

Etude coût/impact environnemental d'une poutre de gros œuvre

Ing. E. VAN SPROLANT
ECAM – Bruxelles

Cet article a pour objectif de mettre en valeur les résultats d'une analyse permettant d'avoir un impact positif sur l'environnement, tout en restant dans des prix raisonnables envers le client lors du dimensionnement de poutres en phase de gros œuvre. La conclusion du travail démontre le fait qu'en suivant quelques petites règles et astuces, l'on peut améliorer l'impact de la construction sur l'environnement.

Mots-clefs : CO₂ équivalent, coût, béton armé, profilés métalliques, bois lamellé-collé

This article is meant to enlighten the results of an analysis making it possible to have a positive impact on the environment, whilst keeping reasonable prices towards the client when designing the beams for the structural part of a building. The conclusion shows that it is doable to have a positive impact on the construction world by following a few simple rules.

Keywords : equivalent CO₂, cost, reinforced concrete, metallic beams, glued laminated timber

1. Objectifs du TFE

1.1. Objectifs et mode opératoire

L'objectif de ce travail de fin d'études consiste à effectuer une analyse coûts/impact environnemental d'une poutre en phase de gros œuvre. Il s'agit concrètement de trouver une solution optimale pour réduire l'empreinte carbone des poutres en gros œuvre tout en restant dans une fourchette de prix raisonnable pour les clients. La poutre qui fera l'objet de l'étude provient de la tour Mohammed VI, construite par BESIX au Maroc. Dans le cadre de ce travail, nous faisons abstraction de sa localisation. Les fournisseurs choisis seront belges et le transport ne sera pas pris en compte. Bien que la poutre en question réponde à des normes relativement courantes, c'est surtout le contexte de sa mise en œuvre qui semble intéressant. Son chargement et son schéma statique seront étudiés afin de permettre le dimensionnement de poutres de composition différente, en béton armé, en profilés d'acier et en bois lamellé-collé.

La poutre est située entre le niveau du sous-sol -1 et le rez-de-chaussée. Ci-dessous, une représentation du schéma statique de la poutre en question.

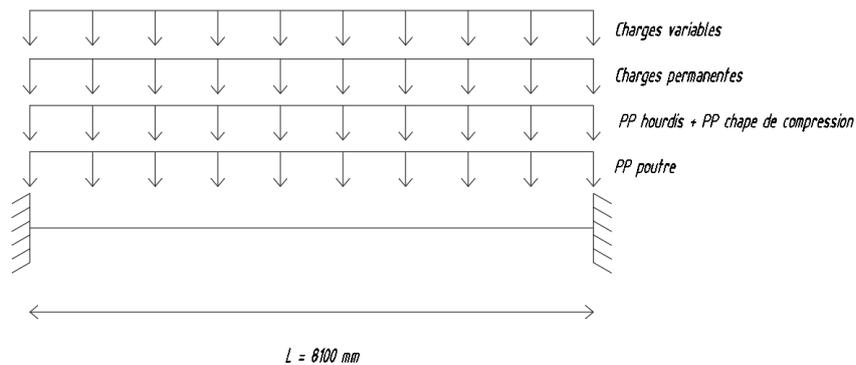


Figure 1: Schéma statique de la poutre

Les données relatives aux différentes poutres calculées seront introduites dans un logiciel nommé OneClick LCA qui doit nous permettre de générer des valeurs d'émission de gaz à effet de serre sous forme de CO_2eq . Le prix de revient relatif à chaque poutre entrant dans l'équation, calculé sur la base de mètres, doit nous permettre de procéder à une comparaison coût/impact environnemental. Les graphiques produits par l'application permettent, hormis une visualisation plus parlante des résultats, de dégager des tendances et de tirer des conclusions.

Trois grandes questions seront abordées dans ce travail. La première est d'analyser l'impact du béton armé, de l'acier et du bois lamellé-collé. La comparaison de ces

trois types de poutres nous donne déjà une idée en termes de valeurs et d'impact environnemental.

La seconde est de savoir à quel point la quantité de chaque matériau composant une poutre impacte son empreinte carbone. Lors du dimensionnement d'une poutre en béton armé par exemple, il est possible de jouer sur l'équilibre entre l'acier et le béton. Pour autant que cet équilibre permette de satisfaire aux critères de dimensionnement, la poutre pourra être mise en œuvre. Sera-t-il plus approprié d'augmenter la quantité d'acier tout en diminuant la quantité de béton dans la poutre ou inversement ?

Le troisième aspect qui sera analysé dans le cadre de ce travail est l'impact du type de matériau mis en œuvre. Différents types de béton, d'acier et de bois seront utilisés et analysés, toujours dans l'optique de diminuer leur empreinte carbone, tout en gardant un coût raisonnable. En d'autres termes, quelle est l'influence des matières premières ? Quelle est l'importance du mode de fabrication ? Quel sera l'impact des matériaux recyclés utilisés ?

Avant de procéder à la justification du logiciel retenu, deux précisions cruciales s'imposent. L'analyse de l'impact environnemental d'un matériau basée sur le CO₂eq, est un concept assez vaste. En effet, l'empreinte écologique augmente tout au long du cycle de vie d'un matériau. Comme représenté sur l'image ci-dessous, nous nous focalisons dans ce travail sur le carbone interne. Ceci signifie que nous analysons les émissions provenant de l'extraction, la fabrication, le transport jusqu'à l'usine de production, la construction et mise en place, ainsi que la fin de vie du matériau. Comme représenté ci-dessous (figure2), tout cela correspond à environ 11% des émissions globales de carbone. L'autre partie de cette émission globale concerne du carbone opérationnel. Le carbone opérationnel représente les émissions dues à l'utilisation du bâtiment, par exemple l'énergie nécessaire pour chauffer, refroidir et entretenir le bâtiment. Jusqu'à présent, l'accent a été mis sur la réduction de ce carbone opérationnel. La décarbonisation rapide du secteur énergétique a modifié la tendance, pour aller vers une réduction de l'empreinte carbone interne.

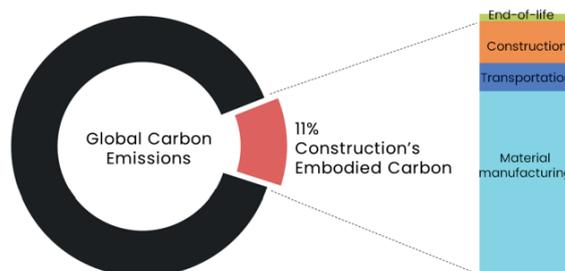


Figure 2: Emissions étudiées dans ce travail

(OneClick LCA. (2021))

Enfin, il faut toujours faire preuve de logique et tenir compte de la capacité des matériaux. Sachant que chaque matériau a ses propriétés mécaniques spécifiques, certains cas de charge rendent parfois l'utilisation de certains matériaux impossible. Il convient donc de prévoir un dimensionnement réaliste par rapport à la mise en œuvre d'un élément de construction. Avant de prétendre avoir un impact sur l'empreinte carbone d'une poutre, il faut donc se demander si les dimensions de la poutre calculée avec un certain matériau sont raisonnables. Par exemple, une poutre du même bâtiment exige, pour son cas de charge, une section pour la poutre en bois de 100 x 150 cm. L'utilisation de ce matériau n'est par conséquent pas recommandé, de par ses dimensions disproportionnées. Une poutre avec une hauteur de 1.5m et une largeur de 1m limiterait la hauteur sous plafond de manière drastique, avec une largeur hors norme. D'autre part, cette section importante ferait augmenter l'empreinte carbone en CO₂éq, ce qui mène dans certains cas à repenser le matériau approprié.

