

LE GARREC Lucie

Mémoire de Master

Janvier 2025

**LE CALCUL DE L'IMPACT ENVIRONNEMENTAL
COMME MOTEUR DE CHOIX DE STRUCTURE
EN PHASE CONCEPTION**

Le cas des portiques de grande portée

Domaine d'étude : Concevoir et Construire l'Architecture (CCA)

Séminaire : Savoirs des Activités de Projet Instrumentées (SAPI)

Enseignants encadrants : Anne Tüscher et Joaquim Silvestre

- Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Paris La Villette (ENSAPLV) -

Avant-propos

Particulièrement sensibilisée aux enjeux environnementaux en architecture à l'occasion de mon année d'échange de Master 1 à l'université NTNU de Trondheim en Norvège, j'ai souhaité faire de la thématique environnementale une des thématiques principales de mon mémoire.

Durant la première phase de recherches, je me suis renseignée sur l'état de prise en compte des problématiques environnementales dans le domaine de l'architecture et de la construction en Norvège et en France. A cette occasion, j'ai pu constater qu'un enjeu majeur apparaissait quant à la temporalité de ces études environnementales vis-à-vis de la temporalité globale du projet. Ainsi, les études d'Analyse du Cycle de Vie (ACV), réalisées dans un premier temps dans les dernières étapes du projet, ont peu à peu été avancées à des phases intervenant plus tôt dans le projet.

Néanmoins, il m'est apparu que ces études étaient principalement réalisées par des bureaux d'études, que ces études étaient très détaillées mais requéraient de fait un important niveau de détail dans la définition du projet et sa modélisation 3D. Enfin, les nombreux allers-retours entre architectes et bureaux d'études m'ont amené à m'interroger si cette séparation des intervenants permettait une prise en compte optimale des enjeux environnementaux dès la phase de conception.

Ainsi, je souhaitais étudier la façon dont les études environnementales interagissent avec la phase de conception du bâtiment.

En parallèle de cela, je travaillais sur un projet universitaire de réhabilitation d'un bâtiment. Les intentions de notre groupe d'ouverture du bâtiment m'ont amenée à m'interroger sur les modifications de structure dans le cadre d'une réhabilitation. Au-delà de s'assurer du respect des exigences structurelles du bâtiment, je m'interrogeais sur la façon dont un type de structure peut être choisi dans le cas où un ajout d'éléments structurels serait nécessaire. Je souhaitais également étudier la question de l'impact environnemental d'un ajout de structure dans le cas d'une réhabilitation, ainsi que l'arbitrage nécessaire entre des choix architecturaux qui nécessiteraient un ajout de structure et d'autres qui mettraient davantage l'accent sur la conservation de l'existant. Comment comparer ces deux interventions en termes d'impact environnemental ?

Ainsi, les thématiques qui ont émergé comme centrales à mon mémoire sont les performances environnementales, structurelles et le processus de conception.

Remerciements

Je tiens à remercier Anne Tüscher et Joaquim Silvestre pour leur suivi, leurs corrections et leurs conseils durant l'ensemble de ce travail, ainsi que François Guéna pour son suivi durant la première partie de ce travail.

Je tiens également à remercier les enseignants et intervenants de l'université NTNU qui m'ont fait découvrir les différentes thématiques que j'ai souhaité approfondir à travers ce mémoire.

Enfin, je souhaite remercier mes proches, pour leur soutien à distance depuis leur île lointaine.

Résumé

Dans un contexte où l'impact environnemental dans le domaine de la construction est pris en compte en étant soumis à des réglementations depuis 2020, je m'intéresse dans ce mémoire à sa prise en compte dès la phase de conception et en particulier concernant la structure. L'objectif de ce mémoire est de déterminer dans quelle mesure le choix de typologie et de matérialité de structure en phase conception a un impact sur les performances environnementales d'un bâtiment.

Afin d'étudier ce lien, je réalise une expérience de modélisation. Après un état des lieux des différentes typologies de structure de portiques qui existent, je les modélise sur Rhino et je les dimensionne grâce à l'outil de dimensionnement structurel Karamba. Puis je détermine les émissions de CO2 de chacune des typologies modélisées avec les logiciels Reduzer et Pleiades, et ce pour chacun des matériaux étudiés.

Puis je compare les résultats obtenus aux valeurs d'émissions d'un corpus de bâtiments de références afin de vérifier leur cohérence et j'analyse les résultats obtenus.

Mots-clés : Analyse du cycle de vie (ACV) – conception paramétrique – structure – matérialité – portique – grande portée – Rhino Grasshopper – Karamba – Pleiades – impact environnemental

Summary

The environmental impact of building constructions is nowadays taken more into consideration, in France especially since 2020. Therefore, the topic of this memoir is how this impact is taken into account from the early stage of the design and more specifically in relation to the structure. The goal of this memoir is to determine how the choice of the typology and the materiality of a structure in the early phase of the design impacts the environmental performances of a building.

I conducted an experiment of modelling in order to study this link. I first worked on an inventory of the different typologies of portico structures that exist. I then modelled them on Rhino and dimensioned them using the structural analysis tool Karamba. Finally, I determined the CO2 emissions of each typology modelled using the softwares Reduzer and Pleiades for each material studied.

Then, I compared the results of CO2 emissions calculated to the one of a defined corpus of buildings' references in order to verify the consistency of the results obtained and analysed them.

Key words : Life Cycle Analysis (LCA) – parametric design – structure – materiality – portico – wide structural span – Rhino Grasshopper – Karamba – Pleiades – environmental impact

Table des matières

Avant-propos	3
Remerciements	3
Résumé	4
Introduction	7
1. Etat de l'art et définition des notions	8
a. Environnement	8
i. Analyse du cycle de vie – Définition et concept, principes généraux	8
ii. La réglementation française de l'ACV	10
iii. Mise en pratique de l'ACV dans le cadre d'un projet : temporalité et études comparatives	12
b. Structure	13
i. Propriétés mécaniques et performances structurelles des matériaux	14
ii. Grande portée, grande hauteur et typologie de structure	15
iii. Lien avec les études environnementales	18
c. Processus de conception	20
i. Processus général hors démarche ACV	20
ii. Démarche ACV et questionnement de la collaboration entre acteurs	20
iii. Rôle et utilité des outils paramétriques	23
1. Définition et pertinence	23
2. Outils dans le cadre d'études environnementales et structurelles	24
iv. Exemples d'application de la conception paramétrique en lien avec les études environnementales	25
2. Motivation et affinage du sujet	26
3. Méthode de recherche	29
a. Problématique	29
b. Objectif	29
c. Hypothèses	29
d. Protocole	30
i. Définition des scénarios à modéliser	30
ii. Hypothèses simplificatrices et cadre d'étude	31
iii. Modélisation structurelle	31
1. Rhino et Karamba	32
2. Rhino inside Revit	33
iv. Modélisation environnementale	33
1. Reducer	34

2. Pleiades.....	34
v. Comparaison des modélisations	34
vi. Versions des différents logiciels utilisées	34
4. Expérience menée	36
a. Premiers essais d'expérience.....	36
b. Modélisation de charpentes aux géométries, portées et autres paramètres variés	37
i. Recherche de références de typologies à modéliser	37
ii. Première modélisation	39
c. Modélisation de l'ensemble des charpentes étudiées sur Grasshopper en fonction de paramètres	40
5. Résultats obtenus.....	44
a. Méthodologie d'analyse des résultats	44
b. Analyse des résultats	45
i. Avec le corpus de bâtiments présenté précédemment	45
ii. En élargissant le corpus à davantage de bâtiment pour combler le manque de données sur les bâtiments identifiés précédemment	47
iii. Corpus finalement constitué	53
iv. Résultats finaux	56
6. Discussion	62
a. Analyse des résultats du point de vue environnemental	62
b. Analyse des résultats du point de vue de la conception	63
c. Limites ou imprécisions de la modélisation	64
d. Perspectives d'évolution ou d'approfondissement	65
Conclusion.....	66
Bibliographie.....	67
Liste des figures.....	71

Introduction

Quand on s'intéresse l'aspect environnemental dans la conception architecturale, il y a certes tous les principes de conception bioclimatique, qui sont de plus en plus mis en avant. Mais du point de vue plus spécifique de la structure et de sa matérialité, le sujet environnemental semble parfois un peu subi. Le concepteur fait des choix, qui relèvent peut-être davantage de l'esthétique architecturale et d'autres critères, mais peut-être moins du critère environnemental, si ce n'est en privilégiant le bois. J'ai donc souhaité m'intéresser à la manière dont les performances environnementales d'un choix de structure pourraient être prises en compte, selon sa matérialité et ses performances structurelles, dès la phase d'esquisse du projet. L'idée était également de chercher à établir une corrélation entre matérialité, performances structurelles et environnementales, afin de questionner le choix de plus en plus courant de la structure bois.

En effet, en prenant en compte le fait que les ressources disponibles en bois sont limitées et que leur taux de renouvellement est conditionné à de nombreux facteurs, il apparaît nécessaire de ne pas basculer dans une conception tout bois, qui ferait reposer la construction sur un seul matériau principal, mais plutôt s'intéresser à une conception de projets aux matérialités diverses. Cette construction peut reposer sur une mixité des matériaux au sein d'un même projet ou entre différents projets. Le choix du matériau dépend ainsi davantage des performances attendues. Et c'est notamment cette corrélation entre performances souhaitées et matérialité que j'étudie dans ce mémoire.

L'idée est de chercher à créer un continuum numérique pour faciliter les allers-retours entre matérialité, performances structurelles associées et performances environnementales à optimiser. Ainsi, l'objectif est de pouvoir tester plusieurs versions de structure et de pouvoir réajuster le choix dès le début de la conception. Un autre aspect du processus de conception qu'il me tenait également à cœur d'étudier porte sur la recherche d'un outil ou d'un processus de travail qui peut être utilisé par un étudiant architecte ou un architecte lui-même, sans avoir à attendre le travail du bureau d'études, qui intervient dans un second temps et peut prendre du temps. L'idée est donc de chercher à éviter les allers-retours du travail entre l'architecte et le bureau d'études sur l'aspect environnemental, afin d'optimiser le temps de travail.

Il s'agira dans un premier temps de faire un état de l'art des travaux qui ont été menés sur la question environnementale dans le projet architectural, puis sur la question structurelle et enfin sur la thématique du processus de conception. Puis j'exposerai la démarche de recherche qui a guidé le travail de ce mémoire. Je détaillerai ensuite les principes de l'expérience menée, puis la mise en œuvre de cette expérience et les résultats auxquels elle a abouti. Enfin, une partie reviendra sur la discussion des résultats obtenus et des perspectives de poursuite du travail.

1. Etat de l'art et définition des notions

Les premières intentions de thématiques ont orienté les recherches préalables à la définition du sujet. Ainsi, j'ai identifié trois thématiques sur lesquelles concentrer mes recherches : l'aspect environnemental, l'aspect structurel et le processus de conception. Certains des documents étudiés concernent soit une des thématiques en particulier, soit la rencontre de plusieurs thématiques.

a. Environnement

La première thématique principale porte sur la question environnementale en architecture.

i. Analyse du cycle de vie – Définition et concept, principes généraux

Afin de situer le mémoire dans le contexte des études environnementales appliquées à l'architecture, je rappelle dans cette première partie les concepts fondamentaux associés à la conception durable.

Parmi les thématiques liées à l'éco-conception en architecture, le présent mémoire met à part les notions liées à la conception bioclimatique, pour se concentrer sur l'empreinte carbone. Ainsi, nous ne mentionnerons pas par la suite les concepts de prise en compte de l'orientation solaire, de la ventilation naturelle, etc.

La réalisation d'un bilan carbone du bâtiment a pour objectif de déterminer la quantité de CO2 émis pour la réalisation du bâtiment considéré. Ce bilan des émissions carbone, réalisé en général par un bureau d'études environnement, s'appuie sur le processus d'Analyse du Cycle de Vie (ACV). Ce processus consiste à étudier les émissions associées à chaque étape du cycle de vie de chacun des produits de construction utilisés dans le projet de bâtiment. Le cycle de vie d'un bâtiment ou de chacun de ses produits pris séparément se décompose en quatre phases qui sont : A – Construction, B – Utilisation, C – Fin de vie, D – Bénéfices au-delà des limites du système.

L'analyse du cycle de vie est un processus multi-étapes, multi-échelles et multi-critères, ce qui en fait un outil de mesure de performance environnementale très complet. Cette notion de multi-critères se traduit notamment par la mesure de l'impact d'un bâtiment sur l'environnement sous forme de 9 à 26 critères tels que le réchauffement climatique, l'eutrophisation de l'eau, l'acidification des sols ou l'épuisement des ressources par exemple.



Figure 1 : Schéma du principe de fonctionnement de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV)¹

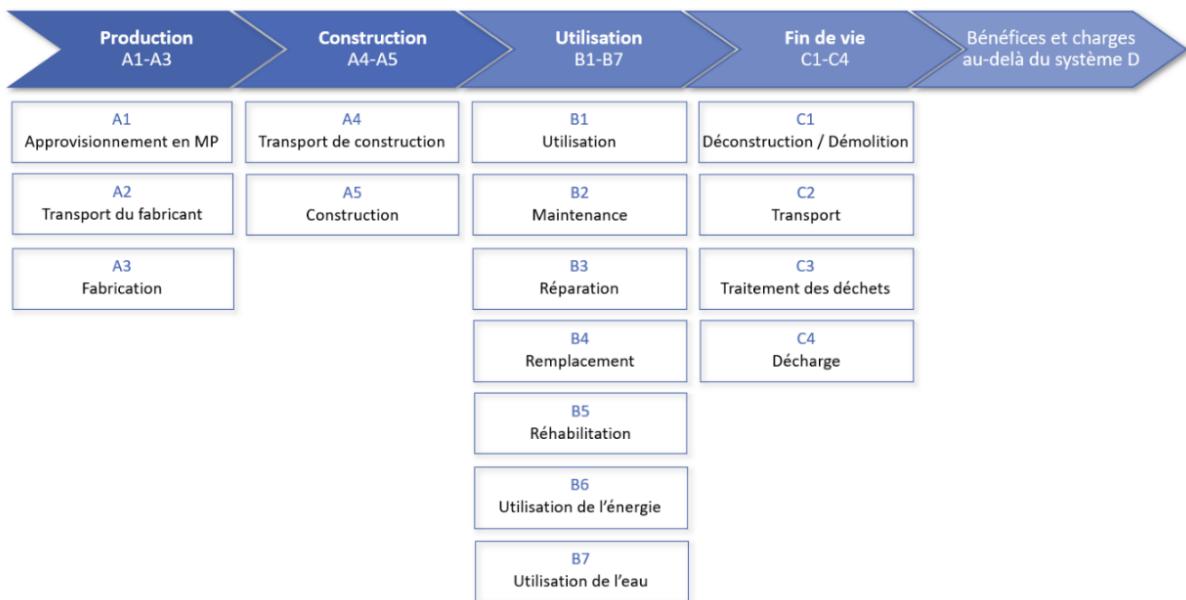


Figure 1 : Etapes du Cycle de Vie d'un bâtiment

Les valeurs d'émissions de CO2 à chaque phase sont mesurées pour chaque type de produit et répertoriées dans une Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire (FDES). Ces fiches,

¹ Une liste des figures est présente en annexe à la fin du mémoire. Les citations en langue étrangère sont librement traduites par moi, le texte original restant présent en note de bas de page.

établies par des organismes agréés, sont rassemblées dans la base de données INIES pour ce qui est des FDES françaises. Elles sont utilisées comme source de données pour les logiciels de calcul qui permettent de réaliser des ACV de bâtiments.

Lorsque l'on réalise l'ACV d'un bâtiment ou d'une structure dans son ensemble, les valeurs d'émissions de CO2 obtenues pour chaque élément dépendent d'une part de la quantité (en volume, surface, longueur, ou unités) mais également de la distance et de la nature du transport entre le site de production et le site du projet, de l'origine du produit, de la durée de vie du produit donc de sa nécessité de remplacement ou non au cours du temps d'utilisation du bâtiment, ainsi que de la composition exacte de l'élément s'il est constitué de différents sous-éléments. Ainsi, parmi les données importantes fournies par la FDES se trouvent l'unité fonctionnelle du produit, ainsi que les limites du système. L'unité fonctionnelle peut être de 1 m² ou 1m3 de produit par exemple. Les limites du système permettent de spécifier si certains éléments ont été exclus de l'analyse du cycle de vie, c'est-à-dire si leur impact sur la valeur globale des émissions de CO2 a été négligé ou non. Le détail des éléments pris en compte dans l'ACV dépend aussi de la réglementation en vigueur au moment de sa réalisation, ainsi que des certifications auxquelles on souhaite comparer les performances environnementales du projet.

L'analyse du cycle de vie est généralement réalisée par un bureau d'études environnement, qui utilise soit l'un des logiciels les plus répandus sur le marché, soit un logiciel développé en interne par le bureau d'études lui-même. Néanmoins, certains outils peuvent permettre la réalisation de cette analyse par l'architecte lui-même ou par l'étudiant architecte.

Les principaux logiciels disponibles sur le marché français et utilisés pour ces études sont Pleiades, qui fait partie du groupe IZUBA energies, et Vizcab. Ces logiciels ont en général plusieurs modes de fonctionnement possibles. L'une des manières de réaliser l'ACV d'un projet est d'importer manuellement les métrés, donc les quantités de chaque élément, puis de les associer à la FDES d'un produit. Une autre façon est d'exporter la maquette numérique du projet et d'importer le modèle BIM dans le logiciel d'ACV choisi.

Une partie du mémoire utilise par la suite un logiciel d'ACV étranger. Il convient donc de préciser que le fonctionnement est équivalent sur les points principaux, que les FDES ont un équivalent dans le monde anglophone avec les « Environmental Product Data (EPD) » qui sont répertoriés dans une base de données différente, intitulée EPD International.

ii. La réglementation française de l'ACV

La prise de conscience des enjeux environnementaux dans le secteur de la conception et de la construction a mené à l'établissement de réglementations. Ainsi, la réglementation énergétique et environnementale RE2020 est venue remplacer la réglementation technique RT2012 qui était en vigueur jusqu'alors. La transition d'une réglementation à l'autre s'est faite au moyen d'une expérimentation intermédiaire, débutée en 2016 et qui a mené à la création du label E+C- (« énergie positive, carbone réduit »). Ainsi, l'objectif était dès lors de considérer le bâtiment pour qu'il produise davantage d'énergie que ce dont il a besoin pour fonctionner, ainsi que de réduire son émission carbone par rapport aux usages de la construction à cette période.

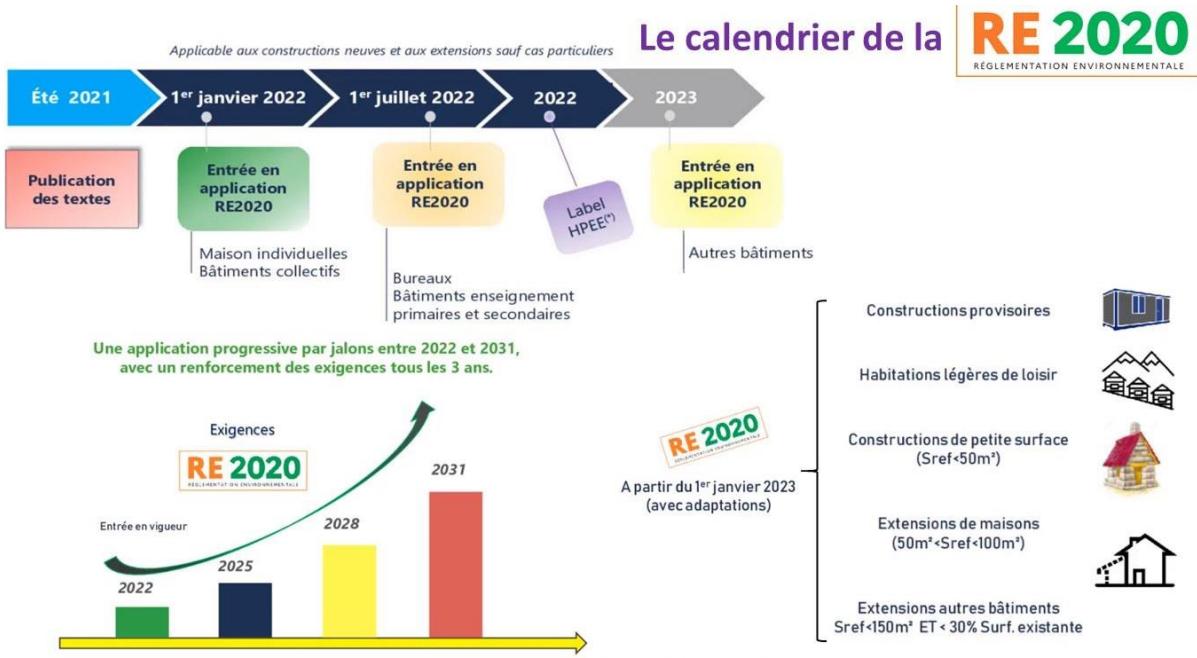


Figure 2 : Calendrier de mise en application de la RE2020

Il semble important de mentionner cette réglementation ici dans la mesure où elle a été publiée en 2020 et s'applique dès 2022, en imposant des seuils d'émission de CO₂ maximaux. Ainsi, tous les projets doivent désormais intégrer une étude environnementale à une étape du projet. Dans les premiers temps de la mise en place de cette réglementation, l'exigence de réalisation d'une étude environnementale laissait néanmoins le maître d'œuvre libre du choix du moment de cette étude. Elle pouvait donc être réalisée une fois le bâtiment construit, dès lors que cela avait lieu avant la livraison au maître d'ouvrage. Par la suite, avec la mise en place de seuils maximums d'émission de CO₂ à ne pas dépasser, la réalisation de cette étude a nécessairement été avancée puisqu'il faut que le maître d'œuvre puisse assurer que le bâtiment, une fois construit, respectera ces seuils maximums sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment. Ainsi, la mise en œuvre de la réglementation RE2020 a un impact sur la temporalité de réalisation des études ACV. Cette mention est particulièrement pertinente au regard du sujet de ce mémoire, qui interroge la temporalité de la réalisation des études ACV en lien avec la temporalité du projet.

L'importance de mentionner la RE2020 ici vient aussi du fait que, parmi les logiciels utilisés et explorés dans le cadre de ce mémoire, certains sont étrangers et n'intègrent donc pas l'ensemble des facteurs de calcul d'émission que la RE2020 exige dans les calculs d'ACV. Parmi ces pôles d'émission se trouvent notamment les émissions liées aux installations temporaires de chantier, à la consommation d'eau et d'énergie du chantier, et au traitement des déchets générés par le chantier.

