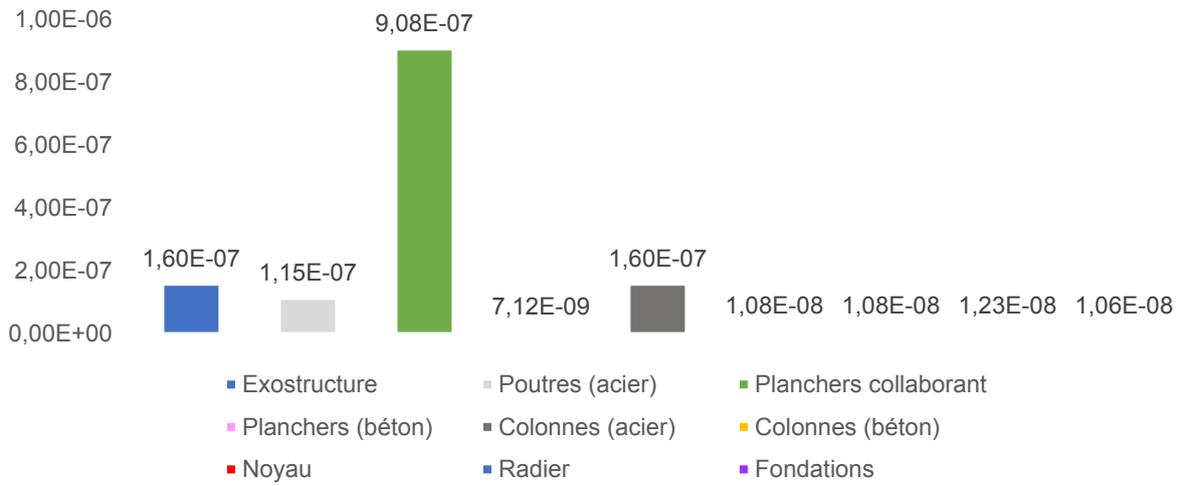
Pour le **module C1-C4**, dans le cas 1, on remarque une répartition équitable de la consommation d'énergie fossile entre les différents éléments lors de l'étape de fin de vie (mise à part les colonnes en béton ou en acier qui ont un impact minime). Néanmoins, les planchers collaborants et le noyau sont les éléments qui contribuent le plus à l'ADP (fossile) (respectivement 22 % et 20 %). Dans le cas 2, on remarque également une répartition équitable (mise à part les poutres et les colonnes qui ont un impact plus faible vu leur quantité au sein de la structure), mais les fondations et le noyau contribuent à l'ADP (fossile) légèrement plus que les autres éléments de la structure (respectivement 27 % et 24 %).

Pour le **module D**, dans le cas 1, la moitié des bénéfices effectués au-delà des frontières du système est due aux poutres en acier. Il est à noter que les poutres sont des éléments qui demandent beaucoup d'énergie lors de leur production, mais elles sont aussi celles qui effectuent le plus de bénéfices en dehors des limites du système. Dans le cas 2, les bénéfices effectués au-delà des frontières du système du cas 2 sont principalement dus au radier (-32 %) et au noyau (-31 %).