1.2. Circularité

Un autre aspect déterminant dans le débat sur le développement durable dans le secteur de la construction, est la circularité.

Economie circulaire et impact environnemental

L'économie circulaire est une démarche qui consiste à réduire et réutiliser les déchets et à économiser les ressources afin de diminuer l'impact environnemental des constructions. Cependant, il convient de noter que cette approche seule ne garantit pas un impact environnemental plus faible. En effet, il est important d'analyser chaque aspect du cycle de vie du matériau. Un matériau recyclé par exemple, aura un impact (positif ou négatif) en termes de transport, de consommation d'énergie dans la fabrication, etc. Un produit recyclé, par contre aura une durée de vie moins longue qu'un matériau neuf, ce qui implique un remplacement plus fréquent. Cela illustre bien qu'il est important d'envisager l'ensemble des facteurs qui entrent en jeu, si on veut arriver à un impact environnemental plus faible des matériaux de construction.

Dans ce chapitre sur la circularité, arrêtons-nous sur quelques principes de base en matière de recyclage et de réutilisation.

Un outil efficace pour analyser le cycle de vie d'un matériau est la méthode normalisée (ISO 14040, 14044). Celle-ci permet de tenir compte de l'ensemble des aspects qui participent à l'impact environnemental de ce même matériau. Lors d'une analyse de cycle de vie, il est important de considérer l'impact global de tous les indicateurs environnementaux du matériau. Certaines modifications peuvent avoir un impact positif au niveau des émissions de gaz à effet de serre, mais un impact négatif en termes de pluies acides.

Par ailleurs, les différents indicateurs d'impacts environnementaux n'ont pas les mêmes unités. C'est pourquoi il est très difficile d'objectiver leur impact sur l'environnement. La monétarisation est un principe qui consiste à multiplier les différents indicateurs par un facteur qui représente le coût sociétal de cet impact. Cela permet d'arriver à un score global de l'analyse. (El Cheikh, 2020)

Recyclé/recyclable, réemploi/réutilisable

Comme représenté ci-dessous (Figure 3), le cycle de vie d'un matériau est divisé en 3 grandes phases :

- A : La production
- B : L'utilisation
- C : La fin de vie

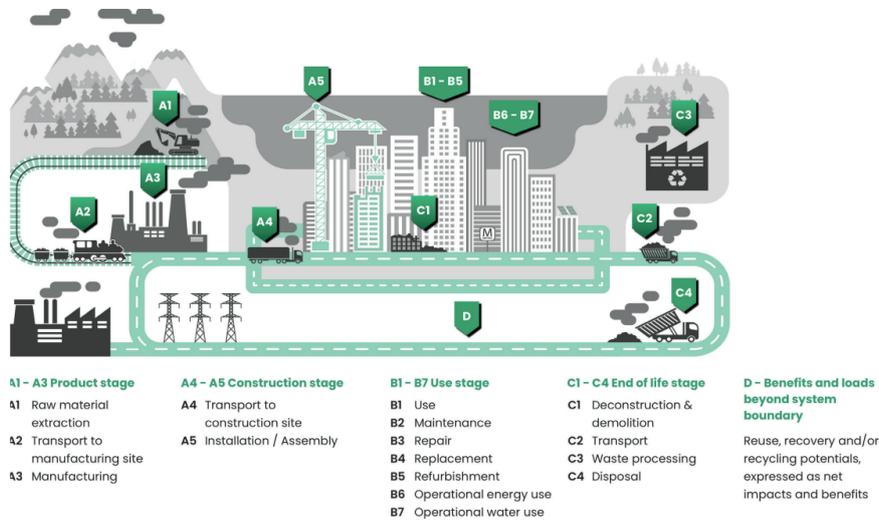


Figure 3: Etapes de cycle de vie des matériaux

(OneClick LCA. (2021))

Chacune des phases est divisée à son tour. Lors de la démolition d'un bâtiment, le propriétaire est responsable de chacun des déchets jusqu'à ce que le matériau ne soit plus considéré comme tel. Une option intéressante consiste à réutiliser les déchets pour la fabrication d'une nouvelle matière première. En effet, le réel bénéfice d'un matériau recyclé est qu'il remplacera une matière première dans un cycle de vie suivant. Dans ce contexte, une quatrième phase a été créée. Le module D qui permet au bâtiment de déclarer les bénéfices du recyclage, en décrivant ce qui se passe dans le cycle de vie suivant.

Bien que le recyclage permette aux matériaux de passer directement de la phase C ‘fin de vie’ à la phase A ‘production’ du prochain cycle de vie, il est important de tenir compte des autres facteurs liés à ces phases afin d’obtenir un bilan objectif. En effet, lors du recyclage les matériaux doivent être retravaillés. Le transport et la fabrication des matériaux recyclés ne doivent donc pas être négligés.

Cependant, concernant un matériau de réemploi, c’est une plus grande partie de la phase de production qui sera évitée. Ici, il ne s’agit donc pas de réutiliser un déchet pour la fabrication d’un nouveau matériau de construction mais, au contraire, de réutiliser un matériau existant et récupérable. Après un nettoyage, il suffira de transporter et d’installer le matériau sur chantier. Ce qui engendre une économie plus importante.

Dans le cadre d’une rénovation on fera en plus, pour les matériaux réutilisés in situ, l’économie de la phase de transport.

Comme le démontrent ces différents cas de figure, dans lesquels on fait l’économie d’une ou de plusieurs étapes, nous pouvons conclure que l’impact environnemental des matériaux utilisés sera plus important dans le cas d’un recyclage que d’un réemploi. Ceci étant d’autant plus valable pour la rénovation, pour laquelle les matériaux sont réutilisés à l’endroit même.

Cependant, la réutilisation des matériaux ne manque pas de faire polémique parmi les experts en la matière. En effet, après 50 à 100 ans de réutilisation des matériaux de construction, des questions se posent concernant notamment les caractéristiques de résistance mécanique. Faisant toujours l’objet de beaucoup d’études, la pratique de la réutilisation ne s’est pas encore généralisée à ce jour. (Delem, 2020). Le graphique ci-dessous permet d’illustrer ce propos (Figure 4).