Enfin, le fait que les logiciels étrangers ne prennent pas en compte certains paramètres exigés dans la réglementation française montre aussi que la France, et plus particulièrement les éditeurs de logiciels français sont plus en avance que d'autres sur ce sujet. En effet, dans nombre de pays européens/du monde, les études ACV sont optionnelles et donc laissées au choix des maîtres d'œuvre.

iii. Mise en pratique de l'ACV dans le cadre d'un projet : temporalité et études comparatives

Les définitions des notions d'ACV et le contexte désormais rappelés, je vais par la suite m'intéresser plus spécifiquement à la manière dont les études ACV sont réalisées pour un projet en particulier et les différents rôles joués par ces études selon l'étape du projet à laquelle elles sont réalisées.

Concernant la temporalité de réalisation des études ACV, et en particulier vis-à-vis de la temporalité globale du projet, on distingue plusieurs cas, selon que les études ACV sont réalisées :

- après achèvement du chantier
- en cours de réalisation du chantier
- dès la phase conception

Chacun de ces cas présente des avantages et des inconvénients. Ainsi, des études réalisées en fin de chantier permettent de disposer de l'ensemble des quantités de chaque matériau utilisé, ainsi que des références exactes des produits choisis. Et, dans la mesure où de plus en plus de produits possèdent une fiche FDES, qui permet de connaître de la manière la plus précise actuellement l'impact environnemental du produit étudié ; réaliser une étude ACV en fin de chantier permet donc qu'elle soit la plus complète et la plus précise possible.

Au contraire, une étude ACV réalisée plus tôt dans le processus de conception et réalisation du projet présente l'inconvénient d'être incomplète et approximative. En effet, à ce stade du projet, nombre de produits ne sont pas encore déterminé avec précision que ce soit en termes de quantité ou de choix de produit.

Koliann Mam souligne ainsi dans sa thèse (Mam, 2021) que « malgré l'intérêt de l'approche méthodologique [ACV] [...] de simplification [réalisée en phase conception], les analyses [...] conduites ne sauraient par essence se substituer à la richesse d'information que l'on tirerait d'une ACV complète de la structure » (Mam, 2021).

Concernant la méthodologie de mise en place de l'ACV, les caractéristiques pouvant être comparées pour déterminer le choix optimal de chacun des produits dans le cadre de la réduction de l'impact environnemental sont :

- la matérialité
- le mode constructif
- le mode opératoire
- le choix du produit spécifique, qui implique un lieu de production défini donc une distance de transport et des dimensions qui lui sont propres

Ainsi, l'impact de la matérialité est notamment étudié par Elise Bourcy dans son travail de fin d'études intitulé « Analyse du cycle de vie » (Bourcy, 2011). Elle réalise une comparaison de l'ACV d'un bâtiment en étudiant les émissions de murs extérieurs aux matérialités différentes. Le travail porte principalement sur la comparaison de la matérialité des enveloppes quand le système structurel reste invarié. La comparaison entre deux types de systèmes structurels est brièvement

évoquée avec une modélisation d'une structure mixte acier/béton pour comparer à la structure en acier.

En ce qui concerne la distance de transport, la thèse de Koliann Mam, qui porte sur l'«Exploration structurelle et environnementale des ouvrages en bois de grande portée » (Mam, 2021), étudie plusieurs scénarios. Il s'intéresse aux distances de transport engendrées par le déplacement de la matière première d'un ouvrier spécialiste à un autre jusqu'à l'installation du produit sur le chantier. En se plaçant dans le cas d'une structure bois, il met en évidence la diversité des corps de métier qui interviennent avant d'aboutir au produit fini : charpentier, scierie, serrurerie et sidérurgie seront notamment nécessaire pour la transformation du bois et de l'acier bruts en éléments de structure et assemblages. Les scénarios étudiés considèrent également d'une part un approvisionnement européen du matériau brut pour une transformation réalisée dans différentes régions de France et site de projet parisien, et d'autre part une chaîne d'intervenants plus locale.

Finalement, dans le cas d'étude de sa thèse, Koliann Mam souligne que l'impact de la distance de transport définie sur le résultat de l'ACV du bâtiment étudié apparaît comme très faible voire négligeable sur certains indicateurs. Cette succession d'intervenants par lesquels la matière du projet passe varie selon le type de structure du projet, la matérialité et les transformations et usinages nécessaires ou non. Ainsi la distance de transport et son impact sur le résultat de l'ACV du bâtiment varie et pourrait être plus significative dans d'autres cas d'études. Elle doit donc être considérée.

Enfin, si la pertinence de réaliser des études ACV tout au long du développement du projet et notamment dès la phase conception a été démontrée, il est également nécessaire de s'interroger sur la manière de réaliser ces études et plus particulièrement l'adaptation des outils et méthodes à chacune des phases de travail du projet.

Dans sa thèse, Koliann Mam (Mam, 2021) indique la possibilité de limiter l'étude ACV en phase conception à la comparaison de trois indicateurs environnementaux dans le cas d'une structure bois après analyse de la contribution de l'ensemble des indicateurs possibles. Il s'agit des indicateurs de changement climatique court terme, de toxicité humaine cancérogène et de formation de particules fines.

Au-delà de l'aspect de la performance environnementale, ce mémoire traite également de la question structurelle et par la suite de la recherche d'optimisation conjointe de ces deux domaines.

b. Structure

La seconde thématique de ce mémoire est l'aspect structurel, et plus particulièrement le lien entre un matériau et les performances structurelles associées.

i. Propriétés mécaniques et performances structurelles des matériaux

Les matériaux ont, du fait de leurs caractéristiques physiques, des propriétés mécaniques, physiques et chimiques qui leur sont propres. Dans le cadre de l'étude de leurs performances structurelles, on s'intéresse principalement aux propriétés mécaniques des matériaux.

Les propriétés mécaniques caractérisent la capacité d'un matériau à se déformer ou à résister à une déformation. Les principales propriétés mécaniques d'un matériau sont la résistance à la compression, à la traction ou à la flexion, la ductilité, l'élasticité et l'allongement notamment. (Trachte, 2012) Ainsi, la résistance en élasticité est par exemple caractérisée par le paramètre physique du module d'Young, usuellement noté E et également appelé module d'élasticité. Ce paramètre d'élasticité a notamment été étudié par Michael Ashby pour établir un diagramme de la relation entre élasticité et densité d'un ensemble de matériaux, qui se trouve en figure suivante.

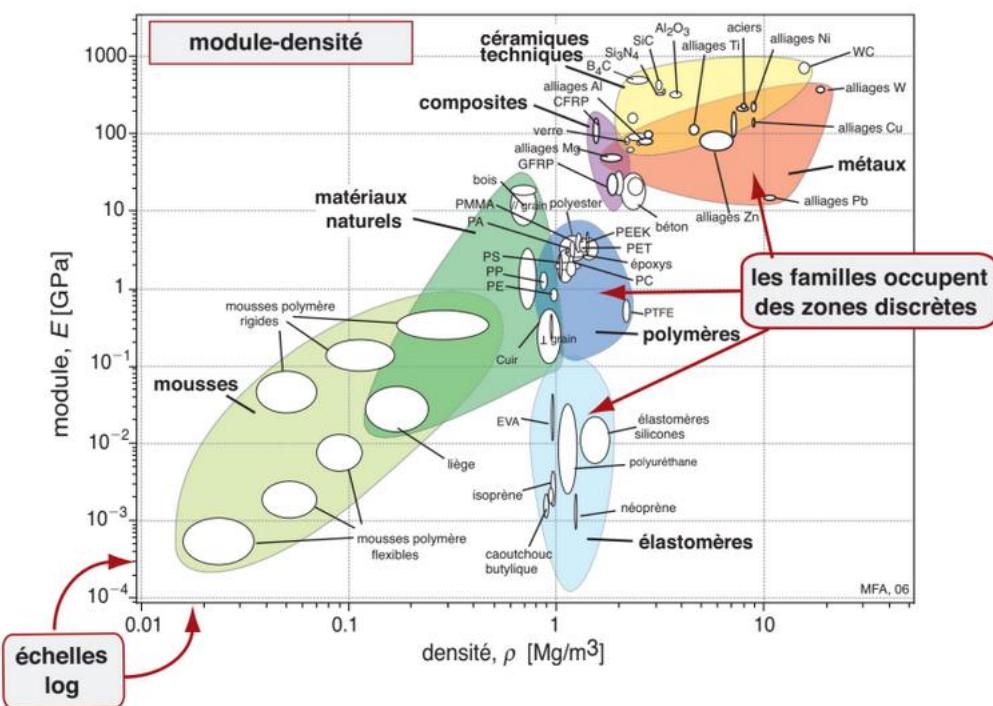


Figure 4 : « Familles de matériaux selon leur module d'élasticité et leur densité » d'après Michael Ashby (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2013)

Ainsi, le travail de Michael Ashby porte sur les critères de sélection d'un matériau selon la destination de l'objet produit. Ce diagramme classe les résistances élastiques d'un ensemble de matériaux et ne se limite pas à ceux utilisés pour la fonction de structure d'un bâtiment. Néanmoins, dans le cadre de ce mémoire, les matériaux qui seront considérés par la suite sont les matériaux usuellement utilisés pour assurer la fonction de structure d'un bâtiment, c'est-à-dire le bois (Viguier, 2015), le béton (Kind-Barkauskas, Kauhsen, Polonyi, & Brandt, 2006) (Xing, 2011) (Guillon, 2007) (Goufi, Idir, Kerdal, Abidelah, & Kaid), l'acier (Franz, 2023) et l'aluminium principalement. D'autres matériaux alternatifs biosourcés émergent ou réémergent et sont de plus en plus utilisés tels que les blocs de terre comprimée (Ouedraogo, Coulibaly, Ouedraogo, & Messan, 2015) ou le pisé (Bui, 2008) pour les matériaux structurels ou encore le béton de chanvre (Benhaled, Ouldboukhitine, & Amziane, 2019) (Younes & Youssef, 2017) et autres fibres végétales pour des matériaux non structurels et pourraient également être étudiés.

Les éléments structurels usuellement à prendre en compte dans le cadre de la conception d'un ouvrage de grande portée poteau-poutre :

- Poteaux
- Poutres principales ou fermes selon le type de portique considéré (treillis, double pente, etc.)
- Contreventements
- Fondations

ii. Grande portée, grande hauteur et typologie de structure

Au-delà des propriétés mécaniques de chacun des matériaux, certaines études ont été menées concernant les typologies de structures et les portées usuellement associées. Le tableau de la figure XX résume ce lien entre portée et typologie de structure en considérant les matériaux dans leur ensemble sans distinction spécifique. (Schueller, 2008)

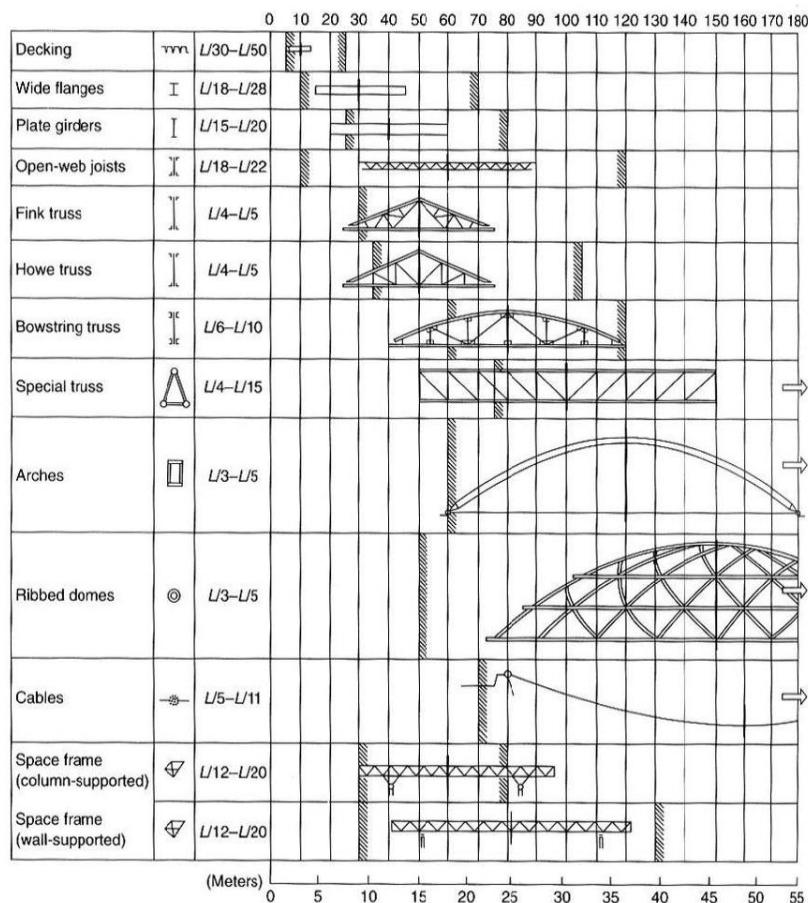


Figure 5 : Typologies de structures en fonction de la portée, d'après Wolfgang Schueller

Par ailleurs, une étude plus spécifique a été menée dans le cas du matériau bois lamellé collé. Les résultats, présentés en figure XX, proviennent du Manuel du Bois Lamellé, adaptation française du Glulam HandBook. (Glulam HandBook France, 2018)

Représentation schématique du système	Nom	Pente appropriée	Portée appropriée [m]	Hauteur [m]	Représentation schématique du système	Nom	Pente appropriée	Portée appropriée [m]	Hauteur [m]
	Poutre droite sur 2 appuis	$\geq 3^\circ$	< 24	$h \sim \frac{l}{14}$		Ferme à trois articulations avec ou sans tirant	$\geq 14^\circ$	15 - 30 °	$h \sim \frac{l}{28}$
	Poutre sous tendue droite sur 2 appuis	$3 - 30^\circ$	< 50	$h \sim \frac{l}{33}$ $H \sim \frac{l}{12}$		Ferme à trois articulations avec tirants et poutres sous tendues	$\geq 14^\circ$	25 - 80 °	$h \sim \frac{l}{45}$
	Poutre à double décroissance, poutre à simple décroissance	$1,4 - 6^\circ$	10 - 25 °	$h \sim \frac{l}{20}$ $H \sim \frac{l}{14}$		Arc à trois (ou deux) articulations avec ou sans tirant	$\frac{f}{l} \geq 0,14$	20 - 100 °	$h \sim \frac{l}{50}$
	Poutre « banane » à double décroissance symétrique	$3 - 15^\circ$	10 - 20 °	$h \sim \frac{l}{30}$ $H \sim \frac{l}{16}$		Portique à trois articulations et reins assemblés par entures multiples	$\geq 14^\circ$	15 - 25 °	$h \sim \frac{s_1 + s_2}{13}$
	Poutre continue droite sur plusieurs appuis	$\geq 3^\circ$	< 25	$h \sim \frac{l}{14}$		*portique avec jambe de force	$\geq 14^\circ$	10 - 50 °	$h \sim \frac{l}{30}$
	*Poutre continue à goussets sur plusieurs appuis	$\geq 3^\circ$	< 25	$h \sim \frac{l}{18}$ $H \sim \frac{l}{14}$		Portique à trois articulations et reins courbes	$\geq 14^\circ$	15 - 50 °	$h \sim \frac{s_1 + s_2}{15}$
	Poutre en porte-à-faux sur deux appuis	$\geq 10^\circ$	< 12	$h \sim \frac{l}{7}$		*Demi-portique étayé	$\geq 20^\circ$	10 - 25 °	$h \sim \frac{l}{25}$
	Poutre à treillis droite sur deux appuis	$\geq 3^\circ$	25-85	$h \sim \frac{l}{12}$		*Coque en forme de paraboloïde hyperbolique	$\frac{f_1 + f_2}{l_1 + l_2} \geq 0,2$	$l_1 \sim l_2$ 15 - 60 °	$h \sim b \sim \frac{l}{70}$ (poutres de bordure)
	*Grille orthogonale	$\geq 3^\circ$	12-25	$h \sim \frac{l}{20}$ ($a = 2,4 - 7,2$ m)					

Figure 6 : Types de systèmes structurels en fonction de la portée et en bois lamellé collé, d'après le Manuel du Bois Lamellé (Glulam HandBook France, 2018)

En plus du lien entre typologie de structure et portée associée, le cas des structures de grande hauteur a également été étudié. Ces études se concentrent généralement sur la comparaison de différentes structures réalisées à partir d'un même matériau principal. Ainsi, Koliann Mam (Mam, 2021) étudie d'une part le cas des immeubles de grande hauteur (IGH) en matériau bois. Il s'intéresse au lien entre nombre d'étages donc hauteur totale du bâtiment, typologie matériau et résistance aux charges notamment climatique.

Sa recherche met en évidence l'impact limitant des réglementations incendie notamment sur le développement du bâtiment bois de grande hauteur (BBGH). Il s'appuie également sur des recherches qui relèvent l'importance de la prise en compte des assemblages dans le dimensionnement structurel des BGGH. L'objectif principal reste l'optimisation des structures de grande hauteur en bois.

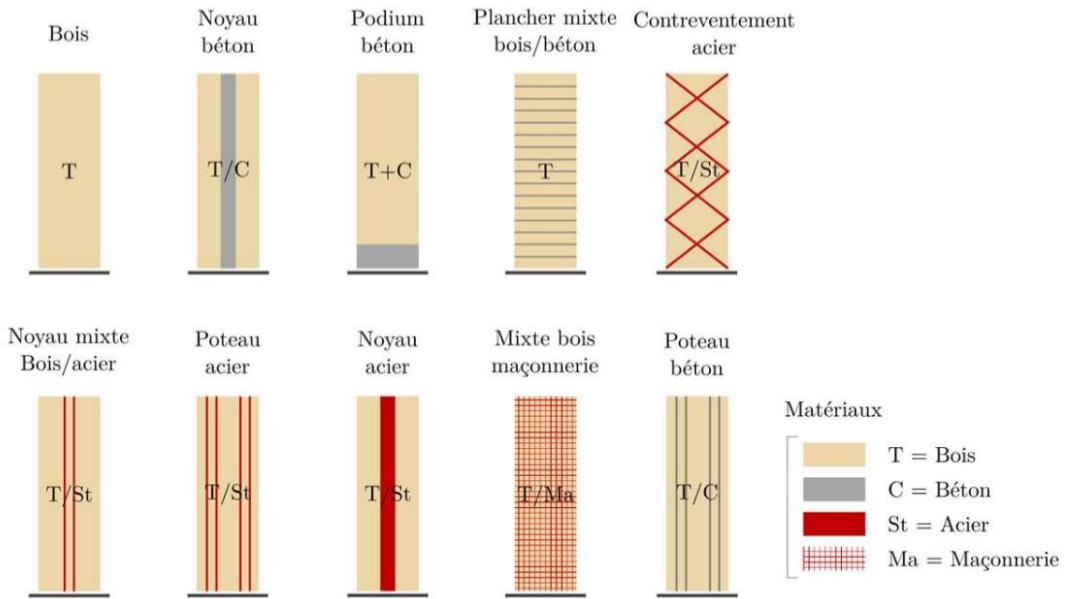


Figure 7 : « Exemple de représentation de la typologie structurelle et matériaudique des immeubles bois – notations et représentation » d'après Koliann Mam (Mam, 2021)

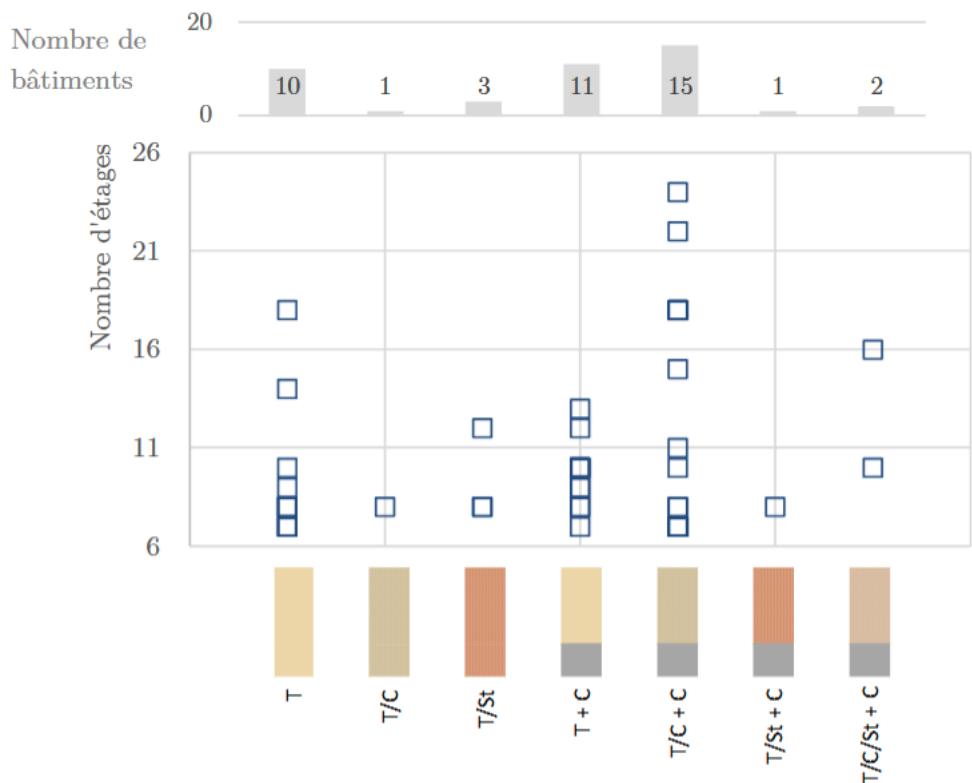


Figure 8 : « Illustration de la typologie matériaudique de 43 bâtiments bois (Etude réalisée en 2018 de 43 bâtiments de moyenne et grande hauteur en bois) » d'après Koliann Mam (Mam, 2021)

Le béton armé est un autre matériau étudié. Bruno Peuportier et al. (Peuportier, Wurtz, & Schalbart, 2022) comparent ainsi le cas de deux structures en béton armé, afin de déterminer si c'est une tour de 30 étages ou trois bâtiments de 10 étages qui, à surface totale équivalente, consomment le moins de matériau. Cette interrogation vient du fait que l'infrastructure et les fondations nécessaires à assurer la stabilité d'une structure de grande hauteur sont plus importantes que pour des bâtiments de hauteur plus faible. Néanmoins, la démarche de travail a consisté à partir d'études de cas de bâtiment construit et dont les quantités de matériaux utilisés pour la construction des différentes parties du bâtiment sont connues. Une estimation est ainsi faite à partir de ces données pour déterminer les quantités de matériaux nécessaires dans les cas modélisés, qui se rapprochent le plus possibles des cas d'étude réels. La démarche ainsi simplifiée ne pourrait donc pas être reproduite pour des cas de bâtiments à modéliser qui n'auraient pas d'équivalent déjà construit.

iii. Lien avec les études environnementales

Au-delà des études structurelles propres à un matériau ou à une portée, les études qui comparent différentes structures vis-à-vis de leur impact environnemental sont de plus en plus nombreuses.