Annexe 5 : Impacts environnementaux par kg de matériaux

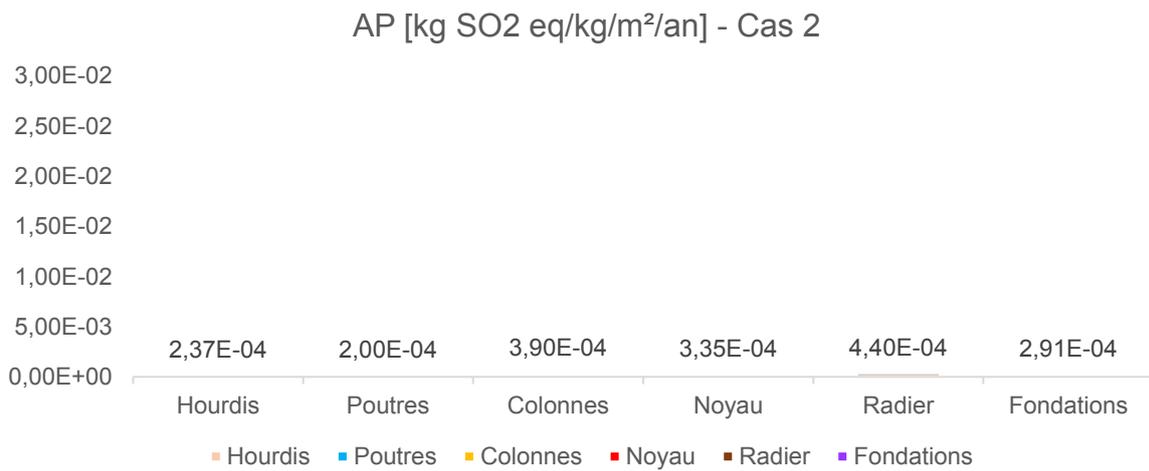
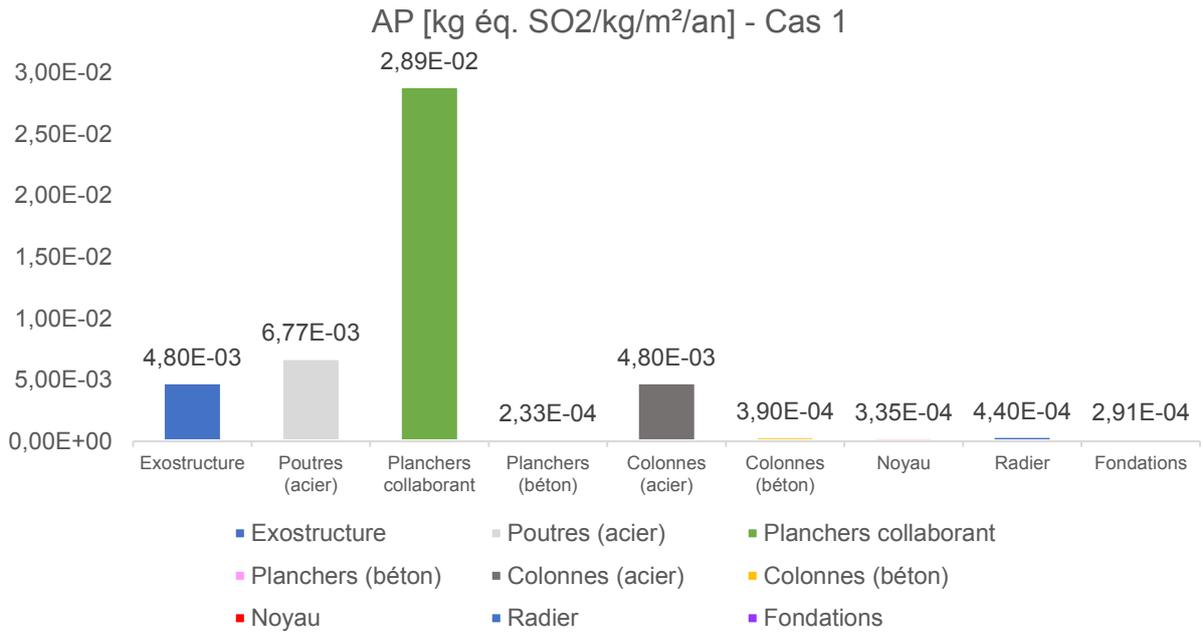