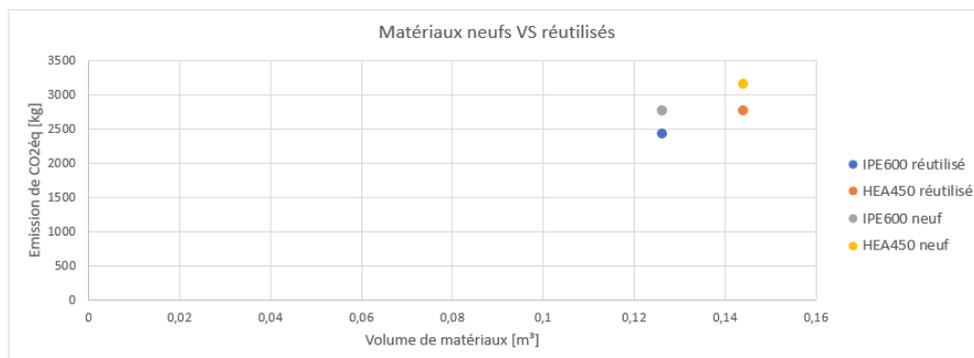


Figure 4: Graphique comparatif entre le matériau neuf et la réutilisation

Ce graphique fait une comparaison entre des poutres IPE600 et HEA450 neuves ou réutilisées. Sur l’axe des abscisses est représentée la quantité de matériau en m³. Sur l’axe des ordonnées sont représentées les émissions de gaz à effet de serre sous forme de kg de CO₂eq. L’on peut y apercevoir les réductions d’émissions liées à la fabrication des matériaux. La réutilisation de matériaux permet de supprimer la

phase A. Pour la poutre HEA450, le potentiel en matière d'économies se chiffre à 384.96kg de CO₂éq. Pour la poutre IPE600, il s'agit d'économiser 337.18kg. Pour deux poutres équivalentes en terme de propriétés mécaniques, la poutre IPE s'avère donc être la plus intéressante en termes d'émissions. La plus grande différence, par rapport à la poutre HEA450 est liée à la quantité de matériaux plus importante.

Une autre façon de concevoir les choses consiste à fabriquer des matériaux aujourd'hui en anticipant le futur et en veillant à ce qu'ils soient recyclables, réutilisables ou adaptables. Cependant, l'impact de cette démarche ne sera visible qu'à la fin du premier cycle de vie des matériaux concernés, à savoir dans plus ou moins 50 ans. Il faut donc être patient et attendre que les bénéfices deviennent visibles. Comme le monde est en constante évolution, il est quelque peu prématuré pour les logiciels d'analyse de cycle de vie des matériaux de faire de prédictions quant aux bénéfices attendus de cette approche. C'est pourquoi leur impact est rarement pris en compte dans les analyses.

Rénovation VS démolition

Qu'en est-il de la comparaison en matière d'utilisation de matériaux de construction, entre la rénovation et une nouvelle construction ? Pour mettre en œuvre une construction ou réaliser une rénovation on peut utiliser de matériaux neufs, recyclés ou réutilisés. L'utilisation de matériaux neufs nous amènera à analyser le cycle de vie complet du matériau, ce qui veut dire que les trois phases seront étudiées. Pour les matériaux maintenus en place dans le cadre d'une rénovation, nous tiendrons compte uniquement de la phase d'utilisation du matériau. Il est évident que c'est dans ce cas précis qu'une économie importante sera réalisée. Comme mentionné plus haut, lorsque l'on parle de la réutilisation ou du recyclage de matériaux, il faut être prudent. En effet, des matériaux recyclés n'ont pas toujours des capacités mécaniques équivalentes à celles de matériaux neufs. La consommation d'énergie liée à l'utilisation du bâtiment est un critère important à considérer.

À nouveau, il faut être objectif quand on parle de rénovation avec des matériaux recyclés ou réutilisés. L'impact environnemental n'en est pas toujours moins important. (Delem, 2020)

Matériaux biosourcés

On parle de matériaux biosourcés lorsque ceux-ci sont composés de matière animale ou végétale et qu'ils ont un cycle de régénération court. Bien que les matériaux fossiles soient composés de matière végétale, leur cycle de régénération est de plusieurs millions d'années. Ils ne seront donc pas considérés comme biosourcés.

Par ailleurs, un matériau est considéré comme renouvelable lorsque son cycle de régénération est inférieur à sa durée de vie. Un des grands avantages des matériaux biosourcés est qu'ils permettent le stockage de carbone. Durant toute leur vie, ils

transforment du dioxyde de carbone en glucose et en oxygène, ce qui les oblige à consommer du carbone.

Ces bienfaits des matériaux biosourcés ne se manifestent toutefois que pendant une partie de leur cycle de vie. A nouveau, un regard critique doit être jeté sur leur impact écologique. En effet, en fin de vie, le dioxyde de carbone absorbé sera relâché dans l'atmosphère lors de la combustion du bois par exemple. De plus, il faut tenir compte du transport, du traitement du matériau, etc. Ce n'est donc qu'après une analyse du cycle de vie complet que l'on pourra tirer des conclusions quant à leur impact écologique.

Certains facteurs peuvent avoir un impact positif sur les émissions de gaz à effet de serre, mais un impact négatif par rapport à d'autres critères. (Delem, 2020)

2. Résultats

2.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons tout d'abord effectuer une analyse globale des trois types de poutres discutées dans le cadre de ce travail. Le premier graphique représente les émissions de gaz à effet de serre des trois premières poutres dimensionnées, à savoir une poutre en béton armé, une poutre en acier et une poutre en bois lamellé-collé. Ensuite, nous ferons légèrement varier la composition de chacune des familles, à savoir béton armé, acier et bois lamellé-collé. Par après, les matériaux constituant les poutres afin d'en analyser l'impact. Il est important de noter que chacune des poutres analysées a fait l'objet d'un dimensionnement permettant de résister au schéma statique présenté plus haut.

Avant de se lancer dans l'analyse des graphiques, il est important de noter que pour chaque type de matériau avec ses caractéristiques mécaniques bien précises, OneClick LCA propose une large gamme d'options en fonction du fournisseur, du taux de recyclage, du pays, etc. Dans cette première analyse, nous avons fait le choix de partir sur des valeurs moyennes et sur des matériaux neufs. C'est-à-dire qu'il s'agit de valeurs moyennes pour les différents fournisseurs actifs en Belgique et de matériaux 0% recyclés. Ce choix a été fait afin de pouvoir se concentrer sur les grandes tendances. Il est également important de préciser que la tour Mohammed VI a été considérée comme se situant en Belgique, dans le cadre de ce travail. C'est pourquoi nous pouvons faire appel aux fournisseurs belges. Encore une fois, le transport entre l'usine et le chantier n'est pas pris en compte. Après cette première analyse, nous essayerons d'optimiser l'impact environnemental en envisageant différentes options.

Parmi les nombreuses options que propose OneClick LCA, voici les matériaux choisis dans le cadre de cette première analyse.