La première observation qui en résulte est que plus la quantité de matériau nécessaire pour assurer la stabilité d'une structure monomatériaux est élevée, plus les émissions de CO₂ de la structure sont élevées. C'est ce qu'étudie notamment Koliann Mam dans sa thèse sur l'« Exploration structurelle et environnementale des ouvrages en bois de grande portée ». (Mam, 2021) Il s'intéresse tant au cas général de la structure bois qu'au détail du contreventement de l'exosquelette en bois d'un bâtiment de grande hauteur en bois, en s'appuyant sur des recherches d'optimisation de la morphologie du contreventement.

La seconde observation concerne l'analyse de structures multimatériaux et leur comparaison pour une recherche d'optimisation structurelle et environnementale ou de structures monomatériaux selon différents procédés de mise en œuvre.

C'est notamment ce qu'étudie Endrit Hoxha (Hoxha, 2015) en comparant deux modes constructifs d'un même matériau : des voiles porteurs et une structure poteaux-poutres en béton armé. Son étude porte sur une diversité de portées de moins de 10 mètres puisque le cadre de travail est la comparaison entre la structure du logement collectif et individuel.

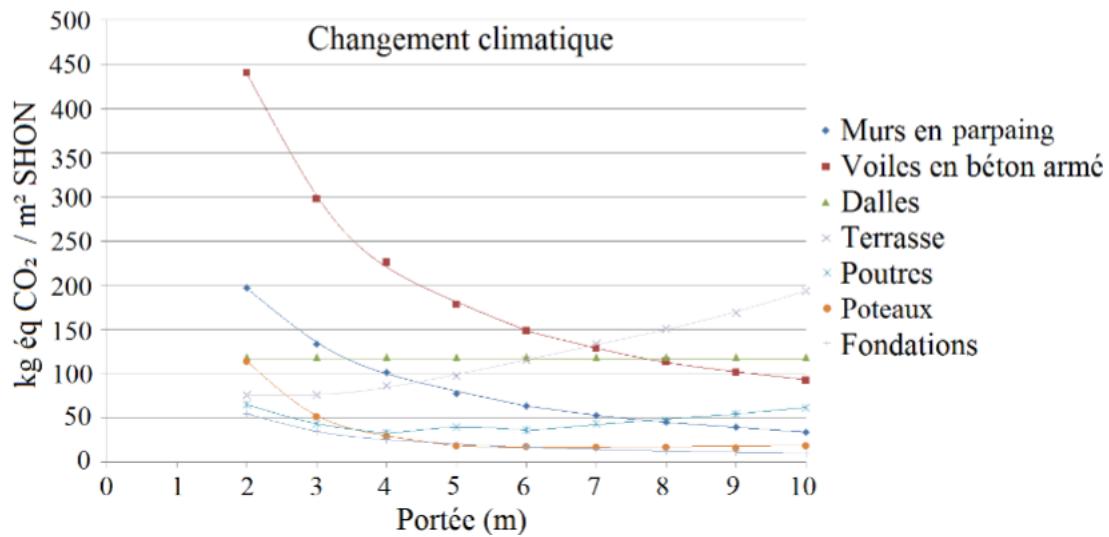


Figure 9 : « *Evaluation des impacts des éléments d'une construction en fonction de la portée* » d'après Endrit Hoxha

C'est également ce qu'étudie Koliann Mam en s'intéressant aux différents assemblages bois/bois et bois/métal. (Mam, 2021) Sa recherche s'intéresse plus particulièrement au coût environnemental et économique des procédés d'usinage que nécessite la réalisation des assemblages. Elle distingue ainsi les assemblages bois-bois et bois-métal, en soulignant que, dans le premier cas, les assemblages « présentent l'avantage de limiter la quantité d'acier dans la structure [mais] ils nécessitent des opérations et un temps d'usinage bien plus complexes, qui pourraient in fine représenter un impact financier et environnemental non négligeable pour l'ouvrage et entraîner des phénomènes de transferts d'impacts par rapport aux assemblages métalliques ». Au contraire, dans le second cas, les assemblages ont recours aux connecteurs métalliques. Or, l'acier a un impact environnemental et financier au kilogramme plus élevé que le bois. L'objectif de l'étude est donc de comparer, au regard des besoins structurels des assemblages, le type d'assemblage le moins coûteux. Ainsi, cette étude cherche à déterminer une stratégie d'optimisation en comparant notamment une structure de référence sans assemblage avec différentes structures en cherchant à minimiser le nombre d'assemblages.

c. Processus de conception

La dernière thématique autour de laquelle j'ai mené mes recherches est celle du processus de conception.

i. *Processus général hors démarche ACV*

Un projet architectural se décompose en plusieurs étapes, depuis les études de faisabilité jusqu'à la construction et l'utilisation, en passant par la conception. Ainsi, après les études préalables, la faisabilité et la programmation, la phase de conception est marquée par :

- Une phase d'esquisse (ESQ)
- Un avant-projet sommaire (APS)
- Un avant-projet définitif ou détaillé (APD)
- Un dossier de permis de construire (PC)
- Des études de projet (PRO) et des études d'exécution (EXE) avec un dossier de consultation des entreprises (DCE)

Puis suivent les phases de construction. (CAUE92)

Durant ces premières phases du projet, les intervenants sur le projet sont aussi divers que la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre, et comprennent donc l'architecte et l'ensemble des bureaux d'études nécessaires selon les spécificités du projet.

ii. *Démarche ACV et questionnement de la collaboration entre acteurs*

Depuis l'avènement des études environnementales comme partie intégrante du projet, et d'autant plus avec le calendrier d'application de la RE2020 qui rend ces études obligatoires, le bureau d'études environnementales est devenu un acteur nécessaire à la démarche de projet.

Cependant, il n'y pas d'obligation quant à la temporalité d'intervention de ces études environnementales vis-à-vis de la temporalité globale du projet.

Néanmoins, dans le but d'atteindre des objectifs environnementaux de plus en plus ambitieux, il apparaît primordial d'intégrer ces études de plus en plus tôt dans le processus de conception du projet. Et cette intégration au processus de conception apparaît nécessiter une nouvelle forme de collaboration entre acteurs du projet. C'est notamment un des enjeux soulevés par le principe de l'écoconception selon Maud Rio, Tatiana Reyes et Lionel Roucoules dans leur article de recherche intitulé « Vers des processus d'éco-conception proactifs via la modélisation des connaissances d'interface entre les acteurs de la conception ». (Rio, Reyes, & Roucoules, 2012)

Cet article, publié en 2012, traite de l'écoconception dans sa globalité et n'est pas spécifique à l'Analyse du cycle de vie, qui n'en est qu'un des outils. Il réfère à cette notion d'écoconception par deux termes : « a Design To Environment Approach » et « EcoDesign » ; et définit cette notion

comme « « pouvant être interprété comme une conception avec une relation plus intelligente à la nature », ce qui en augmente considérablement la complexité »².

Néanmoins, il mentionne comment l'Analyse du Cycle de Vie sert d'indicateur et même de révélateur de l'impact environnemental d'une conception, au point où l'article « présume qu'aider les concepteurs et analystes du cycle de vie à collaborer (en améliorant l'usage des méthodes et outils qu'ils estiment appropriés à leurs tâches) augmente leur motivation à adopter des pratiques d'écoconception »³.

L'article insiste sur cette nécessité de proactivité dans la recherche de l'écoconception. Et, pour ses auteurs, cela passe notamment par la collaboration entre acteurs du projet : « la collaboration est un défi important pour pratiquer l'écoconception de façon proactive »⁴. Ainsi, la notion de collaboration est étudiée, avec notamment la recherche de détermination d'une méthode pour favoriser cette collaboration. Cette nécessité de collaborer entre experts de divers domaines se révèle d'autant plus importante que l'écoconception requiert des connaissances approfondies sur divers sujets environnementaux, qui ne font pas forcément partie du champ connu des concepteurs, dont les connaissances portent davantage sur les enjeux plus communs de la conception. « La collaboration est une condition sine-qua-non pour créer de la valeur dans les organismes. C'est particulièrement le cas dans une approche d'écoconception, où la complexité du processus est accrue par la nécessité d'explorer des domaines tels que la biologie ou la climatologie pour confirmer les impacts environnementaux d'un produit »⁵. Ce besoin de recourir à un expert spécifique pour chaque sujet environnemental reste justifié aujourd'hui encore, mais peut-être davantage dans d'autres disciplines liées à l'écoconception que dans le cas de la mesure de l'impact environnemental avec un processus d'ACV. En effet, celui-ci est déjà établi et normalisé, bien qu'encore remis en question par ceux qui étudient le sujet de l'empreinte carbone.

Les trois types de collaboration déterminés par ces chercheurs dans le cadre de l'écoconception du fait de l'expertise qu'elle requiert sont : une expertise externalisée, par exemple avec des consultants externes ; une expertise présente dans un autre département de l'entreprise ou une expertise présente chez les concepteurs. Chacune de ces situations présente des avantages et des inconvénients en termes de processus de conception. Les deux critères qui distinguent principalement chacune de ces situations sont la fiabilité des résultats et la fluidité et l'intégration au processus de conception. Ainsi, une expertise externe apporte l'avantage de la fiabilité mais l'inconvénient de la difficulté de l'échange de l'étude simultanée des enjeux généraux de la conception et du sujet environnemental. Au contraire, une expertise présente chez les concepteurs permet une combinaison des concepts de conception plus entrelacée mais une connaissance plus limitée des phénomènes environnementaux.

² Texte original : « *EcoDesign can be interpreted as Design with more intelligent interrelationship to Nature », which considerably increase the complexity of it* »

³ Texte original : « *This paper assumes that helping designers and Life Cycle analyst to collaborate (by improving the use of methods and tools they judge appropriate for their tasks) increases their motivation to adopt ecodesign practices* »

⁴ Texte original : « *collaboration is an important issue to conduct ecodesign in a proactive manner* »

⁵ Texte original : « *Collaboration is thus « a sine-qua-non » to create value in organizations. This is especially the case in a Design To Environment approach, where the complexity of the process is increased by the necessity to explore unusual domains such as biology or climatology to validate the environmental impacts of a product.* »

Le type de collaboration déterminé comme étant optimal par cette recherche consiste en la combinaison d'une expertise présente dans un autre département de l'entreprise et une expertise présente directement au sein de l'équipe de conception, chez les concepteurs. Les avantages mis en avant sont notamment un échange bilatéral de données permettant de lier les paramètres de conception aux conséquences sur l'environnement et une limitation de la connaissance à échanger entre acteurs grâce à une collaboration entre domaines d'expertise. Ainsi, la perte de connaissance engendrée dans le cas où l'expertise est celle présente chez les concepteurs uniquement, sans faire appel à un service extérieur, est limitée. Néanmoins, cela nécessite que l'équipe de conception fasse partie d'une agence plus globale qui comprenne différent domaine d'expertise. Cela semble donc empêcher qu'une agence de concepteurs qui ne serait pas multi-domaine s'engage à intégrer les enjeux environnementaux dès les premières étapes de conception.

D'autre part, la proposition de cette recherche est de transformer les logiciels de conception pour en faire des outils plus complets, qui comprennent davantage de couches d'informations et de paramètres, notamment des paramètres environnementaux. « Les auteurs proposent de construire des interfaces dynamiques entre les experts de l'écoconception et les outils des concepteurs (en partageant les informations cruciales), comme une alternative aux approches standards et systèmes PLM (*Product Life-Cycle Management*). Le cœur de la proposition consiste à intégrer les paramètres environnementaux au sein des activités des concepteurs, guidées par des modèles (*Model Driven Engineering*), définis au cours du processus de conception »⁶. Cela soulève des questions quant à la manière de fonctionner de tels logiciels, aux bases de données nécessaires pour leur utilisation, à la taille, la mémoire ou autres besoins de tels logiciels pour fonctionner. Ces enjeux relèvent davantage du domaine de l'informatique et de la programmation et ne sera pas étudié ici. Mais l'objectif de rassembler toutes ces couches d'informations en un seul logiciel, à l'image de ce qui a été initié avec le BIM, est un objectif futur dont on ne peut dire pour l'instant s'il sera atteignable ou non. Je m'intéresse donc à des idées alternatives concernant la collaboration entre acteurs, et notamment le niveau de collaboration qui consiste à intégrer une partie de l'expertise directement auprès des concepteurs, en leur fournissant un accès à des outils adaptés à leurs connaissance du domaine d'expertise et à leurs besoins et usages.

La discussion autour des différents modes de collaboration, des avantages et inconvénients de chacun et de ceux permettant la collaboration la plus efficace dans le cadre d'une démarche d'écoconception a nourri ma réflexion autour de cette collaboration. La première observation a été la confirmation de l'enjeu de faire collaborer les différents acteurs dans la phase la plus en amont possible de la conception. Une des raisons de cela est la possibilité, à ce moment du projet, d'envisager davantage de leviers d'action pour réduire l'impact environnemental du projet. En effet, la réflexion autour de la conception est à ce stade encore très flexible et peut être reconSIDérée à plusieurs reprises dans l'objectif de déterminer l'architecture répondant le mieux à la rencontre des divers objectifs. L'autre avantage de cette collaboration dans les premiers temps de la conception est, du fait que l'architecture n'est pas encore figée, de limiter les coûts de modification des éléments du projet.

⁶ Texte original : “The authors propose to build dynamic interfaces [...] between ecodesign experts and designer tools (sharing crucial information), as an alternative to standard approaches and PLM systems. The core of the proposal is the integration of environmental parameters within designers activities [...] driven by models (MDE), which are defined along the design process”

L'article de recherche de Bruno Peuportier, Aurore Wurtz et Patrick Schalbart publié en 2022 sous le nom « Couplage entre conception paramétrique et analyse de cycle de vie pour l'écoconception des quartiers » abonde dans ce sens en ce qui concerne la collaboration entre acteurs et l'impact que cela peut avoir sur le projet lui-même.

Ainsi, pour ces trois chercheurs, « l'évaluation environnementale des bâtiments doit être effectuée en phase amont, lorsque le concept architectural est développé ; ce dernier comprend la définition du nombre d'étages, de l'orientation du bâtiment ainsi que de sa géométrie et sa structure. [...] il est alors possible d'étudier l'influence de la géométrie et de la structure du bâtiment sur son impact environnemental et de proposer des choix de conception en conséquence ». L'objectif mis en avant est de « faciliter l'accès aux résultats environnementaux dès la phase amont des projets de conception de bâtiments afin de guider les acteurs du projet vers des solutions à moindre impact. Les matériaux liés à la structure du bâtiment sont adaptés selon les caractéristiques de conception et leur impact est évalué ». La méthodologie de travail envisagée pour répondre à ces objectifs dans le cadre de l'écoconception est analogue à la « méthodologie BIM, qui vise à faciliter la communication et la gestion des données entre les différents acteurs d'un projet de conception ».

Cette thématique du processus de conception et de l'interaction entre les différents domaines de la conception est également discutée dans la thèse de Koliann Mam. Son constat est le même : les enjeux environnementaux et structurels se jouent dès le début de la conception. Ainsi, l'un des objectifs de cette thèse est d'établir un « cadre d'évaluation des impacts environnementaux des structures en bois, intégrant les assemblages et adapté aux premières phases de la conception, là où se font les choix les plus fondamentaux ». La prise en compte des aspects structurels et environnementaux du bâtiments dès le début de la conception semblent donc indissociables.

iii. Rôle et utilité des outils paramétriques

Les outils paramétriques sont apparus comme des outils permettant de travailler conjointement ces notions de dimensionnement structurel, d'études environnementales, de temporalité d'intégration des études environnementales au processus de conception et de collaboration entre acteurs.

1. Définition et pertinence

Aurélie de Boissieu définit dans sa thèse soutenue en 2013 la modélisation paramétrique comme un modèle « construit à partir d'un ensemble d'éléments (géométriques, numériques, etc.) mis en relation dans un système de dépendances. Ce système de dépendances peut être visualisé sous une forme symbolique (celle d'un graphe ou d'un tableau par exemple, en fonction des modeleurs). Un modèle paramétrique n'a pas de forme ou de contenu figé, il peut être modifié à tout moment à partir des variables indépendantes, appelées paramètres, qui le définissent.

Quand un de ces paramètres est modifié, le système de dépendance constituant le modèle paramétrique est alors mis à jour, générant une nouvelle géométrie. La modélisation paramétrique permet ainsi d'explorer un grand nombre de variantes d'un objet à concevoir. En cela, ce mode de représentation est potentiellement un outil très puissant pour la conception architecturale ». (De Boissieu, 2013) (Akrout, Xaviera, & Leclercq)

L'intérêt de cet outil est multiple, comme le démontre Aurélie de Boissieu. Il peut permettre de concevoir une architecture plus innovante dans sa technicité, sa géométrie ou sa structure ; il peut également être support d'un partage de données BIM (Building Information Modelling) dans le cadre de la conception d'une maquette numérique globale partagée ; il peut également contribuer au développement d'architectures bio-inspirées ou encore faciliter le passage de la conception numérique à la réalisation au moyen de machines à commandes numériques. (De Boissieu, 2013)

Une des raisons de l'intérêt porté à la modélisation paramétrique réside également dans son mode de conception, avec une variation simplifiée des paramètres de l'objet conçu, qui sont par exemple des dimensions de bâtiment, et qui permettent ainsi de générer une grande variété d'objets de même type mais aux dimensions variées.

De plus en plus de bâtiments sont conçus en s'appuyant sur cet outil de modélisation et de conception. C'est par exemple le cas de la Maison des éléphants du Zoo de Zurich (Suisse), qui a ainsi pu être conçue en optimisant des paramètres de quantité de matériau utilisée et de structure. (AEC_Magazine, 2019) (Les_Cahiers_Techniques_du_Bâtiment, 2014)

2. Outils dans le cadre d'études environnementales et structurelles

Différents logiciels existent pour recourir à la modélisation paramétrique, l'un des plus répandus et facile d'accès étant sans doute Grasshopper, extension du logiciel Rhino. Grasshopper est l'interface de programmation numérique dont le rendu est traduit visuellement dans l'interface de Rhino. Cette suite de logiciels Rhino-Grasshopper présente également l'avantage de disposer de nombreux plugins, dont chacun propose des outils dirigés vers l'étude d'un problème spécifique.

Ainsi, dans le cadre des études climatiques et environnementales par exemple, des plugins tels que Ladybug, Honeybee et Dragonfly sont particulièrement utiles pour réaliser des simulations et études d'ensoleillement ou de comportement à l'échelle d'un quartier. D'autre part, le plugin Karamba permet de réaliser des simulations structurelles permettant d'observer les déformations d'une structure à un ensemble de charges et de dimensionner les éléments de cette structure.

iv. Exemples d'application de la conception paramétrique en lien avec les études environnementales

Certains travaux de recherche ont d'ores et déjà une réflexion sur certains aspects du lien entre performances structurelles et environnementales d'un ou plusieurs bâtiments.

L'un d'entre eux s'attache par exemple à l'étude de l'impact des conditions climatiques sur l'architecture d'un quartier. Intitulé « Couplage entre conception paramétrique et analyse de cycle de vie pour l'écoconception des quartiers », cet article de recherche, rédigé par Bruno Peuportier, Aurore Wurtz et Patrick Schalbart et publié en 2022, étudie « le couplage des outils de conception paramétrique Rhino-Grasshopper et l'outil de simulation thermique dynamique et d'ACV Pleiades ». Cet article s'intéresse à l'utilisation combinée de deux types d'outils de conception : la suite Rhino Grasshopper, qui permet de représenter un élément de manière graphique avec Rhino ou à travers l'outil de programmation visuelle Grasshopper, et la suite Pleiades, pour réaliser les études thermiques et ACV de l'élément modélisé. La pertinence de ce couplage est justifiée dans cet article par l'usage répandu de Rhino auprès des architectes et de Pleiades pour les études thermiques et ACV au sein des bureaux d'études. Cela confirme la volonté d'une collaboration entre les acteurs simplifiée par le choix des outils utilisés.

La typologie de bâtiment étudié dans cet article est l'immeuble de bureaux. L'objet de cette étude est de comparer l'impact environnemental d'une tour de bureaux de 30 étages avec trois tours de bureaux de 10 étages, les deux cas étudiés ayant une même surface utile totale.

La méthodologie de travail consiste à modéliser ces deux cas d'étude grâce à l'outil de conception paramétrique Grasshopper, puis d'utiliser les plugin Ladybug et Honeybee pour analyser et adapter la conception aux conditions climatiques de l'environnement des bâtiments conçus (orientation par rapport à l'exposition solaire, influence des bâtiments environnants sur les bâtiments du projet, aspect météorologique, aspect énergétique, etc.). De ce fait, cette méthodologie s'avère particulièrement pertinente pour une étude à l'échelle du quartier, puisqu'elle prend en compte les masques faits par un bâtiment sur ses voisins. Enfin, les modèles sont exportés en format gbXML pour être importés dans le logiciel Pleiades afin d'en déterminer les performances thermiques et environnementales.

Cet article souligne également la praticité d'utilisation de la suite de logiciels Rhino pour la modélisation de bâtiments aux géométries régulières, mais peut s'avérer plus délicat dans le cas de bâtiments non standards.

D'autre part, le travail de Koliann Mam (Mam, 2021) dans le cadre de sa thèse intitulée « Exploration structurelle et environnementale des ouvrages en bois de grande portée », soutenue en novembre 2021 et publiée en 2022, se penche aussi sur ce sujet de l'utilisation des outils de conception paramétrique dans le processus d'écoconception.

2. Motivation et affinage du sujet

- *Idée première, approfondissement de l'état de l'art et affinage du sujet*

L'ambition première de mon sujet était de comparer les émissions de CO2 de différents types de bâtiments, en intégrant cette mesure au processus de conception, afin de permettre de proposer aux concepteurs des outils ou axes de comparaison de leurs designs et qu'ils fassent des choix de design en conséquence.