ODP [kg éq. CFC 11/kg/m²/an] - Cas 1

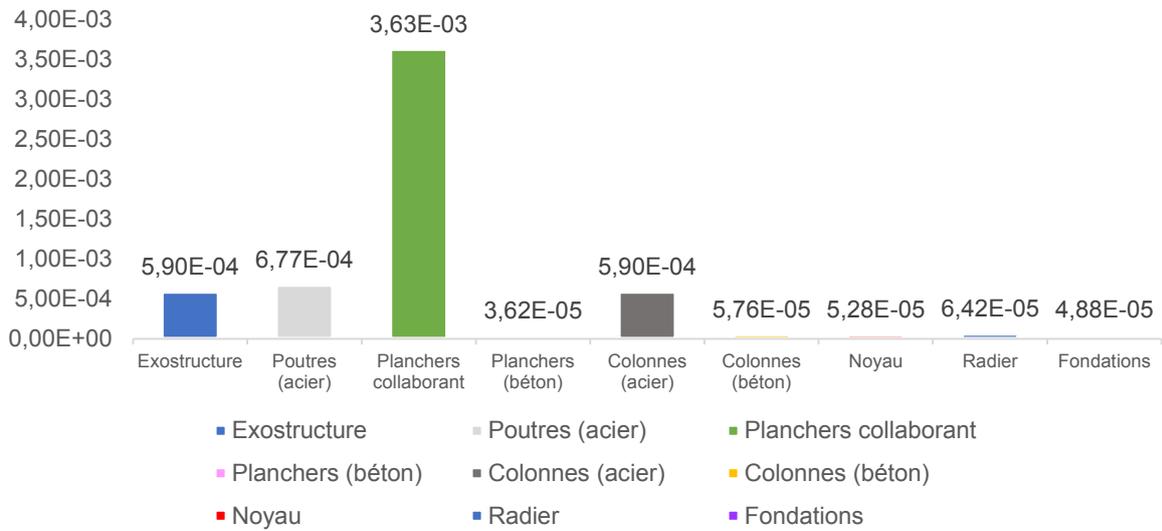


ODP [kg éq. CFC 11/kg/m²/an] - Cas 2





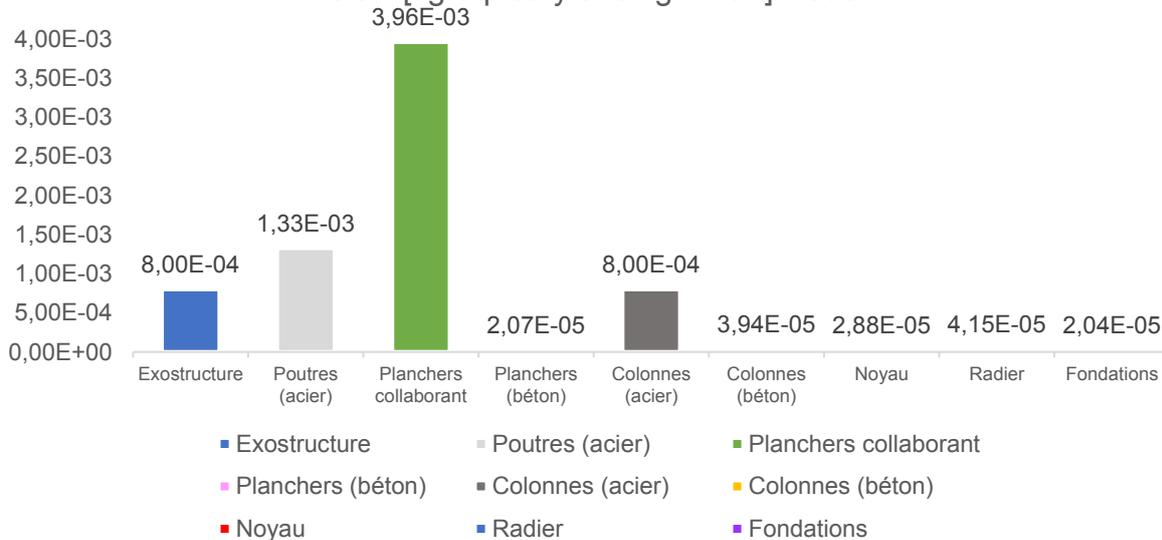
PE [kg éq. (PO4)3/kg/m²/an] - Cas 1



PE [kg éq. (PO4)3 eq/kg/m²/an] - Cas 2



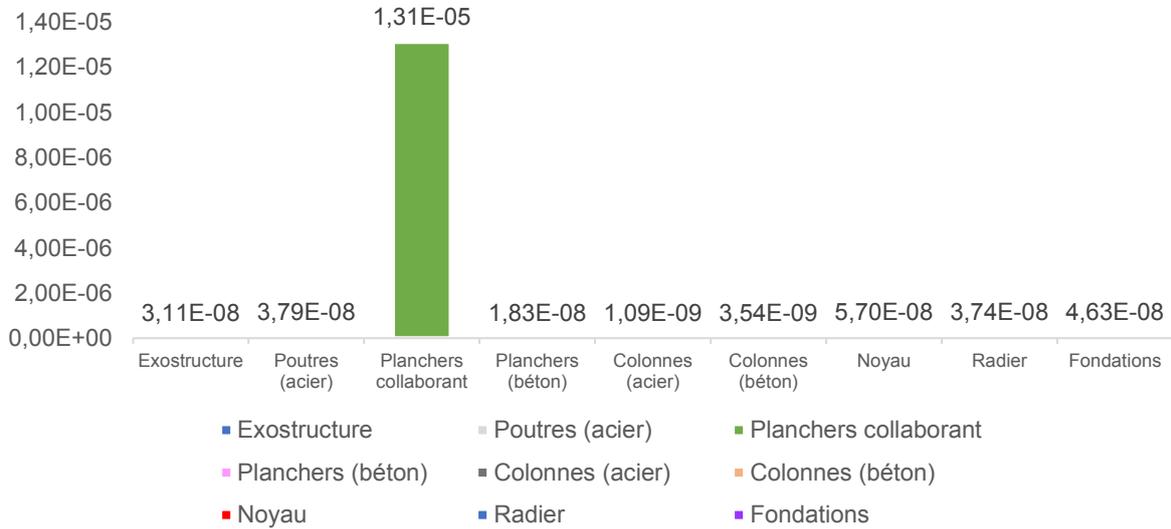