La poutre en béton armé est composée d'un béton « Ready-mix concrete, normal strength, generic, C35/45, with CEM I, 0% recycled binders ». Pour les armatures en acier, il s'agit de « Reinforcement steel (rebar), generic, 0% recycled ».

Dans le cas de la poutre en acier, l'option retenue est le « Steel sheets, generic, 0% recycled content, S235, S275 and S355 ».

Pour la poutre en bois lamellé-collé, le matériau retenu est le « Cross laminated timber (CLT), glued, biogenic CO2 not subtracted (for CML), 160 mm, 470 kg/m³ » du fournisseur STABILAME.

Rappelons encore qu'il s'agit ici de matériaux basés sur des moyennes, afin de dégager des tendances générales.

2.2. Analyse générale

Analyse Volume-émission de CO₂éq

Après avoir introduit les valeurs relatives aux trois poutres dimensionnées plus haut dans OneClick LCA, nous obtenons un premier graphique reprenant la quantité de CO₂éq par rapport au volume totale de matériaux de la poutre.

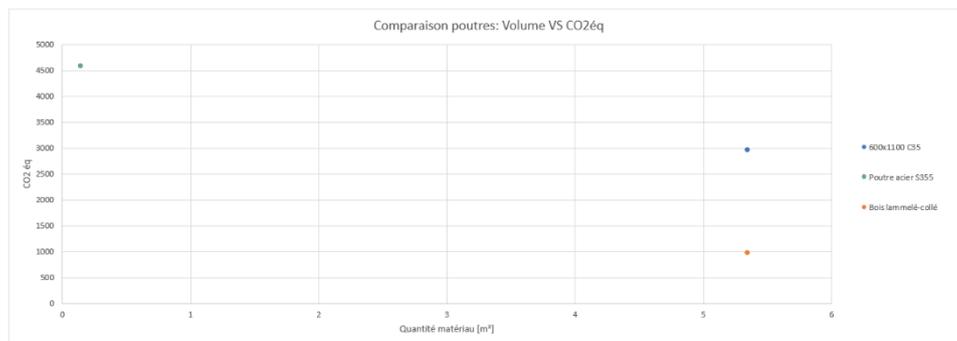


Figure 5: Graphique comparatif Volume-CO₂éq

Ce graphique est intéressant car il permet de tirer certaines conclusions concernant l'empreinte carbone de chaque poutre en fonction de la quantité de matériau utilisé dans sa composition. Chaque point représente une des trois poutres dimensionnées. La quantité de matériau est représentée sur l'axe des abscisses. Les émissions de gaz à effet de serre, exprimées en CO₂éq, sont représentées sur l'axe des ordonnées.

Ainsi, la poutre en acier a la plus grande émission de CO₂éq, avec un total de 4582.65 kg de CO₂éq pour un volume d'acier de 0.144m³. La poutre en béton armé (acier compris) émet un total de 2951.29kg de CO₂éq pour un volume de matériaux de 5.346m³. Enfin, la poutre en bois lamellé-collé émet 967.38kg de CO₂éq pour un total de 5.346m³ de bois. Pour mettre cette comparaison en perspective, la poutre en acier qui émet 4582.65kg de CO₂éq correspond à 24 634km de trajet d'un avion passagers de 220 sièges. Autrement dit, les émissions de gaz à effet de serre pour

une poutre en acier correspondent à 4 vols de Bruxelles - New-York. La poutre en béton armé correspond à presque 3 vols de Bruxelles - New-York. (Datagir, s.d.)

Il est donc démontré ici que certains matériaux émettent bien plus de gaz à effet de serre que d'autres, même pour un volume plus réduit. En effet, sous un certain cas de charge, une poutre en acier contient moins de matériau que son équivalent en béton armé ou en bois lamellé-collé. Pourtant, nous constatons que son empreinte carbone, mesurée en poids de CO₂eq est bien plus importante. Grâce à cet exemple, nous nous rendons donc compte de l'énorme impact carbone de l'acier.

Par ailleurs, le volume de la poutre en béton armé étant égal au volume de son homologue en bois lamellé-collé, les deux points se trouvent au même endroit sur l'axe représentant le volume. Par contre, leur quantité de CO₂eq n'est pas du tout identique. En effet, pour un même volume, le béton armé a une empreinte carbone plus importante que le bois lamellé-collé.

Analyse coût-CO₂eq

Cette partie du travail a nécessité une recherche importante. Obtenir le prix des différents matériaux n'est pas chose facile, les fournisseurs n'aimant pas afficher leurs prix par soucis de concurrence. Il faut donc manifester un réel intérêt d'achat pour obtenir des informations à ce sujet.

À cela s'ajoute la guerre en Ukraine, qui a eu un impact déterminant sur le prix des matériaux de construction ainsi que de leur transport, qui atteignent des niveaux historiques. Ci-dessous, nous avons un aperçu de la hausse des prix de l'acier de construction. On constate une hausse exponentielle depuis le début de la guerre, vers le 24 février 2022. Face à une augmentation moyenne de 100 € par tonne tous les 4 jours, les entreprises du secteur de la construction sont confrontées au défi de devoir adapter leur offre en termes de prix, tout en restant concurrentielles et attractives vis-à-vis de leurs clients. Bien qu'il s'agisse de l'acier dans ce graphique, les autres matériaux ont subi une augmentation tout aussi drastique.

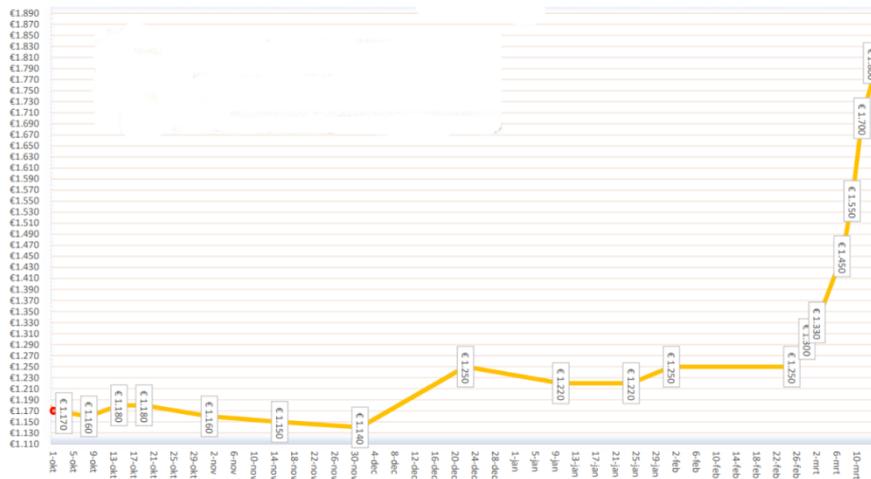


Figure 6: Graphique de l'évolution du prix de l'acier

Il n'est donc pas facile de savoir sur quel prix il convient de se baser. Le parti pris dans le cadre de ce travail a été de retenir un prix de 1800€ par tonne, correspondant à la moyenne au 14 mars 2022.