L'objectif premier était de comparer l'impact environnemental de différents matériaux, en fonction de leurs performances structurelles, et de la morphologie/géométrie du bâtiment. Ainsi, l'idée était de comparer les émissions de CO2 engendrées par la structure d'un bâtiment d'une surface par étage x et d'un nombre d'étages y, et celle d'un bâtiment d'une surface par étage x/z et d'un nombre d'étages z*y.

Ainsi, en associant cette première approche avec les possibilités de la modélisation paramétrique, le but était d'essayer de proposer une démarche qui puisse s'étendre à des bâtiments de surfaces et de nombre de niveaux très variés.

Plus globalement, cette idée venait d'un simple questionnement quant à l'impact environnemental des bâtiments : Etant donné tous les composants d'un bâtiment et notamment sa structure, vaut-il mieux construire un bâtiment unique mais de grande hauteur, ou plusieurs bâtiments de hauteurs plus modérées.

Il va de soi que, au-delà de la simple considération structurelle ou environnementale, ce questionnement est également complètement imbriqué avec la notion d'habitabilité des lieux. Ainsi, le mode de vie et la pratique de l'espace différent dans ces deux types de bâtiments. Bien que cela soit une considération fondamentale de la manière d'habiter l'espace, donc de la conception architecturale, je mets ici de côté cette considération pour étudier uniquement la physique du bâtiment.

En approfondissant l'état de l'art autour de cette thématique, j'ai découvert l'article de recherche intitulé « Couplage entre conception paramétrique et analyse du cycle de vie pour l'écoconception des quartiers » (Peuportier, Wurtz, & Schalbart, 2022). J'ai ainsi découvert qu'une approche similaire avait déjà été développée concernant la comparaison des performances structurelles et environnementales d'un bâtiment de 30 étages et de trois bâtiments de 10 étages, à surface équivalente.

- *Origine de la motivation de confronter ces deux notions d'analyse structurelle et d'impact environnemental*

La raison première pour laquelle j'ai souhaité me pencher sur la rencontre de ces deux notions vient du contenu des cours que j'ai pu suivre lors de mon année d'échange universitaire en Norvège pour mon année de Master 1 en 2023-2024. Ainsi, j'ai pu étudier lors du second semestre notamment des notions alors complètement nouvelles pour moi, notamment concernant les outils de mesure de l'impact environnemental d'un bâtiment.

Au cours du semestre et par la suite lors d'un « summer job », j'ai pu me renseigner sur l'état des lieux de la situation en France sur ce sujet environnemental du bâtiment. Et j'ai ainsi découvert

avec joie que, alors que c'était lors d'un semestre en Norvège que j'avais découvert ce domaine, la France était en avance par rapport à de nombreux pays, que ce soit en termes de réglementation ou d'outils développés. En effet une réglementation, que l'on développera dans la suite de ce mémoire, est déjà en vigueur alors que dans nombre de pays européens, la question environnementale dans le domaine du bâtiment relève encore du volontariat des concepteurs ou des constructeurs.

- *Ce que je cherche à développer davantage*

Dans ce mémoire, j'étudie davantage les éléments de structure indépendamment au début afin que les premiers choix de structure soient faits par rapport à l'impact environnemental des différentes typologies de structure. Dans un second temps, j'étudie la structure dans son ensemble.

Je cherche ainsi à comparer différentes structures grâce à la modélisation paramétrique.

- *Le choix d'étudier des charpentes*

Certains documents de la littérature présentent des études sur les structures des immeubles de grande hauteur, avec notamment une alternative en bois, étudiée du point de vue de sa performance structurelle et de son impact environnemental. Après l'analyse de cette étude sur la dimension verticale, l'idée est donc désormais d'étudier la dimension horizontale du bâtiment à travers sa portée.

La thématique des ouvrages de grande portée m'inspirait dans un premier temps une approche historique, qui portait sur les halles à charpentes métalliques à l'image de nombreuses gares ferroviaires, ou à charpentes en bois, à l'image de certaines halles de marché.

Mais après réflexion, il m'est apparu que ces questionnements de structures de grandes portées se retrouvait également dans la conception d'espaces culturels ou sportifs. Ainsi, la finalisation au cours de l'année 2023-2024 de la construction de nouvelles installations sportives dans le cadre des Jeux Olympiques de Paris 2024 et qui vont faire partie du paysage architectural français et plus spécifiquement francilien, m'a amené à questionner et contextualiser ces questions d'impact environnemental de structure. Même si en l'occurrence les infrastructures liées à l'organisation des Jeux de Paris 2024 sont d'ores et déjà conçues et construites, au vu de l'importance du développement des infrastructures tant sportives que culturelles (musées, théâtre, opéra, etc.), il apparaît que cette question garde un intérêt actuel.

Par ailleurs, la plupart des études répertoriées en réalisant l'état de l'art portent sur des typologies de bâtiment de maisons individuelles ou de bureaux. Mais le sujet des bâtiments de grande portée est apparu dans un premier temps pas ou peu abordé.

Enfin, la démarche dans son ensemble questionne la collaboration des acteurs des différentes spécialités dans le domaine de la conception et de la construction. L'une des études répertoriées dans l'état de l'art met en avant l'importance de la collaboration entre acteurs et une manière de la rendre effective. Ainsi, ce mémoire s'inscrit dans une poursuite de cette réflexion, afin de mettre en évidence les thématiques et les temps du projet où une collaboration simultanée et directe entre acteurs semble nécessaire à une amélioration et une optimisation des performances.

Et cette collaboration entre acteurs est liée à la compatibilité des logiciels. C'est ainsi que mon approche a consisté à explorer différentes combinaisons de logiciels.

- *Un sujet qui interroge le processus de conception et la collaboration entre acteurs*

Finalement, ce sujet m'a amené à établir un « workflow » ou processus de travail possible pour intégrer l'impact environnemental de la structure, au regard d'un questionnement sur les performances structurelles recherchées pour le bâtiment, tout en permettant la collaboration de divers experts au projet.

- *Problématisation du sujet*

Les considérations précédentes m'ont amené à aboutir à la problématique suivante :

Comment intégrer les enjeux de performance environnementale d'une structure et en faire un critère supplémentaire de choix dans le processus de conception du projet ?

3. Méthode de recherche

a. Problématique

La problématique suivante a été déterminée dans un premier temps :

Comment intégrer les enjeux de performance environnementale d'une structure et en faire un critère supplémentaire de choix dans le processus de conception du projet ?

Puis, dans le même temps, les interrogations sous-jacentes sont venues compléter les enjeux de la problématique à étudier :

Comment concilier l'utilisation des critères de performances environnementales et structurelles d'une proposition de projet de bâtiment au cours du processus de conception ?

Est-ce qu'une analyse structurale et environnementale de portiques, déterminés par plusieurs paramètres, peut influer sur le dimensionnement du bâtiment dans la phase de conception, afin de limiter les émissions de CO2 du projet ?

Comment intégrer cette démarche au processus de conception en la rendant la plus accessible possible et en s'assurant de sa fiabilité ?

b. Objectif

Afin d'étudier l'impact environnemental en lien avec l'analyse structurale des bâtiments de grande portée, j'ai commencé par simplifier l'approche du problème en étudiant des portiques individuels, mais avec des géométries et matérialités différentes.

Je cherche plus largement à déterminer si une étude détaillée de la structure peut avoir un intérêt au vu du pourcentage de réduction des émissions.

c. Hypothèses

La première hypothèse faite préalablement à la réalisation de l'expérience est que la modélisation réalisée fournirait des ordres de grandeurs fiables des performances environnementales et structurelles, qui permettraient donc de comparer les modèles entre eux selon les dimensions et la matérialité des structures. Néanmoins, les simplifications utilisées pour la modélisation induiraient un manque d'exactitude des valeurs finales. Le processus de travail modélisé permettrait donc un dimensionnement structurel et environnemental rapide en phase conception (esquisse (ESQ), avant-projet sommaire (APS)). Mais il ne pourrait se substituer à une étude plus approfondie en phase avant-projet définitif (APD) et projet (PRO).

La seconde hypothèse est que certains matériaux sont plus appropriés à un usage pour des grandes portées en termes de performances structurelles et environnementales.

On s'attend également à ce que les performances environnementales des structures en bois soient parmi les plus faibles, du moins pour certaines portées.

d. Protocole

J'ai déterminé le protocole suivant pour éprouver les hypothèses et répondre à la problématique précédemment énoncée.

i. *Définition des scénarios à modéliser*

Dans un premier temps, je souhaite délimiter le domaine de l'étude à mener. Puisque le sujet se concentre sur la modélisation et l'étude comparée des portiques, je cherche donc à dresser une liste des typologies de portiques que l'on peut rencontrer dans la conception d'un projet. Je liste les typologies principalement utilisées. L'étude n'est donc pas exhaustive, ce qui serait difficile au vu de la multitude de typologies possibles dès lors qu'on modifie un peu la géométrie du portique. En limitant le nombre de typologies étudiées, je souhaite également me donner la possibilité de faire varier les paramètres caractéristiques de chacune des typologies, tels que la portée, la hauteur et la matérialité.

Pour déterminer ces typologies les plus courantes et qu'il semble donc pertinent d'étudier, j'ai rassemblé un ensemble de références de portiques, afin d'avoir une vue plus large des différentes typologies existant, que celles rencontrées durant les années de licence.

Les typologies sélectionnées et qui vont constituer le corpus étudié sont :

- Portique poteau poutre simple
- Portique treillis type Pratt
- Portique treillis double pente
- Portique treillis monopente
- Portique arc treillis type Pratt
- Portique arc treillis type Pratt avec débord de toiture
- Portique arc âme pleine

J'ai également déterminé plus précisément les paramètres qui caractérisent chaque portique et que je souhaite faire varier pour comparer les résultats. Ces paramètres sont : la hauteur, la portée et la matérialité.

Les matérialités considérées sont :

- Béton
- Bois
- Acier

Les sections d'éléments considérées sont :

- Rectangulaires verticales pour le béton et le bois
- Tubes carrés pour l'acier

- Tubes rectangulaires et IPN pour l'acier

Les paramètres caractéristiques et que je vais faire varier sont :

- Hauteur du portique
- Hauteur du treillis si applicable
- Hauteur, largeur et profondeur des éléments de la structure
- Portée

ii. Hypothèses simplificatrices et cadre d'étude

Dans un premier temps, j'ai abordé la modélisation en faisant certaines hypothèses simplificatrices. La première a été la simplification des assemblages, fondations et jonctions de certains éléments pris en compte. J'ai également simplifié la complexité matériaudique de certaines structures dans un premier temps, en considérant qu'elles sont constituées d'un seul matériau. Enfin, j'ai délimité un cadre d'étude qui se limite à la conception neuve, étant donné que le cas de la réhabilitation nécessiterait la prise en compte de certains paramètres pas nécessairement évident à quantifier tel que d'éventuels renforcements ou modifications de structure par exemple.

iii. Modélisation structurelle

Après avoir rassemblé les typologies de références de portiques à modéliser, je suis passée à la modélisation. Les éléments que je modélise font partie d'une même catégorie d'éléments, et sont caractérisés par des paramètres similaires. Par ailleurs, je souhaite dans un second temps faire varier les dimensions des modèles générés, en modifiant les paramètres et dans le but de générer un panel de portiques. Afin d'optimiser la méthode de modélisation, j'ai décidé d'utiliser le logiciel Grasshopper associé à Rhino. La modélisation des portiques peut ainsi être écrite de manière paramétrique.

Par ailleurs, le sujet de ce mémoire porte sur l'étude du lien entre performances structurelles et environnementales d'un portique. Pour cela, je tiens à m'assurer que le dimensionnement de chacun des éléments du portique respecte les exigences structurelles, afin de comparer des quantités de matériau qui ont du sens. J'utilise donc le plugin Karamba de Grasshopper, qui permet de modéliser les déformations d'une structure en fonction des actions qui lui sont appliquées.

Pour modéliser les portiques, en prenant en compte les exigences de dimensionnement dues aux performances structurales qu'ils se doivent de respecter pour assurer leur stabilité, j'ai suivi deux protocoles légèrement différents.

1. Rhino et Karamba

Le premier protocole utilisé, a été déterminé suite à l'apprentissage des fonctionnalités de base du logiciel Rhino et de l'environnement de programmation Grasshopper à l'occasion d'un cours suivi lors d'un semestre d'échange de Master 1 à l'université NTNU à Trondheim en Norvège. Ainsi, ce protocole consiste à utiliser l'interface de programmation Grasshopper pour modéliser de manière paramétrique les portiques définis. Puis j'ai utilisé le plugin Karamba de Grasshopper. En reliant les blocs disponibles avec ce plugin, j'ai pu modéliser la déformation du portique, en fonction principalement des charges qui lui sont appliqués, de conditions d'appui ou de liaisons entre éléments.

En utilisant les blocs de Karamba « Analyse model » puis « Model view », « Beam view » et « Legend », j'ai pu ainsi visualiser, dans l'interface de Rhino, la déformation de l'élément, ainsi que les efforts internes qui s'exercent dans l'élément, au moyen d'un code couleur associé à la légende et défini dans Grasshopper. J'ai également pu déterminer les dimensions que chacun des éléments de la structure du portique doit avoir pour résister aux efforts auxquels la structure est soumise. Ainsi, dans mon cas, je cherche à dimensionner les sections de poutres, membrures et poteaux. En indiquant une condition sur les « cross sections », je parviens donc à dimensionner, élément par élément, la section minimale nécessaire, tout en limitant ses dimensions au minimum nécessaire, afin d'être le plus économique possible en quantité de matériau. En effet, je fais l'hypothèse assez réaliste, dès à présent, que, quel que soit le matériau considéré, plus on limite la quantité de matériau utilisé, plus les émissions de CO2 associées à la structure seront faibles. Etant donné que l'objectif est de chercher un moyen possible pour contrôler le niveau des émissions de CO2, tout en s'assurant du respect des performances structurelles, ce protocole permet d'aller dans le sens de cet objectif.

Après analyse du modèle par Karamba, j'ai ajusté les valeurs d'entrées des « cross sections » afin d'optimiser les performances du portique étudié.

Une fois cette étape de modélisation et optimisation structurale achevée, l'objectif de la recherche est de modéliser les performances environnementales du modèle. Le premier logiciel que j'ai utilisé est celui par lequel j'ai été introduite aux notions d'impact environnemental et d'analyse de cycle de vie : Reduzer. Etant donné que Reduzer est compatible avec des fichiers en provenance de Revit mais pas avec ceux en fonction de Rhino, il a fallu chercher un moyen de passer d'un logiciel à l'autre. J'ai décidé dans un premier temps de partir de l'analyse et l'optimisation structurale permises par les fonctionnalités du plugin Karamba dans Grasshopper et Rhino, et de recommencer un modèle, dans Revit cette fois, à partir des paramètres d'entrée déterminés lors de l'optimisation structurelle. J'ai ainsi pu modéliser les modèles souhaités dans Grasshopper puis dans Revit, avant de les exporter via le connecteur Speckle, nécessaire à l'importation, dans Reduzer pour en faire l'analyse environnementale. Néanmoins, ce protocole présente l'inconvénient de rompre la chaîne de modélisation. Une intervention manuelle est nécessaire, et on perd d'une certaine manière le bénéfice de la modélisation paramétrique.

Pour pallier à cela et éviter de rompre la chaîne de modélisation, j'ai découvert lors de mes recherches le plugin Rhino inside Revit (RIR). Installer ce plugin permet d'accéder à Rhino et Grasshopper directement depuis Revit, ainsi que d'utiliser des blocs dans Grasshopper propres aux fonctionnalités de Revit, tels que la création de familles. Ainsi, j'ai pu passer directement de

la modélisation structurelle dans Rhino avec Grasshopper à la modélisation dans Revit. Et j'ai pu modifier la modélisation dans Revit par simple modification des paramètres d'entrée dans Grasshopper, donc sans autre intervention manuelle entre logiciels.

2. Rhino inside Revit

C'est ainsi qu'est arrivé le second protocole, qui utilise Rhino inside Revit.

Comme mentionné précédemment, ce protocole repose sur l'utilisation d'un plugin, Rhino inside Revit, qui permet d'accéder à Rhino et Grasshopper directement depuis le logiciel Revit. Ce plugin apporte des blocs supplémentaires propres à la modélisation dans Revit, et à la communication de cette modélisation entre Grasshopper et Revit.

Pour utiliser ces blocs propres à Revit dans Grasshopper, je suis partie des blocs de données d'entrée utilisés pour la modélisation et l'optimisation structurelle. Puis j'ai poursuivi le chemin de conception en ajoutant les blocs « Add new component (location) », « Add new component (work plane) » et « Family types » notamment. Je les ai reliés aux blocs précédents pour créer des familles pour chaque type d'élément du portique, ou pour un portique dans son ensemble, selon comment ces deux protocoles fonctionneront par la suite.

Les éléments modélisés apparaissent ainsi dans Revit et sont regroupés par famille. La géométrie modélisée dans Rhino est transmise à Revit. Et, contrairement aux premiers essais de modélisation, les paramètres, en particulier le volume, sont récupérés de Rhino vers Revit. En effet, lors des premières modélisations « manuelles » dans Revit, à partir des dimensions déterminées par l'analyse structurale réalisée dans Rhino, la géométrie récupérée par Revit ne permettait pas d'acquérir les paramètres tels que le volume. Ainsi, ces données étaient comme « perdues » et rendaient la suite du travail difficile, si ce n'est impossible à poursuivre tel quel. Cela pouvait être dû à une mauvaise modélisation de famille de ma part, ou à une autre. Mais, dans tous les cas, le processus de modélisation ne fonctionnait pas tel quel.

iv. Modélisation environnementale

Une fois les modèles Revit réalisés, à partir de l'analyse et l'optimisation structurale, je suis passée à la modélisation environnementale. Pour cela, il faut importer les modèles Revit réalisés vers les logiciels d'analyse et d'optimisation environnementales, qui permettront par la suite de réaliser l'Analyse du Cycle de Vie des portiques modélisés et d'établir leur bilan carbone. Dans un second temps, je chercherai à réduire les émissions de CO2 des portiques modélisés en modifiant certains paramètres, dans le but de proposer un processus de conception pour réduire au maximum les émissions carbones.

J'ai réalisé cette modélisation environnementale avec deux logiciels différents, pour comparer le processus de travail avec chacun d'entre eux, ainsi que les fonctionnalités proposées et le potentiel d'intégration dès la phase de conception de projet notamment.

1. Reduzer

Le premier logiciel utilisé se nomme Reduzer. Le choix de commencer les essais de modélisation par ce logiciel vient du fait que j'ai pu l'essayer à l'occasion d'un cours lors d'un semestre d'échange à l'université NTNU en Norvège. Ainsi, j'ai pu expérimenter certaines des fonctionnalités de ce logiciel. L'une des possibilités qu'il offre et que j'ai pu découvrir à ce moment-là était notamment l'importation d'un modèle BIM et l'affectation de composants à chacun des éléments du modèle. Ces composants, qui peuvent contenir plusieurs éléments, peuvent être modifiés suivant différents paramètres, afin de modéliser des situations diverses et de comparer les émissions de CO2 qui en résultent. J'ai ainsi pu lier chaque élément du modèle à un composant existant dans Reduzer et caractérisé notamment par ses émissions de CO2. Dans le cas du portique, ce lien se fait en unité de volume, unité la plus appropriée ici.

J'ai ensuite réitéré l'opération pour chacun des modèles, en choisissant à chaque fois les composants les plus appropriés en termes de matérialité, de dimensionnement et de valeur d'émissions.

2. Pleiades

Le deuxième logiciel testé pour l'analyse et l'optimisation des performances environnementales des portiques modélisés est Pleiades, et plus particulièrement son module d'ACV. Pour pouvoir déterminer les performances environnementales du modèle, il faut exporter le fichier Revit au format gbXML dans Revit. Puis, dans l'interface de Pleiades, j'ai associé chacune des quantités de matériau du portique modélisé à la Fiche de Données Environnementale et Sanitaire du matériau correspondant dans Pleiades pour obtenir les valeurs d'émissions de CO2.

v. Comparaison des modélisations

Finalement, j'ai comparé les valeurs de dimensionnement structurel et environnemental obtenues, avec des valeurs de références. Ces valeurs de références sont prises parmi un ensemble de données considérées fiables car issues de recherches publiées. J'ai ainsi déterminé un pourcentage d'écart de la valeur obtenue par l'expérience décrite dans ce mémoire avec la valeur issue des recherches, considérée comme résultat d'une expérience témoin.

vi. Versions des différents logiciels utilisées

Une des difficultés de ce travail a résidé dans l'utilisation combinée de plusieurs logiciels, et la problématique des licences nécessaires à leur fonctionnement. En commençant ce travail durant l'année de Master 1 que j'ai suivie à l'université NTNU en Norvège, j'ai pu avoir accès à une licence pour Rhino7 et une autre pour Karamba3D. Néanmoins, l'accès à la licence de Rhino7 s'est terminé à l'été 2024 du fait de la fin de mon échange à NTNU. Il en est de même pour la licence

pour Karamba3D, qui était une licence à laquelle notre enseignant avait souscrit dans le cadre de son cours et dont l'accès à également été clôturé à l'été 2024.

En cherchant à retrouver un accès à Rhino et Karamba, j'ai opté pour une licence temporaire de 3 mois pour Rhino et une licence Démo de 1 mois pour Karamba. J'ai donc opté pour Rhino 8 et Revit2025, mises à jour les plus récentes. Mais il s'est avéré que Rhino inside Revit ne fonctionnait pas pour les versions de Revit plus récentes que Revit2023. Il est ensuite apparu que les modèles que j'avais réalisé au semestre 8 en 2023-2024 avec Rhino7 ne fonctionnaient plus, même sur Rhino7. Le problème venait du fait que la licence pour Karamba3D fonctionnait uniquement sur la version la plus récente de Rhino, c'est-à-dire Rhino 8. Or une licence de démonstration de Karamba ne pouvait pas être fournie pour une version antérieure de Rhino, du fait de sa nature d'outil aux fonctionnalités restreintes. Et la licence Karamba avec laquelle j'avais travaillé au semestre 8 sur Rhino7 faisait apparaître les blocs Karamba comme « old » donc dépassés et plus fonctionnels.

Finalement, les versions des logiciels utilisées pour les dernières versions des modélisations sont donc Revit 2023 et Rhino8.