POCP [kg éq. éthylène/kg/m²/an] - Cas 1



POCP [kg éq. éthylène/kg/m²/an] - Cas 2



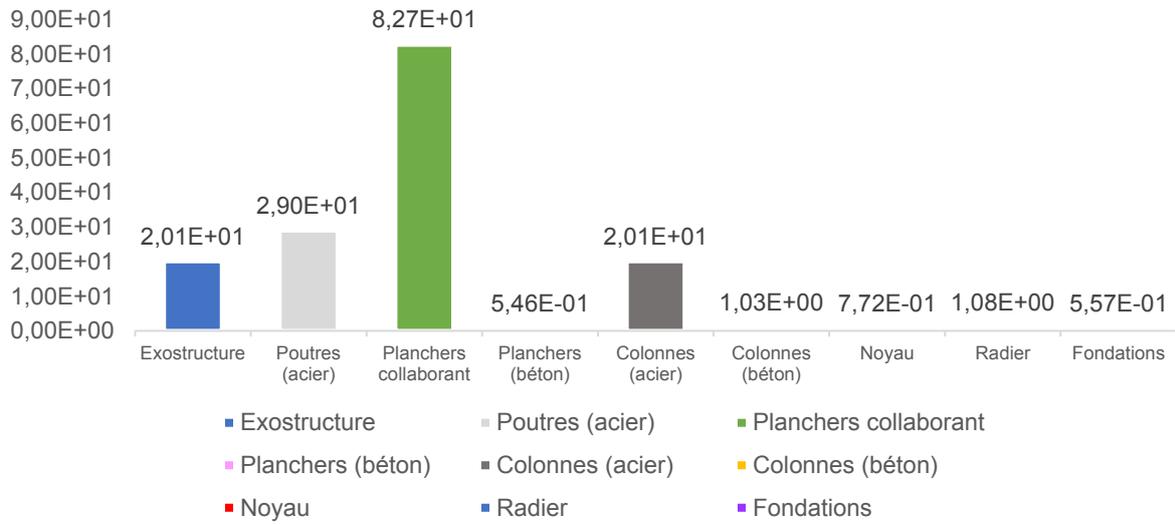
ADP_éléments [kg éq. Sb/kg/m²/an] - Cas 1



ADP_éléments [kg éq. Sb/kg/m²/an] - Cas 2



ADP_fossiles [MJ /kg/m²/an] - Cas 1



ADP_combustibles fossiles [MJ /kg/m²/an] - Cas 2