Le béton subit également une augmentation exponentielle de son prix. Pour le béton C35 analysé dans cette partie du travail, nous sommes partis d'un prix de 110€ par m³.

Enfin, pour le bois lamellé-collé, nos observations se basent sur un prix de 700€ par m³ (Charpente Bois, 2022).

Finalement, ci-dessous le tableau qui compare le coût des matériaux analysés à l'émission de CO₂eq de chaque matériau. Notons que dans le cadre de ce travail, il s'agit uniquement du prix des matériaux. Le transport n'est pas pris en compte, ce dernier étant fonction de la localisation du chantier. Il s'agit donc d'une base de coût moyen de transport, valable pour l'ensemble de la Belgique.

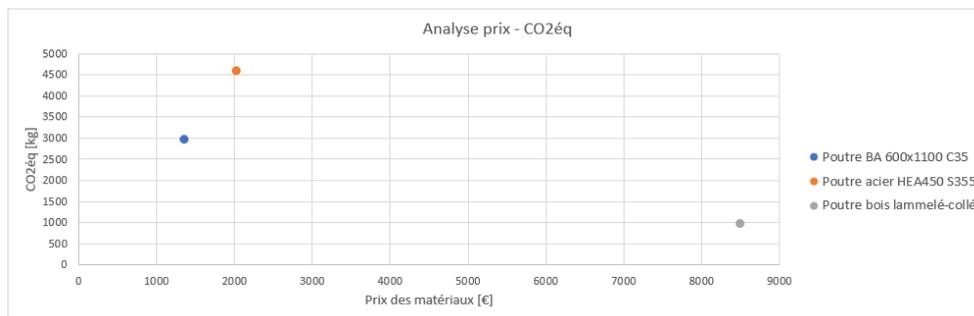


Figure 7: Graphique comparatif: Coût-CO₂eq

Ce graphique illustre donc les différences en termes de prix, ainsi qu'en termes d'émissions de CO₂éq. L'axe des abscisses représentant le prix total des matériaux, alors que l'axe des ordonnées reprend les émissions de CO₂éq des poutres.

L'on constate que la poutre en béton armé émet non seulement une plus petite quantité de gaz à effet de serre que son équivalent en acier, mais qu'elle coûte également moins cher. Il s'agit donc d'un double bénéfice lié à la composition.

Nous constatons également l'impact négatif du bois lamellé-collé. Malgré l'avantage lié à l'absorption de CO₂ par le bois durant son cycle de vie, nous pouvons conclure qu'une poutre constituée de ce matériau coûtera plus cher.

2.3. Analyse par type de poutre

Après cette analyse de l'empreinte carbone des différents types de poutres, essayons d'envisager l'option de variation des matériaux utilisés dans la composition des poutres. Pour cela, nous proposons les graphiques suivants. Ces graphiques représentent des poutres contenant les mêmes matériaux que les premières ci-dessus, mais dans des proportions différentes. C'est-à-dire que nous gardons le même type de béton, la même qualité d'acier et le même type de bois.

Poutres en béton armé

Commençons par les poutres en béton armé. Pour ce faire, nous avons dimensionné une poutre de section plus réduite et une poutre de section plus importante que la poutre de base. Ces deux sections sont donc respectivement de 600 x 700 mm et 700 x 1500 mm par rapport à la poutre de base, qui est de 600 x 1100mm. Chacune des poutres se situe dans une classe de résistance C35.

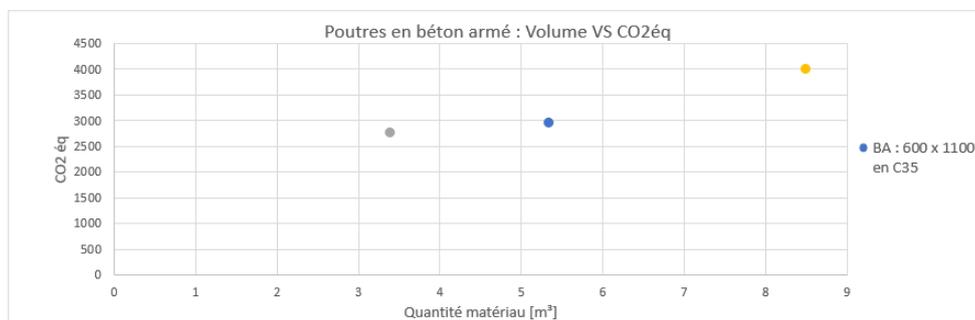


Figure 8: Graphique comparative béton armé : Volume-CO₂éq

À nouveau, la quantité de matériau est représentée sur l'axe des abscisses. Les émissions de gaz à effet de serre, représentées en CO₂éq, se trouvent sur l'axe des ordonnées.

Nous avons tout d'abord démontré que l'acier contient davantage de carbone que le béton. Pour quelle raison la combinaison d'une diminution de la quantité du béton et d'une augmentation de la quantité de l'acier engendrerait-elle une empreinte plus réduite que l'inverse ? Cela paraît contre-intuitif par rapport aux conclusions tirées plus haut. En fait, il faut comprendre que tout se joue au niveau des proportions. Afin de garder la même stabilité par rapport aux charges sollicitantes, l'impact de la variation de la quantité de béton est bien plus important que celui de la variation de la quantité d'acier. En d'autres termes, bien que l'acier contienne davantage de carbone, l'augmentation ou la réduction de la quantité de béton total prendra le dessus sur la quantité d'acier. Nous pouvons donc conclure que pour ce qui concerne la poutre en béton armé, il vaut mieux diminuer la section et donc la quantité de béton, plutôt que d'essayer à tout prix de diminuer la quantité d'acier dans une poutre.

Sur le graphique ci-dessous, sont représentés les prix de chacune de ces trois poutres. Pour rappel, l'acier coûte plus cher que le béton. C'est pourquoi une diminution importante de la quantité de béton, combinée avec une augmentation considérable de la quantité d'acier, fera augmenter le prix de la poutre. La plus petite section coûte donc plus cher que la poutre de base. A l'inverse, lorsque l'on augmente la quantité de béton de manière drastique, le prix du béton sera prépondérant. C'est pourquoi la poutre de dimensions 700 x 1500mm sera la poutre la plus coûteuse.