RESUME DU PROCESSUS DE TRAVAIL :

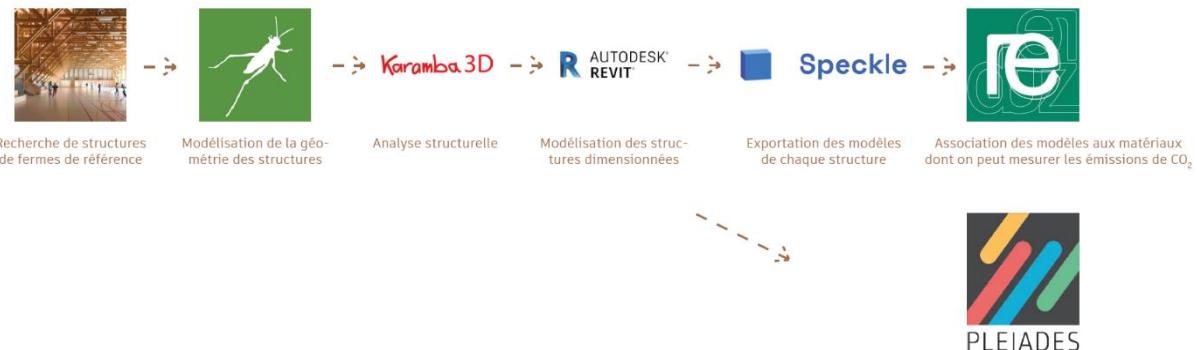


Figure10 : Processus de modélisation et de combinaison des outils de recherche

4. Expérience menée

Après avoir défini la méthode de recherche, je l'ai ensuite mise en pratique, en mettant à l'épreuve le protocole déterminé précédemment. Je décris ici plus en détail l'expérience mise en œuvre, étape par étape.

L'expérience réalisée est découpée en deux grandes étapes ou itérations. Dans un premier temps, pour simplifier le projet, je me concentre sur la modélisation de portiques individuels. Dans un second temps, j'étudierai la modélisation de portiques combinés et disposés de sorte à modéliser un bâtiment.

Le travail se concentre à ce stade sur la construction neuve. En effet, la réhabilitation est par définition une situation qui diffère pour chaque projet. Il apparaissait donc plus complexe de mettre en œuvre une expérience générale pour étudier cette question. C'est une thématique qui pourra être développée par la suite.

a. Premiers essais d'expérience

Dans un premier temps, j'ai cherché comment répondre à l'objectif de comparer les impacts environnementaux des choix de structure possibles. La première tentative d'expérience était la modélisation d'un bâtiment de 20m par 30m de deux niveaux avec une structure poteau-poutre. Il s'agissait ensuite de faire varier les paramètres de portée, hauteur des poteaux, nombre de niveaux. Il était aussi question à un moment de comparer les structures poteaux-poutres modélisées avec leur équivalent en termes de reprise de charges d'une structure avec murs porteurs. Néanmoins, il apparaissait que cela revenait à modifier de nombreux paramètres en même temps, et qu'il pourrait être difficile de comparer les résultats obtenus. Et cela avait été étudié dans une certaine mesure dans l'une des ressources de l'état de l'art. Ainsi, j'ai modifié le protocole de l'expérience, pour scinder l'expérience en plusieurs niveaux de complexité. Etant donné que l'objectif de l'expérience est d'établir un modèle d'aide à la conception de la structure, j'ai séparé le problème en plusieurs niveaux. Dans un premier temps, j'ai étudié uniquement l'échelle d'un portique. Dans un second temps, j'assemblerai des portiques pour en faire une structure.

b. Modélisation de charpentes aux géométries, portées et autres paramètres variés

Dans un premier temps, j'ai modélisé les portiques que je souhaite étudier.

i. Recherche de références de typologies à modéliser

La première étape a consisté à rechercher des références de typologies de portiques à modéliser, afin d'établir un corpus d'étude. Ces références proviennent en partie de références étudiées ou vues durant les années de licence, ou bien de références architecturales répertoriées dans des ouvrages ou sur internet.

CORPUS DE REFERENCES DE STRUCTURES DE GRANDE PORTEE DE TYPOLOGIES VARIEES



Figure 11 : Collège et gymnase, Rumilly (74)



Figure 12 : Equipement sportif, Arc-et-Senans (25)



Figure 13 : Hall sportif, Papaïcton (973)

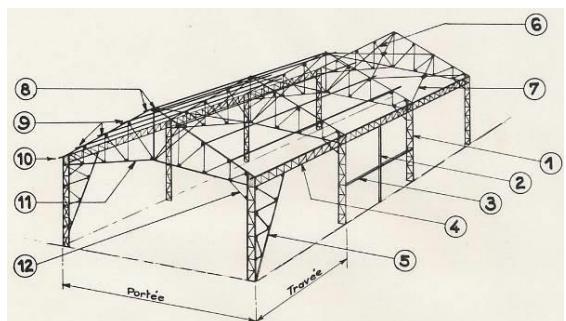


Figure 14 : Schéma de principe d'une charpente double pente treillis



Figure 15 : Grand Palais Ephémère, Paris (75)

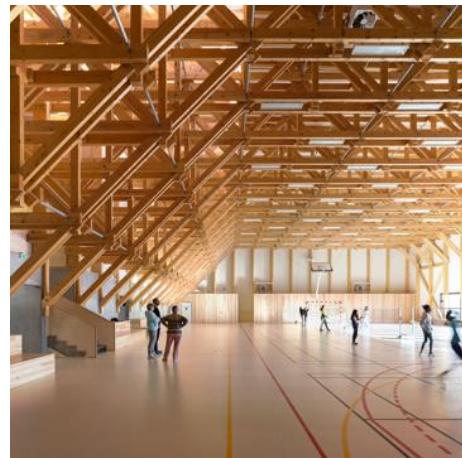


Figure 16 : Gymnase Jean Lamour, Nancy (54)



Figure 17 : Gymnase Lycée professionnel
Victor Laloux, Tours (37)



Figure 18 : Gymnase, Kristiansand (Norvège)



Figures 19 et 20 : Halle d'entraînement, Davos (Suisse)





Figures 21 et 22 : Hall sportif couvert du lycée Félix Eboué, Cayenne (973)



Figure 23 : Stade Telus-Université de Laval,
Québec (Canada)



Figure 24 : Gymnase du lycée Melkior-Garré,
Cayenne (973)

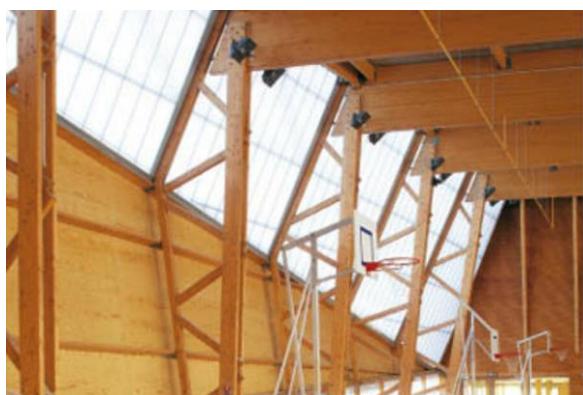


Figure 25 : Gymnase Alice Milliat,
Forges-les-Bains (91)



Figure 26 : Stade Allianz Riviera, Nice (06)

ii. Première modélisation

Une fois la liste des modèles à réaliser déterminée, j'ai choisi un premier modèle, en l'occurrence le portique treillis Pratt. J'ai débuté un premier essai de modélisation, que j'analyserai par la suite pour déterminer s'il y a des modifications à prendre en considération dans la manière de modéliser ou dans le processus de modélisation.

c. Modélisation de l'ensemble des charpentes étudiées sur Grasshopper en fonction de paramètres

La première étape a consisté à reproduire simplement la géométrie du portique choisi sur Rhino. On sait déjà que par la suite on va chercher à générer des variations de ce premier modèle, que ce soit avec des dimensions variées, ou avec des géométries proches avec seulement quelques différences. Ainsi, il paraît pertinent de recourir à une modélisation paramétrique donc en utilisant Grasshopper, plutôt que dans Rhino directement. Ainsi, je vais par la suite interagir avec le modèle via ses paramètres, définis et utilisés dans l'environnement de programmation Grasshopper, plutôt que dans l'espace tridimensionnel modélisé dans l'onglet perspective de Rhino, ou dans une autre des vues bidimensionnelles. J'interagis ainsi de manière plus précise avec les paramètres et positions de la géométrie.

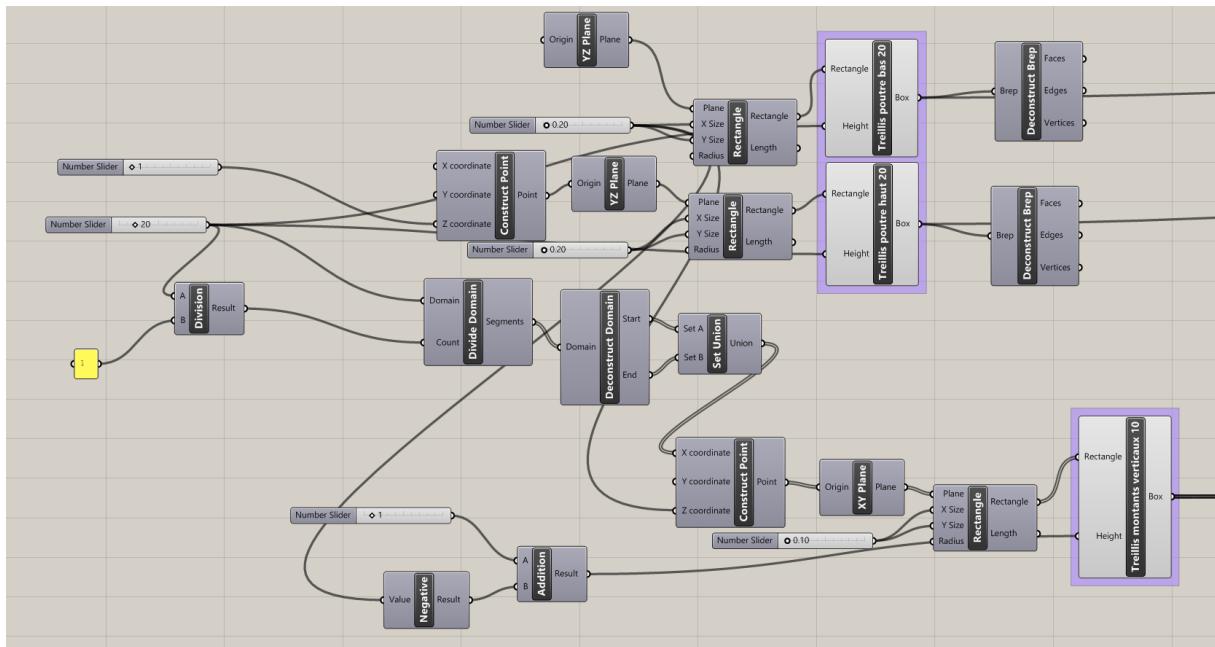


Figure 27 : Modélisation d'un treillis Pratt sur Grasshopper en fonction des paramètres d'entrée

La seconde étape a consisté à assembler les blocs permettant de réaliser l'analyse structurelle de chacun des portiques en fonction des paramètres d'entrée qui sont ceux préalablement définis et représentés dans Grasshopper à l'étape précédente. Les caractéristiques déterminées à cette étape sont les dimensions des sections d'éléments de poutre. Pour cela, j'ai conditionné le modèle à respecter une déformation maximale autorisée et à optimiser les sections pour fournir celle la plus adaptée parmi une liste de sections que j'ai définies.

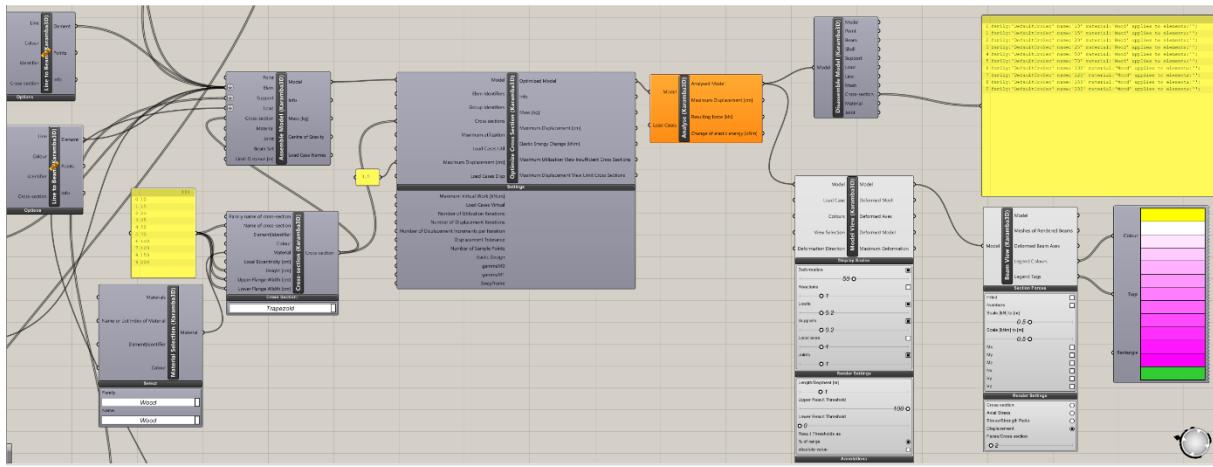
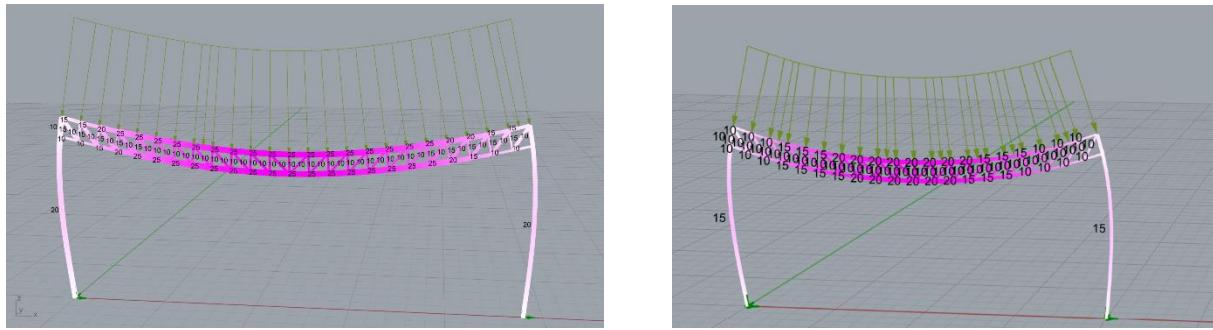


Figure 28 : Assemblage de blocs permettant de réaliser l'analyse structurelle sur Karamba



Figures 29 et 30 : Adaptation du dimensionnement des éléments structurels après analyse structurelle lorsque la dimension de la portée d'une même typologie de structure et d'une même matérialité a été modifiée

L'étape suivante a été de modéliser les structures obtenues dans Revit : soit « manuellement », en créant des éléments dans Revit à partir des dimensionnements déterminés par Karamba ; soit d'une manière qui automatise davantage le processus, en utilisant Rhino inside Revit.

L'intérêt de Rhino inside Revit est de pouvoir ouvrir le fichier Rhino-Grasshopper dans Revit directement. Et, grâce à des blocs dans Grasshopper spécifiques à Revit, de pouvoir modéliser les éléments directement dans Revit.

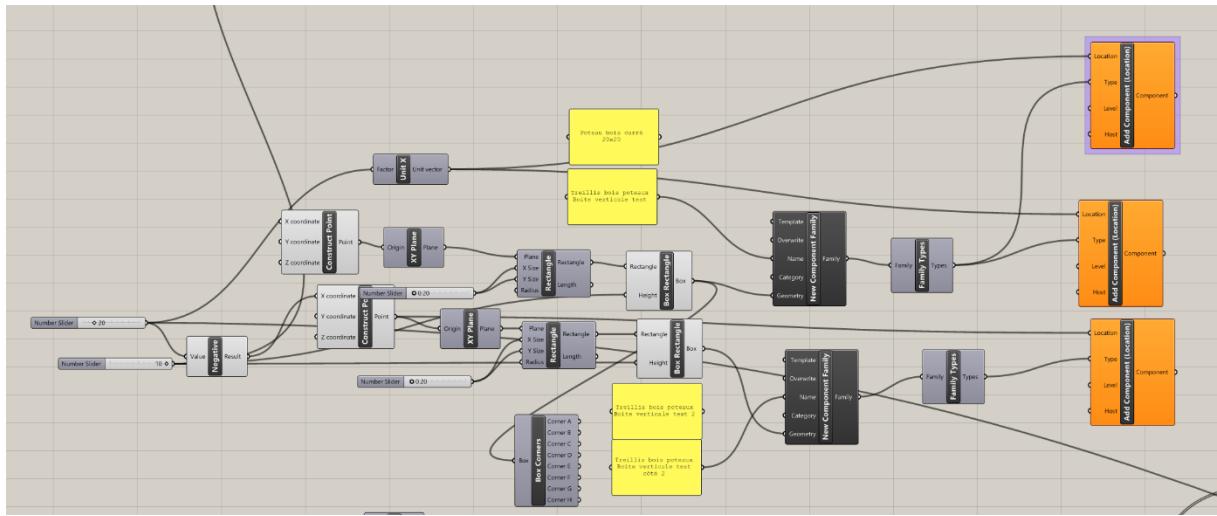


Figure 31 : Modélisation d'une partie du portique dans Rhino inside Revit à partir des paramètres d'entrée

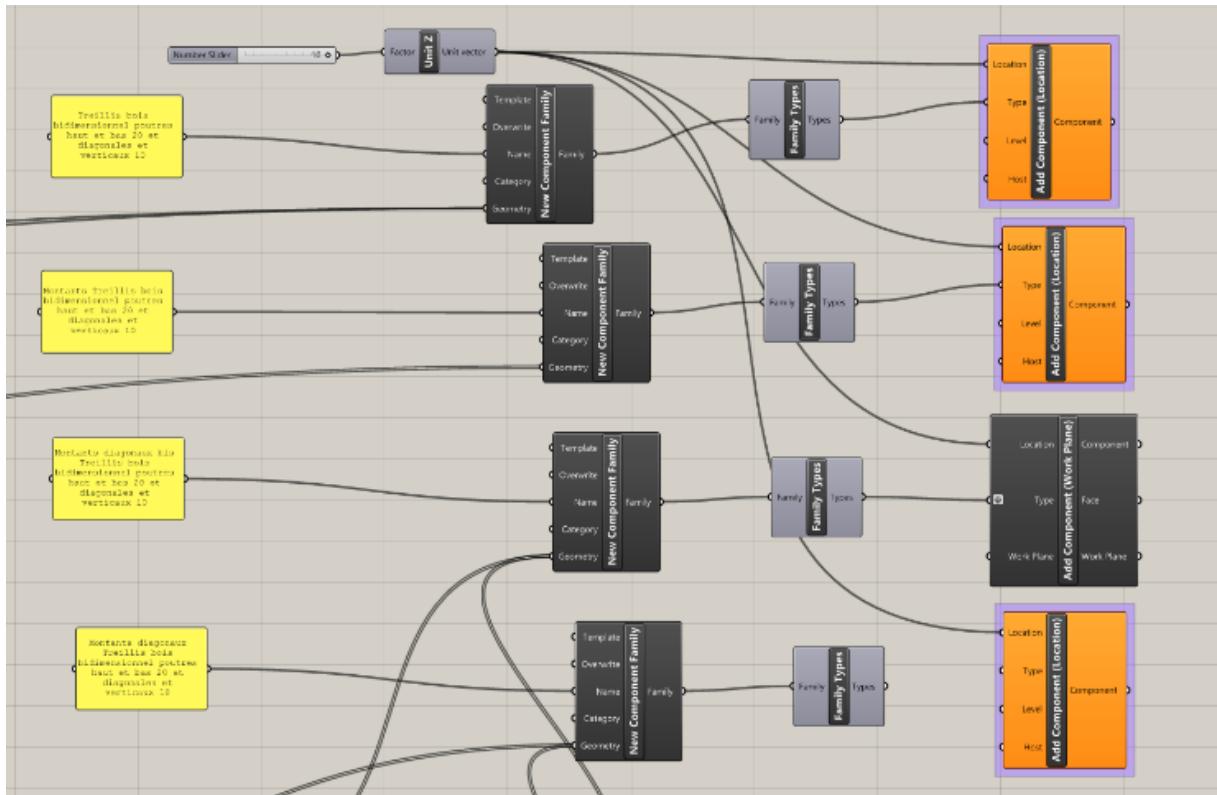


Figure 32 : Modélisation de la seconde partie du portique dans Rhino inside Revit à partir des paramètres d'entrée

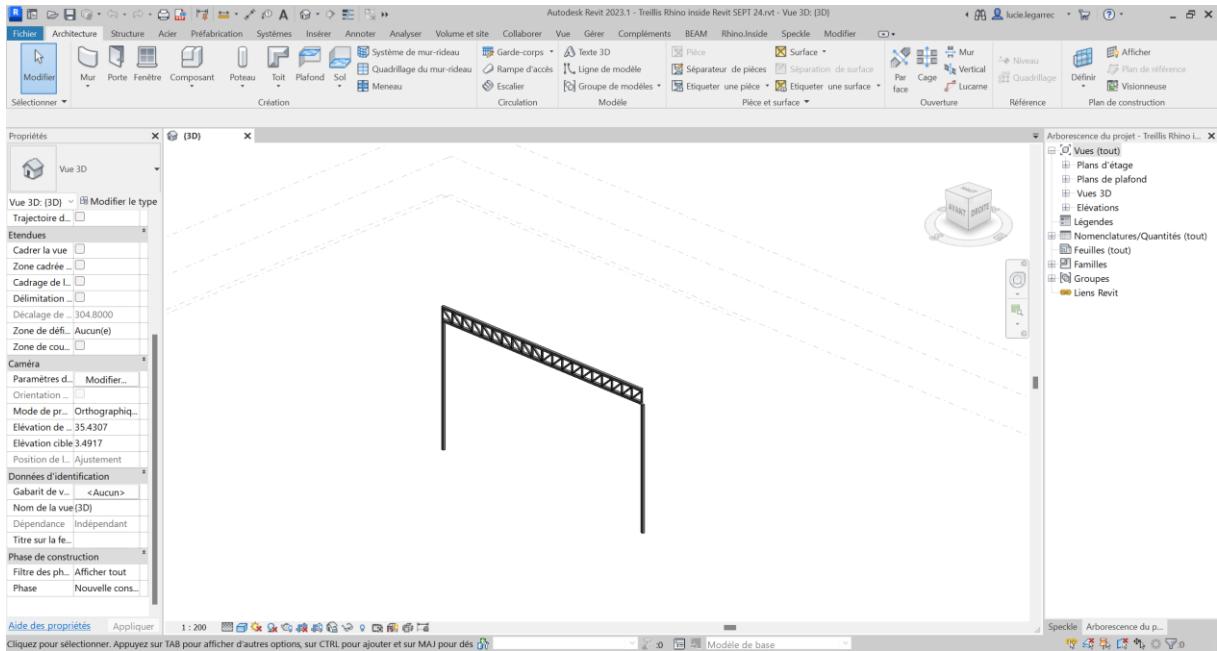


Figure 33 : Interface de Revit contenant le projet modélisé grâce à Rhino inside Revit

L'étape suivante a consisté à exporter le modèle créé dans Revit soit vers Pleiades au format gbXML, soit vers le connecteur Speckle pour ensuite le transférer vers Reduzer. En effet, le logiciel Reduzer nécessite l'utilisation d'un outil intermédiaire pour transférer la géométrie d'un modèle BIM depuis Revit vers Reduzer.

La dernière étape concerne l'analyse environnementale. J'ai associé un matériau caractérisé par sa Fiche de Déclaration Environnementale et Sanitaire à chacun des éléments des différentes structures pour déterminer les valeurs d'émissions de CO₂ de chacune des structures dans les logiciels d'ACV. En relevant les valeurs obtenues pour chacune des typologies, matérialités et portées évoquées, j'ai ainsi pu obtenir des graphes présentant les résultats de la comparaison.

5. Résultats obtenus

Enfin, j'ai analysé les résultats obtenus après réalisation de l'expérience. Il s'agit notamment, pour chaque matériau étudié :

- D'analyser la fiabilité de la modélisation par rapport à la réalité
- De comparer les hypothèses simplificatrices considérées dans chaque cas
- De comparer les résultats obtenus avec chaque logiciel utilisé (structure et environnement)
- De comparer les résultats obtenus par l'expérience à une source de connaissance externe, en l'occurrence des données structurelles et environnementales issues de recherches publiées ou de prédimensionnement manuel

a. Méthodologie d'analyse des résultats

Les résultats analysés proviennent de l'expérience menée. La nature des résultats obtenus est un ensemble de valeurs d'émissions de CO₂, exprimés en kilogrammes de CO₂ équivalents (kgCO₂eq.).

Une fois ces résultats récupérés après la modélisation de chaque cas d'étude, c'est-à-dire de chaque typologie de charpente, de chaque portée et hauteur, et de chaque matérialité de charpente étudiées, j'ai cherché à les comparer à des valeurs de référence pour déterminer le niveau de fiabilité des valeurs obtenues. En effet, j'ai cherché à déterminer si la modélisation réalisée permettait d'obtenir des valeurs d'émissions de CO₂ de la structure de portique qui sont justes et exploitables par le concepteur dans une démarche de maîtrise des émissions de CO₂ d'un projet en phase conception. J'ai ainsi cherché à déterminer si l'hypothèse de départ, selon laquelle le processus de modélisation défini permet une obtention de résultats dont l'ordre de grandeur est fiable malgré une précision qui s'éloigne de la réalité, était vérifiée.

Pour parvenir à déterminer cette fiabilité ou non de l'expérience, et étant donné les simplifications considérées par rapport à une situation réelle, je souhaite comparer les valeurs obtenues par l'expérimentation à des valeurs objectives. Des valeurs issues de recherches ou rapports publiés et considérant la structure d'un bâtiment dans son ensemble, incluant notamment les assemblages, seront considérées comme une source de données fiable et un support acceptable de comparaison. En effet, ce type de document limite les simplifications pour effectuer une étude du bâtiment prenant en compte du mieux possible sa complexité et les différentes couches d'éléments à considérer. Les logiciels utilisés dans ces cas sont également plus développés et l'étude globale plus approfondie.

Je souhaite dans un premier temps comparer chaque situation étudiée avec un corpus de structures équivalentes ou de bâtiment aux structures équivalentes respectivement à chacun des cas. N'ayant pas trouvé de tel document, j'ai constitué mon propre corpus à partir des données disponibles.

Le corpus est constitué des rapports ACV de certains projets conçus et construits. Ces rapports sont, pour certains, rendus publics par une des parties du projet.

Afin de comparer des données comparables, j'ai procédé dans un premier temps à une analyse des données de ces rapports. J'ai isolé d'une part les données environnementales qui concernent la structure seule. Puis j'ai ramené la valeur obtenue à la charge portée par la structure, afin de pouvoir la comparer avec la structure modélisée par ailleurs, qui a été conçue avec une charge différente. J'obtiens ainsi une valeur d'émissions de CO₂ en kgCO₂eq./m²/kN.

b. Analyse des résultats

i. Avec le corpus de bâtiments présenté précédemment

J'ai commencé par recenser l'ensemble des informations environnementales pertinentes dans le cadre de ce mémoire et disponibles respectivement pour chacun des projets d'études identifiés en partie 4.b.i.

Structures en bois :

Collège et gymnase, Rumilly (74)

BET Environnement : Etamine

Architecte : AER Architectes

Année de réalisation : 2018

Equipement sportif, Arc-et-Senans (25)

HQE : BELLUCCI

Architecte : ARCHI.TECH

Année de réalisation : 2019

Hall sportif, Papaïchton (973)

Emissions de GES en phase d'usage : 1,70 kgCO₂/m²/an⁷

Objectif RT 2012

Architecte : Franck Brasselet, JAG – Jungle Architecture Group

Année de réalisation : 2023⁸

Grand Palais Ephémère, Paris (75)

⁷ (Hall sportif et salle polyvalente de Papaïchton, 2024)

⁸ Les données indiquées **en gras** indiquent une date de réalisation du projet postérieure à la mise en application de la réglementation environnementale RE2020. Les valeurs d'émissions de CO₂ alors déterminées sont dans ces cas-là plus souvent en accord avec la méthodologie de calcul en vigueur depuis 2022. Ce sont donc les valeurs les plus pertinentes dans le cadre de ce mémoire. Néanmoins, pour élargir le panel de données disponibles, j'ai parfois élargi les données recueillies à celles parues avant 2022, d'où la nécessité de relever l'année de réalisation de chacun des projets considérés.

Bilan carbone restreint : 11 767 t CO₂⁹

Date de publication : 2016

Rédacteur du rapport : Service Hygiène Sécurité Environnement de la Réunion des musées nationaux et du Grand Palais (Rmn-GP)

Architecte : Wilmotte & associés

Ce premier recueil de données m'a montré que ce qui est mentionné dans de nombreux documents est l'empreinte ou bilan carbone, et non pas la démarche d'analyse du cycle de vie dans son ensemble. La différence entre les deux réside dans la multiplicité des indicateurs environnementaux pris en compte dans le cadre de l'ACV notamment. Le bilan carbone ne considère donc pas l'impact environnemental de certains éléments. Au moment de la mise en parallèle et de la comparaison des valeurs obtenues par l'expérience et de celles extraites des documents publiés, je prendrai soin d'identifier avec précision le type de valeur considéré dans chaque cas.

De plus, les dates de publication sont d'autant plus importantes que la réglementation environnementale dans le secteur du bâtiment a beaucoup évolué ces dix dernières années, passant d'une étude facultative à une étude guidée puis obligatoire et normalisée. Les critères de réalisation de ces études ne sont donc pas les mêmes avant 2016, entre 2016 et 2020 et après 2020 par exemple. Les sources d'émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) et le type de GES considérés ne sont pas nécessairement les mêmes non plus. Afin de s'assurer de comparer des éléments comparables, je m'assurerai de répertorier pour chaque document du corpus les informations nécessaires à sa classification et à son identification dans le contexte de réalisation de ces documents.

Gymnase Jean Lamour, Nancy (54)

Année de réalisation : **2023**

Architecte : Collectif Studiolada

Privilégie le bois, produit localement, plus que l'empreinte carbone en particulier

Gymnase Lycée professionnel Victor Laloux, Tours (37)

Année de réalisation : 2012 ?

Architecte : Chomette-Lupi et associés architectes

Gymnase, Kristiansand (Norvège)

Halle d'entraînement, Davos (Suisse)

Architecte : Fanzun AG

Année de réalisation : 2018

⁹ (Réunion_des_Musées_Nationaux_et_de_Grand_Palais, 2016)

Hall sportif couvert du lycée Felix Eboué, Cayenne (973)

Architecte : ACAPA Architecture

Année de livraison : 2004

Stade Telus-Université de Laval, Québec (Canada)

Architecte : ABCP et Coarchitecture

Année de livraison : 2011

Gymnase du lycée Melkior-Garré, Cayenne (973)

Gymnase Alice Milliat, Forges-les-Bains (91)

Année de réalisation : 2010

Stade Allianz Riviera, Nice (06)

Architecte : Wilmotte & associés

Année de réalisation : 2013

J'ai constaté dans un premier temps que la plupart des projets sélectionnés ont été réalisés avant 2020, et même avant 2016, donc avant la mise en place de la RE2020 et même du label E+C-, qui était facultatif et avait pour ambition de préparer les acteurs du bâtiment à la transition vers la normalisation de la prise en compte des émissions carbone notamment. Les projets qui se trouvent dans ce cas n'étaient donc pas soumis à l'obligation de fournir des mesures de leur impact environnemental, donc les documents manquent et les projets n'apparaissent pas pertinents pour la comparaison avec l'expérience menée.

J'ai donc restreint ce corpus aux seuls bâtiments pour lesquels je dispose des informations nécessaires à l'analyse et la comparaison avec l'expérience réalisée. Et je l'ai complété avec d'autres projets, pour lesquels je dispose cette fois de données sur l'impact environnemental de la structure.

ii. En élargissant le corpus à davantage de bâtiment pour combler le manque de données sur les bâtiments identifiés précédemment

Gymnase LEGTA, Le Chaffaut Saint Jurson (04)¹⁰

Architecte : Marie Garcin & Gilles Coromp

Année de livraison : 2016

Emissions gaz à effet de serre (GES) Construction et équipements : 1181 kgCO2/m² pour la construction et les équipements uniquement (hors énergie, eau et chantier)

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 159 kgCO2/m².SdP

¹⁰ (Gymnase LEGTA, 2024)

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : 208 kgCO₂/m².SdP)

Méthodologie de réalisation de l'étude : E+C-

Murs à ossature bois et murs en béton

Multi-accueil de la Vallée Verte, La Roche sur Yon (85)¹¹

Mais il ne s'agit pas d'un ouvrage de grande portée comme les gymnases qui constituent le premier corpus

En revanche, un rapport ACV complet et disponible et permet d'identifier la part des émissions de la structure par rapport au reste des éléments du bâtiment

Architecte : Pelleau & associés architectes

Emissions GES Construction et équipements : 1426 kgCO₂/m².SdP

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 100,70 kgCO₂/m².SdP

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : 73,19 kgCO₂/m².SdP)

Le rapport ACV disponible pour cette référence permet d'accéder à davantage de données concernant l'empreinte carbone du bâtiment. Cela permet, contrairement aux données qui concernent les autres références étudiées, de déterminer précisément les éléments dont les émissions sont considérées et les valeurs associées. Ainsi, ce rapport ACV donne le détail des éléments pris en compte pour le calcul des émissions GES des lots maçonnerie, superstructure et couverture, charpente, étanchéité. En s'intéressant au détail de ces deux lots, il apparaît que les dalles, le bardage et l'isolation sont pris en compte dans le premier lot et la couverture zinc, l'étanchéité et l'évacuation des eaux pluviales sont prises en compte dans le deuxième lot. Mais la structure principale n'apparaît pas dans les sources des émissions de GES. En effet, l'annexe III, située à la fin du rapport ACV en page 77, indique que la charpente et l'ossature bois font partie des éléments non pris en compte dans l'étude. Il n'est pas mentionné de raison pour lesquelles ces valeurs ne sont pas renseignées et donc pas prises en compte dans le calcul des émissions de GES. Cette constatation remet en question la pertinence des valeurs d'émission de GES des deux lots considérés et mentionnées dans ce rapport.

Gymnase Irène Popard – Ilot E3D ZAC Montjoie, Saint-Denis (93)

Mais pas de rapport ACV publié

Architecte : Atelier Novembre

Maison individuelle, Montfort le Gesnois (72)¹²

Mur à ossature et charpente bois

¹¹ (Calcul de la performance Environnementale par étude ACV, 2018)

¹² (Calcul de la performance environnementale par étude ACV, 2018)

Mais maison individuelle donc dimensions, portée et charges différentes

Année de réalisation : 2018

Les premières recherches m'ont amenée à constater que peu de rapports d'Analyse du Cycle de Vie ont été publiés et sont disponibles pour consultation par le grand public. Néanmoins, certaines données concernant l'empreinte carbone de projets sont regroupées et mises à disposition des concepteurs sur l'Observatoire BBC¹³, outil créé en 2009 à l'initiative du Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, de l'ADEME¹⁴ et de l'association Effinergie.

Cette base de données sur les bâtiments basse consommation recense des informations telles que la consommation énergétique, l'isolation thermique des différentes parties du système constructif, les émissions de GES de chaque lot constructif et les labels éventuellement reçus pour les performances atteintes.

Les avantages de cette base de données sont le regroupement de références réparties sur l'ensemble du territoire métropolitain français et la diversité de typologies fonctionnelles représentées. Néanmoins, si la plupart des projets répertoriés sont présentés avec des données sur leurs performances énergétiques ou thermiques, moins nombreux sont ceux pour lesquels des données sur l'empreinte carbone sont présentes. Cela s'explique en partie par le fait que la base de données existe depuis 2009, c'est-à-dire avant le lancement de l'expérimentation du label E+C- sur l'empreinte carbone en 2016, et avant la réglementation RE2020. La base de données de références de projets pour lesquels les données sur l'empreinte carbone sont accessibles est donc beaucoup plus limitée.

D'autre part, les données sur les émissions carbonées présentes sur cette base de données concernent l'empreinte carbone, mais pas l'ensemble de la démarche d'Analyse du Cycle de Vie. Ces données sont donc partielles. Et les valeurs d'émissions fournies concernent les GES, mais sans précision nécessairement de la part que représente le CO2 dans ces émissions ni les autres GES considérés. Le manque de précision sur ces informations ajoute à la difficulté de s'assurer de comparer de manière fiable les valeurs.

Enfin, à l'image de ce qui a été constaté dans l'analyse du rapport ACV du projet de Multi-accueil de la Vallée Verte réalisée précédemment, le manque d'information concernant le détail des éléments pris en compte pour le calcul des émissions GES dont le résultat est mis à disposition sur le site de la base de données Observatoire BBC est également problématique. En effet, je ne peux pas m'assurer que les éléments de structure principale et charpente sont bien pris en compte et ne sont pas exclus. S'ils s'avéraient être exclus, cela remettrait en question la pertinence de l'utilisation de ces valeurs comme valeurs de référence auxquelles comparer les résultats acquis par l'expérience de modélisation.

Pour la suite du travail, je fais l'hypothèse que la contribution de la structure principale et de la charpente sont bien pris en compte dans les valeurs d'émissions de GES fournies par la base de données Observatoire BBC. J'émet néanmoins une réserve sur le fait que, dans le cas où cela s'avèrerait ne pas être le cas, la comparaison serait à revoir.

¹³ (Observatoire BBC, 2024)

¹⁴ Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie – Agence de la transition écologique

Pour poursuivre mon analyse, j'ai commencé par collecter les données environnementales, dimensionnelles et typologiques des références qui paraissent pertinentes au regard du sujet.

Références de la base de données Observatoire BBC qui disposent de données sur l'empreinte carbone et d'une typologie structurelle qui se rapproche de celles étudiées dans le cadre de ce mémoire :

- Sport :

Complexe sportif, Vincennes (94)¹⁵

Année de livraison : 2024

Structure : murs béton, poteaux bétons, ossature métallique ; Typologie : poteau-poutre

Emissions GES Construction et équipements : 1036 kgCO₂/m².SdP

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 418 kgCO₂/m².SdP

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : 67 kgCO₂/m².SdP)

Architecte : Agence Engasser et associés

Salle d'activités physiques artistiques :

Portée : 15m ; Nombre de portiques : 12 ; Hauteur : environ 8m

Salle multisports :

Portée : 21m ; Nombre de portiques : 20 ; Hauteur : environ 8m

Gymnase :

Portée : 27m ; Nombre de portiques : 26 ; Hauteur : environ 8m

Gymnase, Muttersholtz (67)¹⁶

Année de livraison : 2015

Structure : ossature bois

Emissions GES : « calcul en cours »

- Equipement social ou culturel :

Salle communale, Volesvres (71)¹⁷

Année de livraison : 2019

¹⁵ (Complexe sportif, 2024)

¹⁶ (Gymnase de Muttersholtz, 2024)

¹⁷ (Salle communale, 2024)

Structure : murs caissons paille et charpente métallique

Emissions GES Construction et équipements : 787 kgCO₂/m².SdP

Emissions GES Lots structure : pas de détail

Maison des associations, Palazinges (19)¹⁸

Année de livraison : 2019

Structure : murs ossature bois et charpente bois ; Typologie : treillis double pente

Emissions GES Construction et équipements : 707 kgCO₂/m².SdP

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 118 kgCO₂/m².SdP

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : 41 kgCO₂/m².SdP)

Architecte : Patrick Dartigeas

Portée : entre 10 et 14m ; Nombre de portiques : 7 ; Hauteur sous entrait : environ 5m ;
Hauteur maximale : environ 8m

Bâtiment du port de Calais, Calais (62)¹⁹

Année de livraison : 2020

Structure : poteaux béton et structure métallique

Emissions GES Construction et équipements : pas de détail

- Industrie :

Atelier de tissage, Uzein (64)²⁰

Année de livraison : 2024

Structure : ossature métallique

Emissions GES Construction et équipements : 307 kgCO₂/m².SdP

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 98 kgCO₂/m².SdP

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : lot pas mentionné)

Difficile de trouver des données, images et autres documents graphiques sur le projet pour pouvoir déterminer la hauteur, la portée et le nombre de portiques notamment

¹⁸ (Maison des Associations, 2024)

¹⁹ (Bâtiment Port de Calais, 2024)

²⁰ (Atelier de Tissage, 2024)

Plateforme logistique Fondeyre, Toulouse (31)²¹

Année de livraison : 2021

Structure : ossature métallique ; Typologie : treillis

Emissions GES Construction et équipements : 862 ou 873 kgCO₂/m².SdP (deux valeurs indiquées)

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 101 kgCO₂/m².SdP

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : 210 kgCO₂/m².SdP)

Architecte : Agence Experience (Tristan Chadney, Laurent Esmilaire, Eric Lapierre)

Portée : 45m avec débord de toiture d'environ 6m ; Nombre de portiques : 18 sur chacun des 2 bâtiments donc 36 au total ; Hauteur sous treillis : environ 8m ; Hauteur du treillis : environ 3m²²

Atelier portuaire, Honfleur (14)²³

Année de livraison : 2021

Structure : ossature métallique et bois

Emissions GES Construction et équipements : 1022 ou 1031 kgCO₂/m².SdP (deux valeurs indiquées)

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 57 kgCO₂/m².SdP

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : 106 kgCO₂/m².SdP)

Architecte : Exo architectes

Peu de données et de documents graphiques disponibles pour déterminer avec certitude la typologie de structure

Ateliers Avenir, Verneuil-sur-Halatte (60)²⁴

Année de livraison : 2021

Structure : poteaux béton, ossature métallique

Emissions GES Construction et équipements : 888 ou 914 kgCO₂/m².SdP (deux valeurs indiquées)

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 83 kgCO₂/m².SdP

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : 102 kgCO₂/m².SdP)

²¹ (Plateforme logistique, 2024)

²² (Plateforme logistique de Toulouse Fondeyre, un projet d'Experience, 2024)

²³ (Atelier Portuaire, 2024)

²⁴ (Ateliers Avenir, 2024)

Architecte : ORY Architecture

Centre de contrôle qualité – Sarouleagain, Vemars (95)²⁵

Année de livraison : 2017

Structure : ossature métallique et béton

Emissions GES Construction et équipements : 738 ou 761 kgCO₂/m².SdP (deux valeurs indiquées)

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 126 kgCO₂/m².SdP

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : 76 kgCO₂/m².SdP)

Architecte : GBL Architectes

- Commerce :

Ressourcerie, Gex (01)²⁶

Année de livraison : 2021

Structure : ossature bois

Emissions GES Construction et équipements : 683 ou 687 kgCO₂/m².SdP (deux valeurs indiquées)

Emissions GES Lot maçonnerie et superstructure : 59 kgCO₂/m².SdP

(Emissions GES Lot Couverture, charpente et étanchéité : 63 kgCO₂/m².SdP)

Architecte : AA Group

iii. Corpus finalement constitué

Au regard des analyses précédemment faites sur les références et données disponibles, j'ai délimité un corpus final. J'ai laissé de côté les références qui, bien qu'ayant une typologie structurelle analogue à celles étudiées dans le cadre de ce mémoire, disposent de pas ou peu de données sur l'empreinte carbone, notamment lorsque les données fournies sont partielles et ne permettent pas d'identifier la part de la structure dans les émissions globales du projet. Les références finalement conservées pour constituer le corpus sont les suivantes :

- Complexe sportif, Vincennes (94)²⁷
- Maison des associations, Palazinges (19)²⁸

²⁵ (Centre de contrôle qualité - Sarouleagain, 2024)

²⁶ (Ressourcerie, 2024)

²⁷ (Complexe sportif, 2024)

²⁸ (Maison des Associations, 2024)

- Plateforme logistique Fondeyre, Toulouse (31)²⁹
- Gymnase LEGTA, Le Chaffaut Saint Jurson (04)³⁰
- Multi-accueil de la Vallée Verte, La Roche sur Yon (85)³¹

Concernant l'aspect environnemental, le projet de Multi-accueil de la Vallée Verte est le seul pour lequel un rapport ACV complet est disponible. Les autres projets sont décrits uniquement par des valeurs d'empreinte carbone.