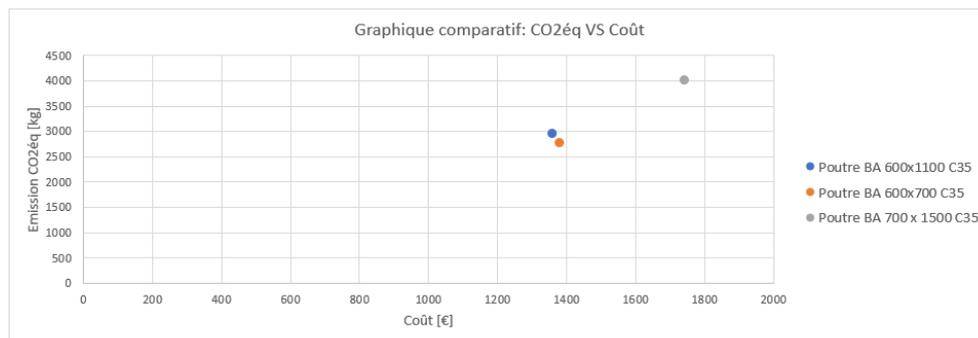


Figure 9: Graphique comparatif: Coût-CO2éq du béton C35

On pourrait se poser la question de savoir quel sera l'impact de la classe de résistance du béton sur le coût, ainsi que sur l'importance des émissions de CO2éq. Dans le graphique suivant, nous avons dimensionné trois poutres. Chacune de ces poutres a été optimisée afin d'obtenir les solutions comportant un minimum de béton et d'acier. La première poutre a été dimensionnée avec un béton C35/45. La deuxième poutre a été dimensionnée avec un béton C20/25. La troisième poutre a été dimensionnée avec un béton C50/60. Les trois bétons choisis sont de type CEM I.

Ci-dessous, un graphique représentant les émissions de CO2éq en fonction de la quantité de matériau. Il n'est pas du tout surprenant qu'une augmentation de la classe

de résistance diminue la quantité de matériau nécessaire afin de résister aux charges sollicitantes.

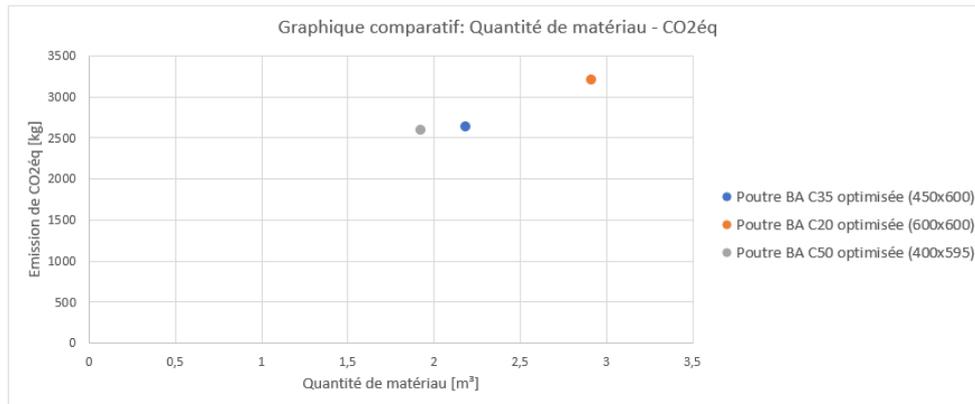


Figure 10: Graphique comparatif de différentes classes de résistance:
Quantité de matériau - CO₂éq

Ce graphique démontre que l'augmentation du volume des poutres prend à nouveau le dessus sur l'augmentation de la qualité du béton. Même si une classe de résistance supérieure augmente la quantité de ciment dans le béton, le volume total du béton sera prépondérant. C'est ainsi que la plus petite classe de béton C20/25 de section 600 x 600mm émet plus de gaz à effet de serre que son équivalent en C50/60 de section 400 x 595mm.

Dans le graphique suivant, le coût des matériaux constituant de la poutre est représenté sur l'axe des abscisses. L'axe des ordonnées représente les émissions de CO₂éq. Il est intéressant de constater que l'augmentation de la classe de béton, et donc de sa résistance à la compression, diminue le coût et l'émission de CO₂éq. A nouveau, ceci est dû au fait que l'augmentation de la classe de béton diminue de manière non négligeable la quantité de béton nécessaire, sans que ce béton ne soit tellement plus cher. En moyenne, on peut constater une augmentation de 3 à 5€ par classe de béton. C'est-à-dire que la classe C25/30 coûtera 3 à 5€ de plus que la classe C20/25.

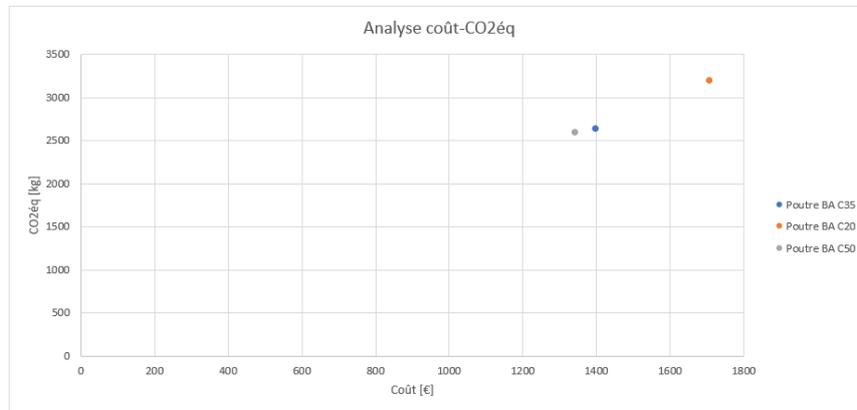
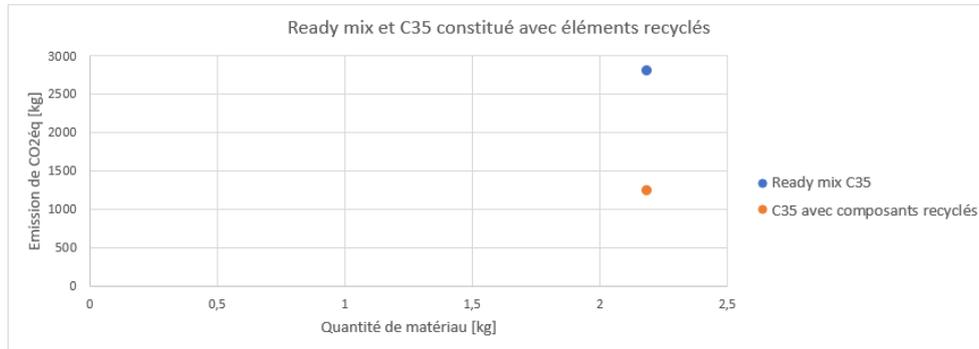


Figure 11 : Graphique comparatif: Coût-émissions CO2éq

Ci-dessous, nous répondons à la question de savoir quel serait l'impact en termes d'émissions de gaz à effet de serre d'un béton dont nous choisirions les différents composants. La comparaison est donc basée sur un béton ready-mix sans aucun élément recyclé d'une part et un béton avec un taux de recyclage élevé, d'autre part. Selon les normes belges le taux de recyclage des agrégats ne peut dépasser 50% pour le béton armé, avec une classe d'exposition X0 (Vrijders & De Bock, 2019). La composition du béton est donc, pour un volume de 1m³ :

- 500.88kg de ciment CEM III
- 828.6kg de granulats recyclés
- 828.6kg de granulats non recyclés
- 211.68kg d'eau qui n'est pas pris en compte dans le programme OneClick LCA

Ce béton correspond au béton ready mix comparable. Le béton ready mix avec lequel est comparé le béton composé d'ingrédients recyclés, est du type « Ready mix concrete, CEM I, C35/45 ».