Figures 34 et 35 : Complexe sportif, Vincennes (92)



Figure 36 : Plan du complexe sportif, Vincennes (92)



Figure 37 : Maison des associations,

Palazinges (19)

²⁹ (Plateforme logistique, 2024)

³⁰ (Gymnase LEGTA, 2024)

³¹ (Calcul de la performance Environnementale par étude ACV, 2018)



Figures 38 et 39 : Plateforme logistique Fondeyre, Toulouse (31)



Figures 40 et 41 : Gymnase LEGTA Carmejane, Le Chaffaut Saint Jurson (04)



Figure 42 : Multi-accueil La Vallée Verte, La Roche sur Yon (85)

iv. Résultats finaux

J'ai ensuite comparé les résultats obtenus par l'expérience avec les valeurs des références qui constituent le corpus. J'ai analysé dans un premier temps chacun des groupes de données récoltées : d'une part les données issues de l'expérience et d'autre part celles issues de l'analyse du corpus de références. La charge appliquée à la structure pour les modélisations de l'expérience retenue est : 4,5 kN/m².

Type de structure	Représentation (image de la modélisation)	Portée	Hauteur du portique	Matérialité	Dimensionnement	Emissions de CO2 Reduzer	Emissions de CO2 Pleiades
Poteau poutre		20m	10m	Bois			
				Béton			
				Acier			
		24m	9m	Bois			
		15m	8m	Béton, acier			
		21m	8m	Béton, acier			
Treillis Pratt		20m	Sous treillis : 10m Hauteur max : 11m	Bois		9,2 kgCO2/m ²	
				Béton			
				Acier		2600 kgCO2/m ²	
		45m	Sous treillis : 8m Treillis inclus : 11m	Acier			
Treillis double pente		20m	Sous entrant : 10m Hauteur max : 11m	Bois		5,8 kgCO2/m ²	
				Béton			
				Acier		2900 kgCO2/m ²	
		12m	Sous entrant : 5m Hauteur max : 8m	Bois			

Treillis monopente		20m	Sous entrait : 10m Hauteur max : 11m	Bois		118 kgCO2/m ²	
				Béton			
				Acier		51500 kgCO2/m ²	
Arc treillis Pratt		20m	10m	Bois			
				Béton			
				Acier			
Arc treillis Pratt avec débord de toiture de 3m		20m	Sous treillis : 10m Hauteur max : 11m	Bois		13,2 kgCO2/m ²	
				Béton			
				Acier		2800 kgCO2/m ²	
Arc âme pleine		20m	10m	Bois		223 kgCO2/m ²	
				Béton		4000 kgCO2/m ²	
				Acier			

Tableau 1 : Résultats obtenus par l'expérience de modélisation de portiques dans le but de croiser les caractéristiques typologiques, structurelles et environnementales

Nom du projet	Typologie structurelle	Matérialité de la structure	Portée	Hauteur	Nombre de portiques	Emissions de GES totales	Emissions de GES de la structure	Emissions de la structure par rapport aux émissions totales (en %)
Complexe sportif	Salle activités : poteau-poutre	Béton, acier	15m	8m	12	1036 kgCO2/m ²	485 kgCO2/m ²	
	Salle multisports : poteau-poutre	Béton, acier	21m	8m	20			
	Gymnase : poteau-poutre	Béton, acier	27m	8m	26			
	Autres salles							

Maison des associations	Treillis double pente	Bois	10 à 14m	Sous entrait : 5m Hauteur max : 8m	7	707 kgCO2/m ²	159 kgCO2/m ²	
Plateforme logistique Fondeyre	Treillis	Acier	45m	Sous treillis : 8m Treillis inclus : 11m	18	862 kgCO2/m ²	311 kgCO2/m ²	
Gymnase LEGTA	Poteau-poutre ³²	Bois	24m	8 à 10m	13	1181 kgCO2/m ²	367 kgCO2/m ²	
Multi-accueil de la Vallée Verte						1426 kgCO2/m ²		

Tableau 2 : Résultats obtenus en comparant les données typologiques, structurelles et environnementales du corpus de références défini

J'ai ensuite mis en parallèle chaque situation d'expérience avec la référence qui lui ressemble le plus en termes de typologie de structure. Et j'ai déterminé l'écart des émissions de CO2 entre les deux situations.

Pour comparer des situations comparables, j'ai ramené les valeurs obtenues à la charge supportée par la structure. Pour mémoire, la charge considérée pour réaliser l'expérience était de 4,5 kN/m².

Néanmoins, certaines structures des références étudiées sont des structures mixtes en termes de matérialité. Les mises en équivalences avec les typologies structurelles modélisées par l'expérience sont donc dans ces cas précis discutables puisqu'imprécises. Cela nécessiterait donc un cas d'étude supplémentaire, spécifique à la mixité de matérialité.

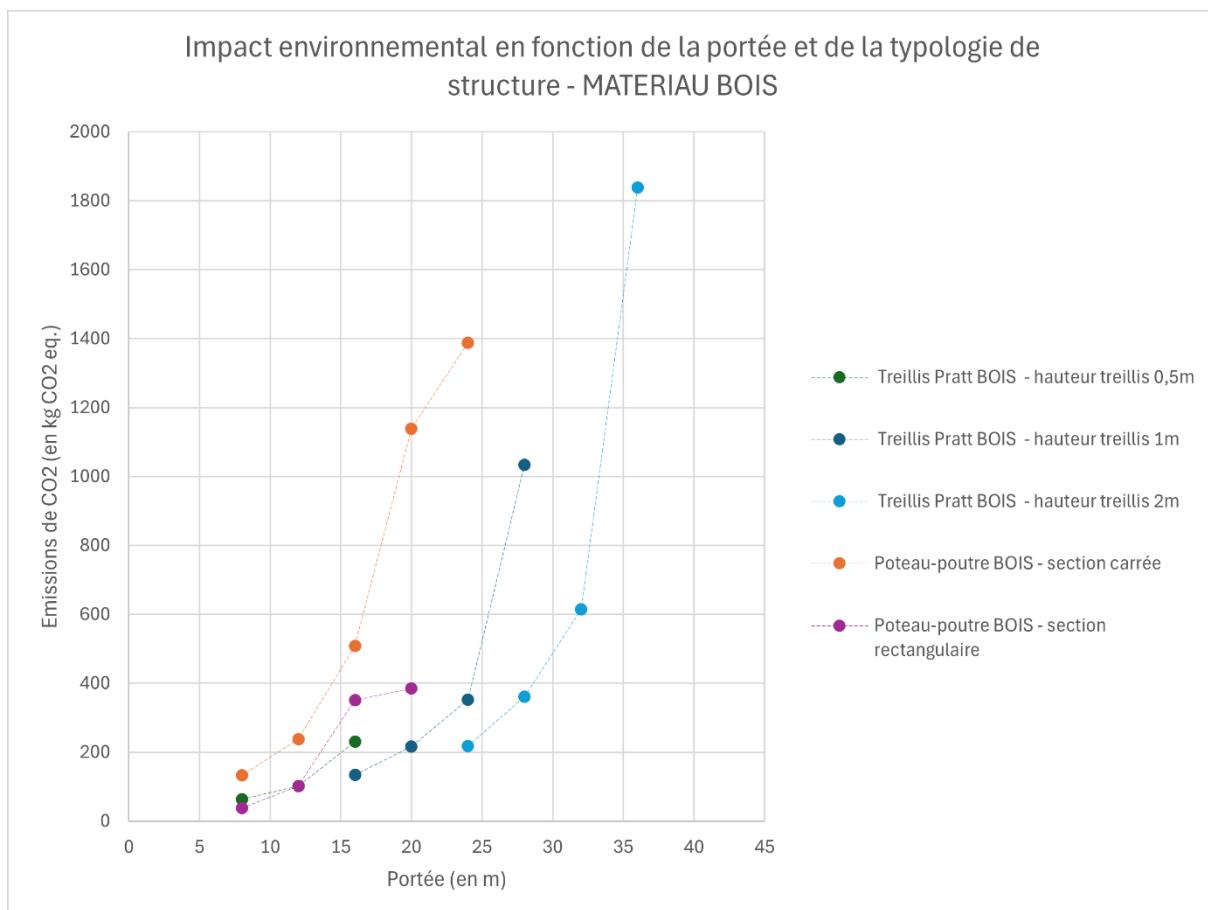
Type de structure	Représentation (image de la modélisation)	Nom du projet mis en équivalence	Matérialité	Emissions de GES de l'expérience par rapport à la charge	Emissions de GES de la référence par rapport à la charge	Emissions de GES de l'expérience et de la référence (en %)
Poteau poutre		Complexe sportif	Béton, acier			
		Gymnase LEGTA	Bois			

³² (Gymnase du LEGTA Carmejane / LE CHAFFAUT 04, 2024)

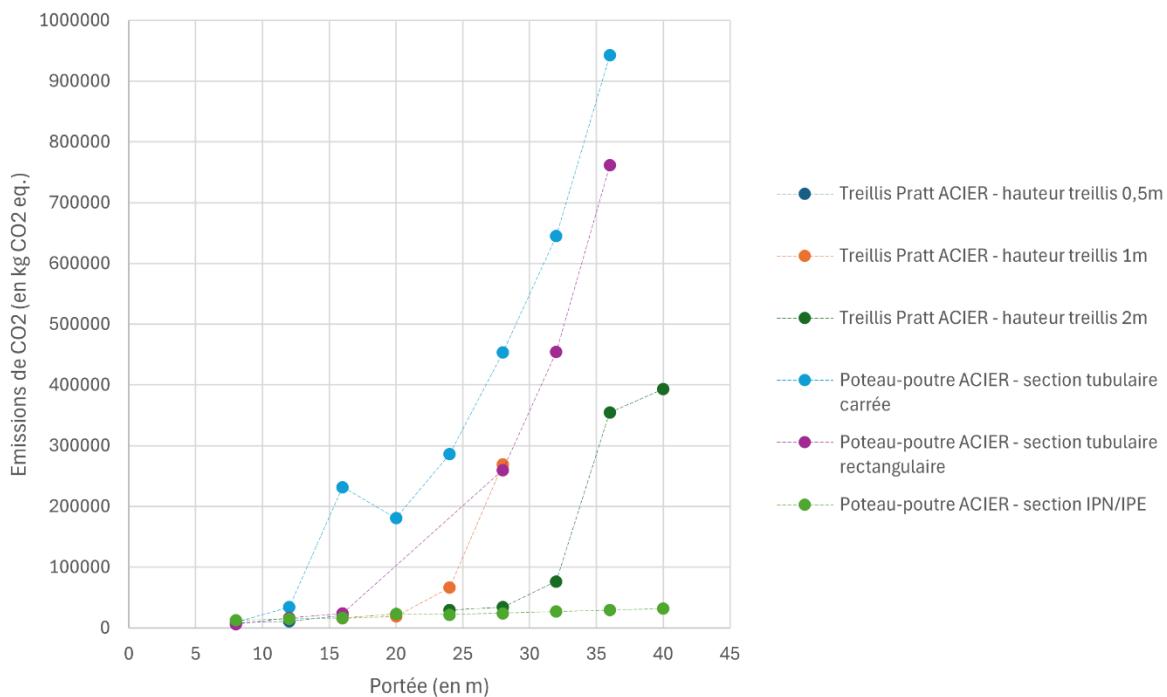
Treillis Pratt		Plateforme logistique Fondeyre	Acier			
Treillis double pente		Maison des associations	Bois	40,6 kgCO ₂ /m ²	159 kgCO ₂ /m ²	

Tableau 3 : Mise en équivalence des situations de portiques modélisés et de références de projets construits et répertoriés dans le corpus défini, dans le but de comparer leurs valeurs environnementales respectives et la fiabilité de la modélisation réalisée

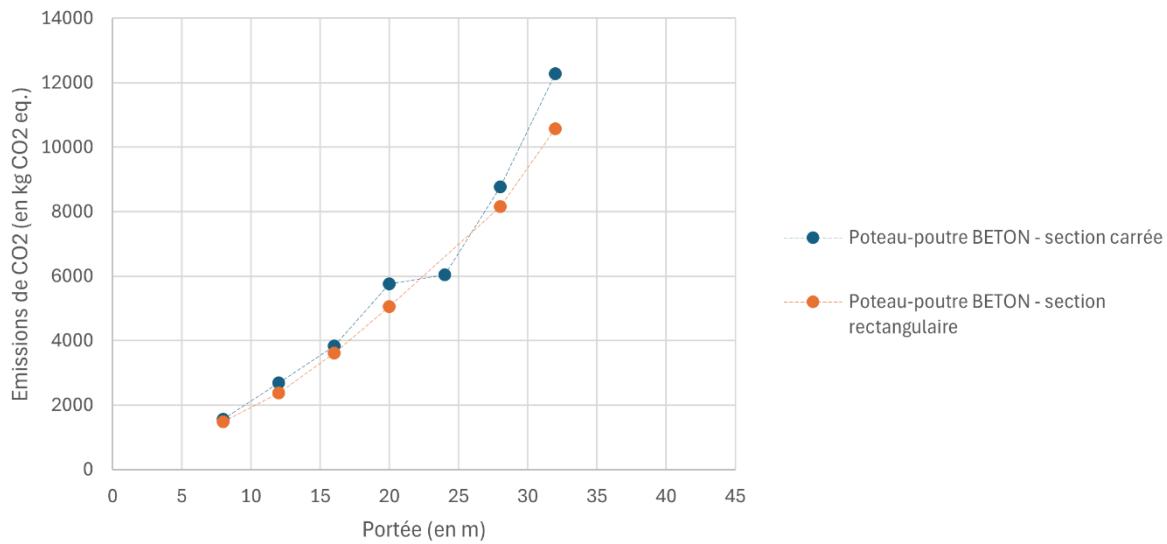
Finalement, les résultats obtenus après modélisation de chacune des typologies de structure en fonction de la portée et du matériau sont présentés sur les graphiques ci-dessous.



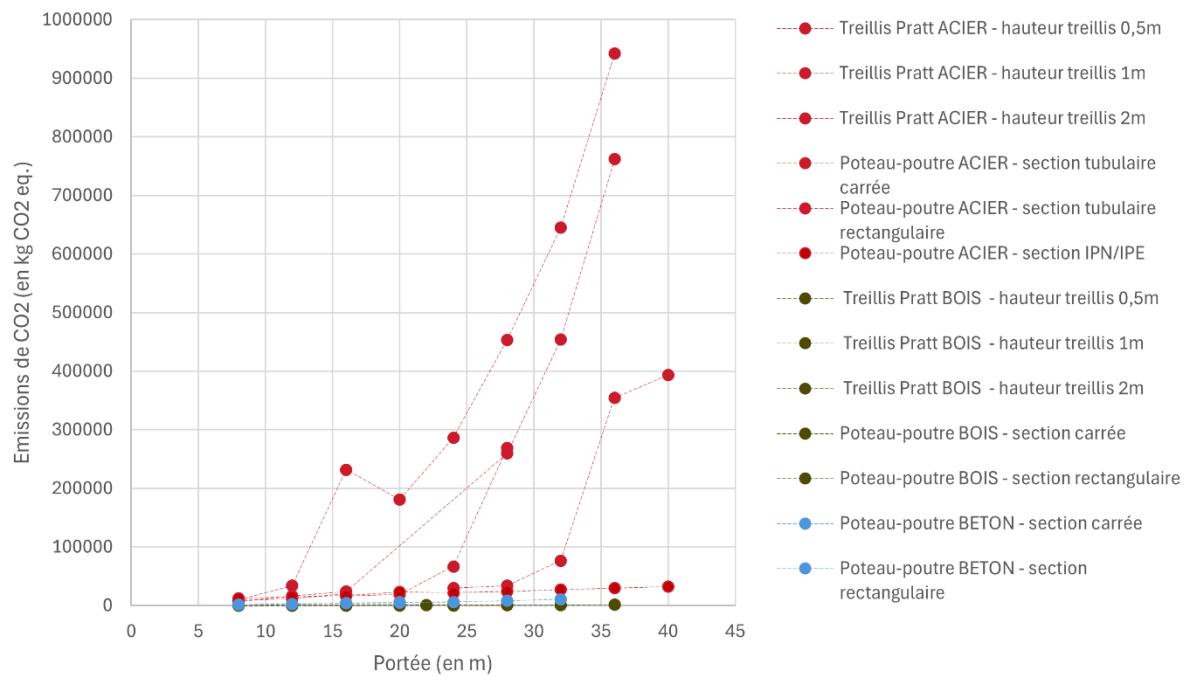
Impact environnemental en fonction de la portée et de la typologie de structure - MATERIAU ACIER



Impact environnemental en fonction de la portée et de la typologie de structure - MATERIAU BETON



Impact environnemental en fonction de la portée et de la typologie de structure - COMPARAISON DES MATERIAUX



6. Discussion

a. Analyse des résultats du point de vue environnemental

En s'intéressant dans un premier temps à la comparaison des typologies de structure d'un même matériau entre elles, on observe que les résultats des valeurs d'émissions donnent des performances environnementales qui reprennent le même classement que les performances structurelles de ces mêmes typologies de structure. En effet, les études structurelles permettent de déterminer la quantité de matériau nécessaire pour répondre aux exigences structurelles. Et les performances environnementales sont proportionnelles à la quantité de matériau dont on calcule les émissions pour chaque typologie de structure.

Il apparaît donc plus pertinent de s'intéresser à la comparaison des résultats obtenus pour chacun des matériaux par rapport aux autres. Le graphique qui présente ces résultats présente le bois comme le matériau avec le moins d'impact environnemental parmi les trois matériaux étudiés. L'une des hypothèses émises au début de la recherche est donc vérifiée. L'impact environnemental du béton apparaît légèrement supérieur à celui du bois. Enfin, les résultats concernant l'acier apparaissent particulièrement élevées par rapports aux autres matériaux. Ce résultat dont les valeurs sont surprenantes pourrait être erroné du fait d'une mauvaise modélisation, d'une modélisation trop simplifiée, ou d'une valeur unitaire d'émission de CO₂ erronée ou pas adaptée au cas d'étude. La comparaison entre l'intérêt environnemental d'un matériau à privilégier plutôt qu'un autre selon la portée sur laquelle le concepteur du projet travaille semble donc difficile à déterminer à partir de ces résultats.

Par ailleurs, l'un des objectifs de cette expérience était de voir si un matériau qui pouvait être très efficace du point de vue structurel, avec une très bonne résistance pour une quantité de matériau utilisé limité, était aussi intéressant du point de vue de son impact environnemental. Ou si au contraire, malgré une quantité de matériau utilisée plus faible que pour d'autres matériaux, les émissions de CO₂ étaient si élevées qu'elles rendaient ce matériau très polluant vis-à-vis du bénéfice structurel qu'il apporte.

Concernant les valeurs obtenues, une autre notion à prendre en compte est le référentiel de calcul des émissions. Ainsi, dans le cas du logiciel Pleiades, les différentes réglementations françaises de calcul d'analyse du cycle de vie sont disponibles et notamment la RE2020. En revanche, dans le cas du logiciel Reduzer, les réglementations françaises ne sont pas intégrées au logiciel, et le calcul peut donc se faire uniquement dans des référentiels de calcul européens autres. La différence réside par exemple dans les phases du cycle de vie d'un bâtiment prises en compte dans le calcul, ou dans la manière de considérer le carbone biogénique du bois notamment. Les modélisations ont ici été faites en l'occurrence avec la méthode du certificat norvégien Future Built Zero, c'est-à-dire celui qui se rapproche le plus de la réglementation RE2020, mais ils auraient pu également être faites avec le certificat européen BREEAM. Les valeurs obtenues peuvent donc différer d'une méthode de calcul à l'autre. C'est notamment l'un des questionnements du processus d'analyse du cycle de vie, à savoir quels paramètres prendre en compte dans le calcul et de quelle manière.

b. Analyse des résultats du point de vue de la conception

Les résultats présentés dans les graphiques permettent de faire le lien entre les différentes portées et les émissions de CO2 de chacune des typologies de structures étudiées et de la matérialité. Ainsi, dans le cadre du processus de conception d'un projet, on pourrait interroger la portée à privilégier selon la typologie, la matérialité et les émissions de CO2 associées à chacune. Ou alors, avec une lecture différente, on pourrait s'interroger sur la matérialité et la typologie de structure à privilégier pour une portée donnée que l'on souhaite intégrer au projet. Dans une perspective d'intégration des enjeux environnementaux au processus de conception du projet, un tel processus de travail et de modélisation pourrait permettre de tester plusieurs hypothèses de projet et d'observer les résultats obtenus. Les enjeux environnementaux deviendraient ainsi encore davantage moteurs de conception, au-delà des considérations déjà mise en pratique d'optimisation de l'orientation solaire, de ventilation naturelle éventuelle et d'autres notions de conception bioclimatique.

D'autre part, ce système pourrait être plus approfondi en réalisant véritablement un ensemble de mesure pour chacune des portées et chacune des typologies de structure existant, au-delà du corpus d'étude restreint considéré dans ce mémoire.

Enfin, un autre aspect des résultats concernait la comparaison des valeurs d'émissions des structures du corpus d'étude à des valeurs de références. Il s'avère que les résultats très limités obtenus rendent difficile la comparaison et la détermination de la fiabilité ou non du processus du point de vue des émissions calculées.

Ainsi, je n'ai pas nécessairement trouvé une référence de projet à mettre en équivalence avec chacune des typologies de structures étudiées dans un premier temps avec la modélisation. Certaines des valeurs d'émissions déterminées dans le cadre de la modélisation ne peuvent donc pas être comparées à des valeurs déterminées par une étude plus complète qui prend en compte l'ensemble des composants du bâtiment.

Et concernant les typologies de structure qui ont pu être mis en équivalence avec un projet de référence dont les valeurs d'émissions sont accessibles, une imprécision réside dans les données fournies par la base de données Observatoire BBC. En effet, les émissions mentionnées concernent les gaz à effet de serre, sans précision du type de gaz à effet de serre (CO2 ou autre) ou de s'il s'agit de l'ensemble des gaz à effet de serre existant. Or, les données obtenues par l'expérience concernent uniquement le CO2 émis.