*Figure 12: Graphique comparatif:
Béton ready mix C35 VS Béton C35 constitué d'éléments recyclés*

Nous constatons ici un écart en termes d'émission de CO2éq impressionnant. En effet, pour une différence de 1573.05kg, nous réduisons presque de moitié les émissions.

Poutres en acier

Concentrons-nous maintenant sur les poutres en acier. Tout en conservant le même type d'acier et donc la même qualité, nous allons analyser la différence entre une poutre HEA et une poutre IPE. La première poutre déjà dimensionnée est une HEA 450 en acier S355. La seconde poutre est une IPE600. Le graphique ci-dessous nous permet de comparer ces deux poutres.

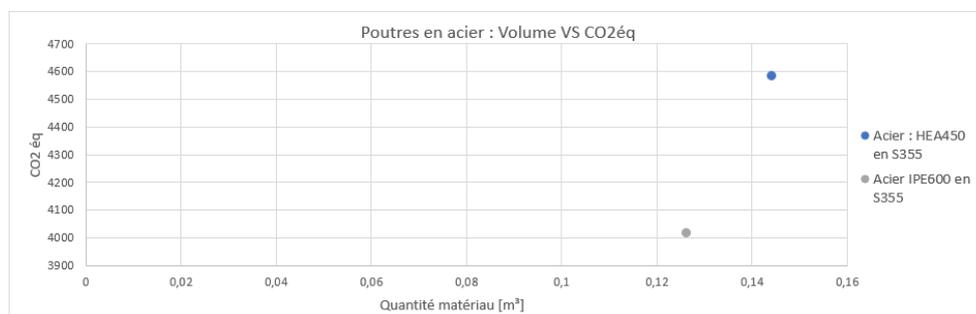


Figure 131: Graphique comparatif acier: Volume-CO2éq

Ici également, la quantité de matériau est représentée sur l'axe des abscisses. Les émissions de gaz à effet de serre, représentées en CO2éq, sont visibles sur l'axe des ordonnées.

Au vu de la composition d'une poutre en acier, qui consiste en un matériau unique, ce graphique ne nous surprend pas. Comme il ne s'agit que d'un seul matériau, nous pouvons déterminer la quantité de CO₂éq par une simple règle de trois. Il est donc normal que la poutre HEA450, qui contient plus de matière que la poutre IPE600, se situe plus haut sur l'axe de CO₂éq. Bien que la poutre HEA450 soit moins haute que la poutre IPE600, la différence en quantité de matière se trouve dans les ailes qui sont plus larges et plus longues. En dehors de la qualité de l'acier, l'inertie de la poutre ainsi que la hauteur de la poutre sont les deux facteurs influençant sa résistance à la flexion. C'est en sachant cela que nous pouvons conclure qu'en l'occurrence, une poutre IPE sera plus adaptée qu'une poutre HEA. Pour une même quantité de matière, les poutres IPE résistent mieux à la flexion simple. Cependant, il est crucial d'attirer l'attention sur un autre élément, à savoir que si nous avons d'autres efforts que la flexion simple, ce ne sera plus forcément le cas. Il faut aussi attirer l'attention sur la hauteur de la poutre. Comme mentionné plus haut, une poutre IPE est plus haute qu'une poutre HEA. Il faudra donc toujours tenir compte de la hauteur sous plafond disponible avant d'utiliser une telle poutre.

Au niveau du coût, la poutre IPE600 a un volume d'acier moins important que la poutre HEA450. Le prix des poutres étant directement proportionnel à la quantité de matière, les poutres IPE seront moins chères. La conclusion pour les poutres en acier soumises uniquement à la flexion est donc qu'il vaut mieux concevoir des poutres IPE car, en plus d'émettre moins de CO₂éq, celles-ci sont moins coûteuses pour un certain cas de charge. De manière générale, il est judicieux de choisir le profilé le plus adapté au mode de sollicitation principal, avec pour objectif de réduire au maximum la quantité de matière requise.

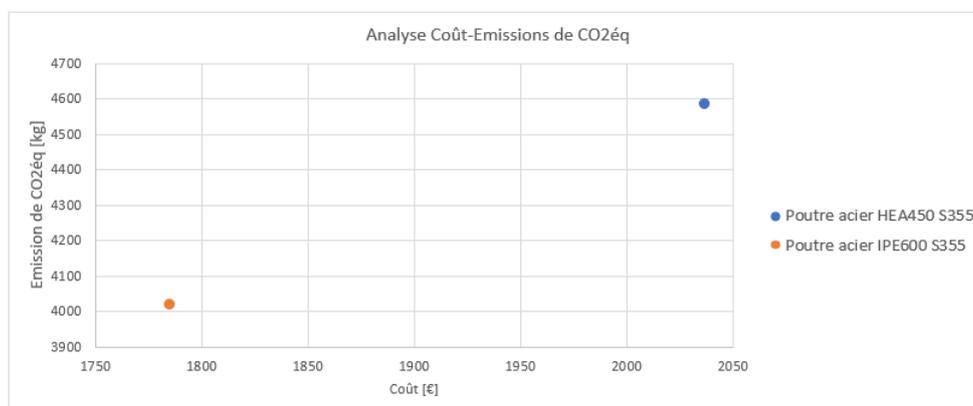


Figure 14: Graphique comparatif: Coût-émission CO₂éq

Il est à préciser que le type de four utilisé pour la fabrication des poutres en acier aura un impact sur les émissions de CO₂éq. En effet, un haut fourneau émet plus de

CO₂éq qu'un four à arc électrique. Dans le graphique est également représenté l'acier Xcarb d'ArcelorMittal. Il s'agit d'un acier produit non seulement à l'aide d'un arc électrique, mais également à l'aide d'électricité verte. (ArcelorMittal, 2019) Ci-dessous, un graphique qui permet de visualiser la différence.

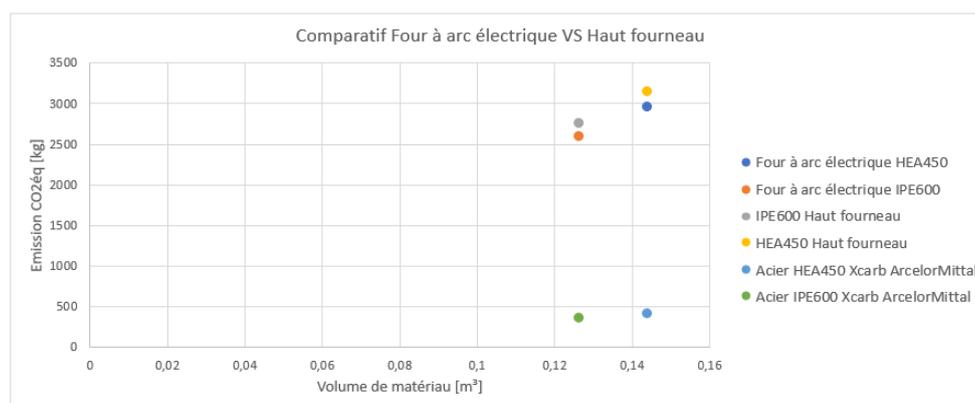


Figure 15: Graphique comparatif: Mode de production de l'acier

Comme nous pouvons le voir sur ce graphique, il y a bien une diminution des émissions de CO₂éq en fonction des équipements utilisés pour la fabrication. A savoir, une diminution de 188.25kg de CO₂éq pour la production de la poutre HEA450. Pour la IPE600, il s'agit d'une diminution de 164.98kg.