Les données obtenues montrent que, même en multipliant les valeurs obtenues pour un portique par le nombre de portiques présents dans le projet, le taux de CO2 émis d'après l'expérience est quatre fois inférieur au taux calculé dans le cadre du projet. Le fait que la valeur est inférieure coïncide avec le fait que la prise en compte des assemblages au sein d'un même portique, des éléments qui lient deux portiques entre eux et des contreventements éventuels ont été négligés. Au-delà de diminuer la quantité réelle de matériau et donc d'émissions, la simplification de ces éléments néglige la prise en compte de certaines actions au sein d'un portique ou entre portiques, et donc le dimensionnement global de la structure et ses émissions.

c. Limites ou imprécisions de la modélisation

L'une des premières critiques qui peut être émise sur la modélisation environnementale réalisée est la limitation à la mesure d'un seul indicateur environnemental, en l'occurrence le réchauffement climatique à travers les émissions de CO₂ en kgCO₂eq. En effet, la richesse et la complétude du processus d'ACV repose notamment sur une étude multi-critères. Le choix a été fait de limiter l'étude dans un premier temps à un seul indicateur pour simplifier le volume de données à traiter, qui aurait autrement dû être multiplié par neuf, voire plus. D'autre part, l'un des logiciels utilisés, Reduzer, ne disposait à ce stade que de la mesure du critère de réchauffement climatique. J'ai néanmoins choisi de l'utiliser pour une partie des modélisations malgré cette limitation des informations fournies étant donné que c'est par ce logiciel que j'avais initié le processus de recherche. D'autre part, en concentrant ce travail sur la phase de conception et non sur la phase d'études plus approfondies du projet, la limitation des indicateurs environnementaux à mesurer apparaissait pertinente au regard de l'analyse de l'état de l'art. Cependant, la modélisation aurait pu être plus complète en s'intéressant non pas à un mais à trois indicateurs environnementaux, comme cela avait été relevé dans l'état de l'art.

Un autre élément qui limite la précision de la modélisation est le fait d'avoir simplifié les assemblages en ne les modélisant pas. En effet, les prendre en compte réévaluerait notamment les résultats obtenus pour le bois, puisque nombre d'assemblages non traditionnels contiennent des éléments métalliques de type connecteurs, broches ou boulons. Ces éléments métalliques, du fait de leur matérialité et de l'usinage nécessaire pour les fabriquer, entraîneraient une augmentation de l'impact environnemental des structures bois, à l'image de ce qui était mentionné dans l'état de l'art.

Par ailleurs, un élément de comparaison important qui manque est le cas des structures en béton armé. Du point de vue des performances structurelles, il serait plus compétitif que le béton vis-à-vis des autres matérialités des structures comparées. Néanmoins, du fait des armatures métalliques qu'il contient, son impact environnemental pourrait être autre. Il serait donc pertinent de le modéliser également pour pouvoir le comparer aux autres matériaux. Cependant, le plugin Karamba utilisé pour l'analyse structurelle n'offrait pas la possibilité à ce jour de modéliser ce matériau composé. Ainsi, le recours à un autre logiciel d'analyse structurelle serait utile.

Enfin, la modélisation réalisée est limitée par le fait qu'elle ne présente et compare les portiques qu'un par un. Ainsi, un assemblage de plusieurs portiques pour constituer un bâtiment, et les autres éléments de structures nécessaires, par exemple longitudinaux ou de contreventement, remettrait peut-être en question certains résultats.

d. Perspectives d'évolution ou d'approfondissement

Une première piste de poursuite du travail consisterait à réitérer l'expérience mais avec d'autres outils logiciels, tant structurels qu'environnementaux. Ainsi, les résultats obtenus avec chacun des logiciels pourraient être comparés, et l'on pourrait déterminer si l'un des logiciels semble plus approprié, indépendamment de la démarche générale. L'un des logiciels par exemple mentionné comme pertinent pour sa combinaison de la conception paramétrique et de l'analyse structurelle, et plus complet que le plugin Karamba est le logiciel SCIA Engineer³³. Mais d'autres logiciels pourraient également être utilisés pour avoir la comparaison la plus large possible.

Concernant la modélisation structurelle, un développement possible pourrait être l'intégration à la modélisation des assemblages et autres jonctions non modélisées dans le cadre de ce mémoire mais qui pourraient avoir un impact important sur les émissions de CO2.

D'autre part, il pourrait être pertinent de modéliser un ensemble assemblé de portiques plutôt que des portiques individuels, et donc de modéliser également l'ensemble des éléments structurels nécessaires et notamment les contreventements, ainsi que les charges latérales de vent. Ainsi, la combinaison d'outils pourrait être testée pour des structures plus complètes et plus complexes.

Concernant la modélisation environnementale, étendre le travail en prenant en compte davantage d'indicateurs environnementaux apporterait des résultats plus fins et plus exacts.

Finalement, le mémoire s'est orienté sur un aspect vraiment pratique ou technique de la modélisation, et davantage de lien avec le rendu d'ambiance de chacune des structures et des dimensions pourrait être faite pour apporter une lecture plus complète de l'impact d'une structure, tant du point de vue environnemental que du point de vue esthétique, perceptif, visuel et du point de vue de sa présence ou de son occupation de l'espace, ce qui entre également fortement en compte dans la phase de conception.

Ainsi, un des paramètres qui n'a été que peu exploré dans ce mémoire est la hauteur du treillis. Le faire varier pourrait permettre d'étudier des typologies de structure qui créent des espaces et des ambiances différentes.

³³ (La conception paramétrique : un gain d'efficacité pour les ingénieurs structure, 2024)

Conclusion

L'expérience menée de modélisation de portiques de portées, typologies et matériaux variés, et de leur impact environnemental a permis d'aboutir à une comparaison, à performances structurelles égales, des portiques les plus émissifs de CO₂.

L'expérience a permis, sur un autre aspect, de montrer l'efficacité et l'intérêt de combiner les outils de conception paramétrique et d'analyse des impacts environnementaux. En effet, la modélisation paramétrique est de plus en plus utilisée et peut ainsi directement être liée à l'étude environnementale en parallèle tout au long du processus de conception.

Un des enjeux de ce mémoire était ainsi d'expérimenter les outils qui sont à disposition des architectes et dont ils pourraient être amenés à se saisir pour étudier l'impact environnemental de leurs différentes propositions de projet tout au long de la phase de conception. En effet, ce questionnement environnemental a vocation à être de plus en plus présent dans les premières phases de conception dans la mesure où l'objectif est soit d'avoir l'impact environnemental le plus limité possible, soit de s'assurer a minima de respecter les seuils d'émissions maximaux imposés par la réglementation. Et afin de ne pas avoir à changer un élément du projet en fin de processus, après étude complète du cycle de vie par le bureau d'études, déterminer un processus de travail qui intègre les outils d'ACV au plus tôt est bénéfique.

Enfin, le travail s'est inscrit dans une réflexion en lien avec la conception du projet architectural. En effet, le choix de structure, qui la rend parfois très présente dans l'espace dessiné, est un des éléments qui est réfléchi durant la phase de conception architecturale, souvent pour ses qualités esthétiques et d'interaction avec le reste de l'espace. Le sujet du mémoire était donc de savoir comment l'arrivée de réglementations environnementales pourrait influer sur la manière de penser la structure, ici dans le cadre de portiques de grande portée, qui interviennent dans la réalisation d'équipements sportifs, de halles culturelles ou d'autres grands bâtiments notamment.

Finalement, bien que la comparaison des résultats obtenus avec des valeurs de références issues des bilans environnementaux de projets réellement construits s'est révélée difficile, le reste du processus de travail depuis la modélisation paramétrique d'un projet jusqu'au calcul de son impact environnemental s'est révélé plutôt efficace, tant du point de vue des résultats que du point de vue de la fluidité du passage d'une thématique d'étude à une autre pour le concepteur. Ce travail pourrait notamment se poursuivre avec une modélisation de la structure du bâtiment plus complète et plus complexe.

Bibliographie

- AEC_Magazine. (2019). Florian Frank // Herzog & De Meuron. Récupéré sur <https://www.youtube.com/watch?v=OhVe01USkTQ&t=225s>
- Akrout, S., Xaviera, C., & Leclercq, P. (s.d.). L'impact des méthodes computationnelles sur l'intention des architectes dans le processus de conception. *Entre design intentionnel et libération du geste créatif au risque d'une décontextualisation du projet*. Récupéré sur <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/297275/1/Art%2001%20design%20.pdf>
- Ashby, M., Shercliff, H., & Cebon, D. (2013). Matériaux. *Ingénierie, science, procédé et conception*. Récupéré sur https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=eGUGDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=diagramme+ashby+materiail+batiment&ots=-gnL25xzO6&sig=uxRscsui7NdFxgci5feW75f4S4g&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Atelier de Tissage. (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC: https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/8530-atelier-de-tissage#ongSel_desc
- Atelier Portuaire. (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC: https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/9278-atelier-portuaire#ongSel_desc
- Ateliers Avenir. (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC: https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/12335-ateliers-avenir#ongSel_desc
- Bâtiment Port de Calais. (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC: https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/8972-batiment-port-de-calais#ongSel_desc
- Benhaled, M., Ouldboukhitine, S.-E., & Amziane, S. (2019). Modélisation théorique et expérimentale du comportement énergétique et environnemental des matériaux de construction biosourcés. doi:<https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.132>
- Bourcy, E. (2011). Analyse de cycle de vie des bâtiments. Récupéré sur https://matheo.uliege.be/bitstream/2268.2/2411/1/2010_2011_BOURCY_Elise.pdf
- Bui, Q.-B. (2008). Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques. Récupéré sur <https://theses.fr/2008ISAL0093>
- (2018). *Calcul de la performance environnementale par étude ACV*. Récupéré sur https://www.cerema.fr/system/files/documents/2019/09/rapport_acv_nature_logis.pdf
- (2018). *Calcul de la performance Environnementale par étude ACV*. Récupéré sur https://www.cerema.fr/system/files/documents/2019/07/te-181031-vmtlm-17158-rapport_ec_multi_acceuil-la_roche_sur_yon.pdf
- CAUE92. (s.d.). Les familles d'acteurs, les étapes de conception, les étapes de construction, etc. Récupéré sur <https://www.caue92.fr/media/download/16620>
- Centre de contrôle qualité - Sarouleagain. (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC: https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/9281-centre-de-controle-qualite-sarouleagain#ongSel_desc

- Complexe sportif.* (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC:
https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/10405-complexe-sportif#ongSel_desc
- De Boissieu, A. (2013). Modélisation paramétrique en conception architecturale :
 Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie. Récupéré sur
https://www.researchgate.net/publication/335474365_Modelisation_parametrique_en_conception_architecturale_Caracterisation_des_operations_cognitives_de_conception_pour_une_pedagogie
- Franz, H. (2023). Une approche interdisciplinaire pour mieux évaluer performance structurale de charpentes métalliques anciennes (1850-1930). Récupéré sur
https://www.researchgate.net/publication/374550494_Une_approche_interdisciplinaire_pour_mieux_evaluer_la_performance_structurale_de_charpentes_metalloiques_anciennes_1850-1930
- Glulam HandBook France. (2018). *Manuel du bois lamellé. Volume 2.* Récupéré sur
https://www.glulam.org/wp-content/uploads/GlulamHandbook_Volume2_Corr02.pdf
- Goufi, N., Idir, R., Kerdal, D., Abidelah, A., & Kaid, N. (s.d.). Analyse des caractéristiques physiques et mécaniques de bétons de granulats recyclés de béton pour la valorisation de ce type de granulats.
- Guillon, E. (2007). Durabilité des matériaux cimentaires : modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles. Récupéré sur <https://theses.hal.science/tel-00133395v1/document>
- Gymnase de Muttersholtz.* (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC:
https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/6328-gymnase-de-muttersholtz#ongSel_desc
- Gymnase du LEGTA Carmejane / LE CHAFFAUT 04.* (2024, Octobre). Récupéré sur Prix national de la construction bois: <https://www.prixnational-boisconstruction.org/laureats-precedents/palmares-precedents/1755>
- Gymnase LEGTA.* (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC:
https://www.observatoirebbc.org/paca/batiments/8565#ongSel_carbone
- Hall sportif et salle polyvalente de Papaïchton.* (2024, Octobre). Récupéré sur Construction 21:
<https://www.construction21.org/france/case-studies/h/hall-sportif-et-salle-polyvalente-de-papaichton.html>
- Hoxha, E. (2015). Amélioration de la fiabilité des évaluations environnementales des bâtiments. Récupéré sur <https://pastel.hal.science/tel-01214629v1/document>
- Kind-Barkauskas, F., Kauhsen, B., Polonyi, S., & Brandt, J. (2006). Construire en béton. *Conception des bâtiments en béton armé.* Récupéré sur
https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=fFHQzRhCDL0C&oi=fnd&pg=PA5&dq=maire+utilise+en+structure+batiment&ots=P-viqmcMHa&sig=0_OW4XHYBkJU2W-Y2yJZ-gxX3sM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

La conception paramétrique : un gain d'efficacité pour les ingénieurs structure. (2024, Décembre). Récupéré sur Le Moniteur: <https://www.lemoniteur.fr/article/la-conception-parametrique-un-gain-d-efficacite-pour-les-ingenieurs-structure.2306577>

Les Cahiers_Techniques_du_Bâtiment. (2014). Une canopée en dentelle de bois à la complexité entièrement maîtrisée. Récupéré sur <https://www.cahiers-techniques-batiment.fr/article/une-canopee-en-dentelle-de-bois-a-la-complexite-entierement-maitrisee.18691>

Maison des Associations. (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC: https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/7883-maison-des-associations#ongSel_desc

Mam, K. (2021). Exploration structurelle et environnementale des ouvrages en bois de grande portée. Récupéré sur <https://pastel.hal.science/tel-03572887>

Observatoire BBC. (2024). Récupéré sur Observatoire BBC: <https://www.observatoirebbc.org/>

Ouedraogo, E., Coulibaly, O., Ouedraogo, A., & Messan, A. (2015). Caractérisation mécanique et thermophysique des blocs de terre comprimée stabilisée au papier (cellulose) et/ou au ciment. Récupéré sur https://www.researchgate.net/publication/290606570_Mechanical_and_Thermophysica_L_Properties_of_Cement_andor_Paper_Cellulose_Stabilized_Compressed_Clay_Bricks

Peuportier, B., Wurtz, A., & Schalbart, P. (2022). Couplage entre conception paramétrique et analyse de cycle de vie pour l'écoconception des quartiers. Récupéré sur <https://hal.science/hal-03801054v1/document>

Plateforme logistique. (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC: https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/8609-plateforme-logistique#ongSel_desc

Plateforme logistique de Toulouse Foncleyre, un projet d'Experience. (2024, Octobre). Récupéré sur Chroniques d'architecture: <https://chroniques-architecture.com/eiffel-2023-plateforme-logistique-toulouse-foncleyre-experience-construiracier/>

Ressourcerie. (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC: https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/7791-ressourcerie#ongSel_desc

Réunion_des_Musées_Nationaux_et_de_Grand_Palais. (2016). Restitution pour la publication du bilan d'émissions de GES de la RMN-GP. Récupéré sur https://www.grandpalais.fr/pdf/2016_Bilan_GES_Rmn-GP.pdf

Rio, M., Reyes, T., & Roucoules, L. (2012). Vers des processus d'éco-conception proactifs via la modélisation des connaissances d'interface entre les acteurs de la conception. Récupéré sur <https://hal.science/hal-00763648v1/document>

Salle communale. (2024, Octobre). Récupéré sur Observatoire BBC: https://www.observatoirebbc.org/batiments/neuf/8894-salle-communale#ongSel_desc

Schueller, W. (2008). Building support structures : Analysis and design using SAP2000 software.

Trachte, S. (2012). Matériaux, matière d'architecture soutenable. *Choix responsable des matériaux de construction, pour une conception globale de l'architecture soutenable.*

Récupéré sur https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=-8gRiuYGvcoC&oi=fnd&pg=PA24&dq=mat%C3%A9riaux+de+construction+choix+responsable&ots=fBkePK2khG&sig=o4UCpEN9k3fOlkmvKdXgB-7-bjs&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Viguier, J. (2015). Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique. Récupéré sur https://docnum.univ-lorraine.fr/public/DDOC_T_2015_0142_VIGUIER.pdf

Xing, Z. (2011). Influence de la nature minéralogique des granulats sur leur comportement et celui du béton à haute température. Récupéré sur <https://theses.hal.science/tel-00624785v1/document>

Younes, A. Y., & Youssef, A. (2017). Prise en compte des apports mécaniques du béton de chanvre pour le calcul de structure bois/béton de chanvre et métal/béton de chanvre. Récupéré sur <https://theses.hal.science/tel-01535694v1/document>

Liste des figures

Figure 1 : Schéma du principe de fonctionnement de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) – Source : https://eduscol.education.fr/sti/ressources_techniques/bim-bouygues-construction-et-le-cstb-presentent-lanalyse-de-cycle-de-vie-des

Figure 2 : Etapes du Cycle de Vie d'un bâtiment – Source : <https://www.inies.fr/inies-pour-le-batiment/lacv-batiment/>

Figure 3 : Calendrier de mise en application de la RE2020 – Source : https://eduscol.education.fr/sti/ressources_pedagogiques/presentation-generale-de-la-re-2020

Figure 4 : « Familles de matériaux selon leur module d'élasticité et leur densité » d'après Michael Ashby (Ashby, Shercliff, & Cebon, 2013) – Source : https://books.google.fr/books?hl=fr&lr=&id=eGUGDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR5&dq=diagramme+ashby+materiau+batiment&ots=gnL25xzO6&sig=uxRscsui7NdFxgci5feW75f4S4g&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Figure 5 : Typologies de structures en fonction de la portée, d'après Wolfgang Schueller – Source : Schueller, W. (2008). Building support structures : Analysis and design using SAP2000 software.

Figure 6 : Types de systèmes structurels en fonction de la portée et en bois lamellé collé, d'après le Manuel du Bois Lamellé (Glulam HandBook France, 2018) – Source : https://www.glulam.org/wp-content/uploads/GlulamHandbook_Volume2_Corr02.pdf

Figure 7 : « Exemple de représentation de la typologie structurelle et matériaudique des immeubles bois – notations et représentation » d'après Koliann Mam (Mam, 2021) – Source : <https://pastel.hal.science/tel-03572887>

Figure 8 : « Illustration de la typologie matériaudique de 43 bâtiments bois (Etude réalisée en 2018 de 43 bâtiments de moyenne et grande hauteur en bois) » d'après Koliann Mam (Mam, 2021) – Source : <https://pastel.hal.science/tel-03572887>

Figure 9 : « Evaluation des impacts des éléments d'une construction en fonction de la portée » d'après Endrit Hoxha – Source : <https://pastel.hal.science/tel-01214629v1/document>

Figure 10 : Processus de modélisation et de combinaison des outils de recherche – Source : réalisation personnelle

Figure 11 : Collège et gymnase, Rumilly (74) – Source : <https://arborescence-concept.com/#cbpi=https://arborescence-concept.com/projet/college-et-gymnase/>

Figure 12 : Equipement sportif, Arc-et-Senans (25) – Source : <http://www.archipointech.com/fr/projet/commune-d-arc-et-senans-equipement-sportif>

Figure 13 : Hall sportif, Papaïchton (973) – Source : https://immobilier.lefigaro.fr/article/en-guyane-cette-salle-de-sport-en-bois-evoque-les-palmes-d-un-cocotier_cab9d352-1bea-11ee-ad8b-f72397503844/

Figure 14 : Schéma de principe d'une charpente double pente treillis – Source : <https://fr.scribd.com/document/681300412/Terminologie-de-La-c-m>

Figure 15 : Grand Palais Ephémère, Paris (75) – Source : <https://www.francebois2024.com/le-grand-palais-ephemere-un-chantier-emblematique-pour-le-bois-et-les-jeux-en-2024/>

Figure 16 : Gymnase Jean Lamomur, Nancy (54) – Source : <https://www.studiolada.fr/projet/gymnase-jean-lamour>

Figure 17 : Gymnase lycée professionnel Victor Laloux, Tours (37) – Source : <https://cmb-bois.fr/realisations/equipements-sportifs/gymnase-du-lycee-professionnel-victor-laloux-tours-37/>

Figure 18 : Gymnase, Kristiansand (Norvège) – Source : <https://www.bookup.no/utleie/Index/2760#/view:item/id:2760/part:/r:33/mod:book>

Figures 19 et 20 : Halle d'entraînement, Davos (Suisse) – Source : https://issuu.com/cedotec/docs/le_bois_allie_du_sport

Figure 21 et 22 : Hall sportif couvert du lycée Félix Eboué, Cayenne (973) – Source : <https://www.club-oui-au-bois.com/les-projets/le-plateau-sportif-du-lycee-felix-eboue/>

Figure 23 : Stade Talus-Université de Laval, Québec (Canada) – Source : <https://www.fgp.ca/portfolio/stade-telus-du-peps-de-luniversite-laval/>

Figure 24 : Gymnase du lycée Melkior-Garré, Cayenne (973) – Source : <https://www.ctguyane.fr/ctg-partenaire-lyceens-de-melkior-garre/>

Figure 25 : Gymnase Aice Milliat, Forges-les-Bains (91) – Source : <https://www.amc-archi.com/article/koz-portiques-a-ossature-triangulee.38363>

Figure 26 : Stade Allianz Riviera, Nice (06) – Source : <https://www.lemoniteur.fr/photo/stade-de-nice-la-charpente-allie-le-bois-et-l-acier.707824/facades.6#galerie-anchor>

Figure 27 : Modélisation d'un treillis Pratt sur Grasshopper en fonction des paramètres d'entrée – Source : réalisation personnelle

Figure 28 : Assemblage de blocs permettant de réaliser l'analyse structurelle sur Karamba – Source : réalisation personnelle

Figures 29 et 30 : Adaptation du dimensionnement des éléments structurels après analyse structurelle lorsque la dimension de la portée d'une même typologie de structure et d'une même matérialité a été modifiée – Source : réalisation personnelle

Figure 31 : Modélisation d'une partie du portique dans Rhino inside Revit à partir des paramètres d'entrée – Source : réalisation personnelle

Figure 32 : Modélisation de la seconde partie du portique dans Rhino inside Revit à partir des paramètres d'entrée – Source : réalisation personnelle

Figure 33 : Interface de Revit contenant le projet modélisé grâce à Rhino inside Revit – Source : réalisation personnelle

Figures 34 et 35 : Complexe sportif, Vincennes (92) – Source : <https://agenceengasser.com/portfolio/complexe-sportif-vincennes/>

Figure 36 : Plan du complexe sportif, Vincennes (92) – Source : <https://agenceengasser.com/portfolio/complexe-sportif-vincennes/>

Figure 37 : Maison des associations, Palazinges (19) – Source :
<https://palazinges.fr/associations/>

Figures 38 et 39 : Plateforme logistique Fondeyre, Toulouse (31) – Source : <https://chroniques-architecture.com/eiffel-2023-plateforme-logistique-toulouse-fondeyre-experience-construiracier/>

Figures 40 et 41 : Gymnase LEGTA Carmejane, Le Chaffaut Saint Jurson (04) – Source :
<https://www.boisdesalpes.net/batiment.php?noIDB=29>

Figure 42 : Multi-accueil La Vallée Verte, La Roche sur Yon (85) – Source :
<https://www.pelleauetassocies.com/portfolio/multi-accueil-et-marie-annexe/>