Au niveau des poutres Xcarb, la différence est réellement flagrante. En effet, le graphique démontre une diminution de plus de 2500kg de CO₂éq. Cette différence provient tout d'abord des matériaux recyclés. Comme dit précédemment, un arc électrique fonctionne avec de l'acier recyclé. L'on évite donc l'extraction de matières premières. Ensuite, l'utilisation d'énergie verte réduit également considérablement les émissions de CO₂éq. Deux facteurs importants en matière d'émissions de CO₂éq sont donc réduits en utilisant ce matériau. Cependant, le prix des poutres Xcarb est plus élevé. L'utilisation de l'acier Xcarb coûte en moyenne 4.5% de plus que l'acier ordinaire ou standard. Malheureusement, il est difficile d'y coller un chiffre précis suite à l'évolution exponentielle des prix décrite plus haut.

Poutres en bois lamellé-collé

Bien que l'analyse des poutres en bois ne fassent pas l'objet du présent travail, nous nous sommes limités à l'observation de la poutre en bois lamellé-collé de forme rectangulaire. L'inertie, de par des formes différentes, ne sera pas un facteur qui modifiera la résistance des poutres. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi d'optimiser la poutre en lamellé-collé afin d'utiliser un minimum de matériau pour

le cas de chargement étudié. Ceci afin de comparer malgré tout ce type de poutre avec les autres poutres analysées.

3. Conclusion générale

Lorsque l'on analyse l'impact du secteur de la construction en matière de réchauffement climatique, il apparaît clairement que celui-ci est considérable. En effet, le béton et l'acier sont des matériaux produisant des émissions de gaz à effet de serre non négligeables. Compte tenu de l'objectif de l'Union Européenne de limiter le réchauffement climatique à un niveau inférieur à 2°C, des solutions drastiques doivent être mises en œuvre.

Pour ce faire, quelques principes simples par rapport au dimensionnement des poutres de gros œuvre peuvent fournir une contribution positive en termes d'émission de gaz à effet de serre. Avant toute chose, il est important de garder à l'esprit que pour un certain cas de charge, une poutre en acier émet davantage de gaz à effet de serre qu'une poutre en béton armé, qui elle-même émet plus de gaz à effet de serre qu'une poutre en bois lamellé-collé. Au niveau du prix, la poutre en béton armé est la plus avantageuse, suivie par la poutre en acier et ensuite par la poutre en bois lamellé-collé, qui est la plus chère.

Afin d'améliorer les émissions de gaz à effet de serre d'une poutre en béton armé, les éléments qui se sont avérés être déterminants dans le cadre de ce travail sont la proportion du béton et de l'acier, la classe de résistance du béton et l'utilisation de matériaux recyclés dans la composition du béton. Dans l'optique de diminuer les émissions de CO₂eq, il vaut mieux augmenter la quantité d'armatures afin de pouvoir diminuer la quantité de béton. La diminution du volume de béton, grâce à une augmentation de la proportion d'acier, permet de réduire l'émission de gaz à effet de serre de la poutre globale. Dans la même optique de diminuer la quantité de béton mis en œuvre, l'augmentation de la classe de résistance du béton est une piste intéressante. En effet, même si la quantité de ciment contenu dans le béton est augmentée, la diminution globale du volume de béton, grâce aux caractéristiques propres à une classe de béton supérieure, amènera une baisse des émissions de gaz à effet de serre plus importante. Enfin, le béton « ready mix » ne contenant aucune matière recyclée n'est pas à recommander. En effet, il est préférable d'utiliser un maximum de matériaux recyclés, tout en faisant attention à respecter les normes de proportions maximales en matière de composants recyclés.

Afin de réduire les émissions de CO₂eq des poutres en acier, nous avons étudié les différents types de poutres, ainsi que leur mode de production. Pour un même cas de charge, les poutres HEA seront constituées de plus de matière que les poutres IPE. Leur forme a une influence sur l'inertie de la poutre. Il est donc logique que la poutre contenant le plus de matière ait un taux d'émission de gaz à effet de serre supérieur à l'autre. De plus, le prix des poutres IPE est inférieur à celui des HEA. Il est donc préférable d'utiliser des poutres IPE. Par ailleurs, la production à l'aide d'un arc électrique permet de réduire considérablement les émissions de gaz à effet de serre.

Contrairement au haut fourneau qui fonctionne au gaz, l'arc électrique fonctionne avec de l'électricité. De plus, l'arc électrique utilise majoritairement de l'acier déjà utilisé afin de le recycler et de lui donner une seconde vie. La phase A1 'Matières premières' du cycle de vie est donc supprimée. L'acier Xcarb, développé par ArcelorMittal offre une solution intéressante au niveau de la production. En plus d'utiliser un four à arc électrique avec des matériaux recyclés, l'énergie utilisée est verte. La solution Xcarb est 4.5% plus chère que l'acier traditionnel.

Le bois lamellé-collé constitue une bonne alternative au béton et à l'acier. Malheureusement, ses caractéristiques mécaniques ne permettent pas la même efficacité que le béton et l'acier. Cependant, lors de l'utilisation du bois, il est important d'éviter la combustion du bois en fin de vie. Comme indiqué à plusieurs reprises, le carbone absorbé sera relâché dans l'atmosphère. Enfin, il s'agit également d'un matériau plus cher que ses homologues en béton armé et en acier.

4. Remerciements

Cette étude n'aurait pas été possible sans la participation active de l'entreprise BESIX. Je pense notamment à Madame Mira Hoevenaeghel et Madame Emma-Lien Bertels, qui m'ont aiguillées et soutenues, afin d'aboutir sur des résultats pertinents. Je tiens également à remercier Ing. Christelle Huenaerts, enseignante à l'ECAM, qui m'a accompagnée tout au long de l'étude.

5. Sources

- VAN SPROLANT, E., *Etude coût/impact environnemental d'une poutre de gros œuvre*, Mémoire de master, Bruxelles, Belgique : ECAM, juin 2022.
- El Cheikh, K. [CSTC]. (2020, 19 octobre). *Béton circulaire : exemples concrets* [Vidéo]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=X3Bqhy6II24&list=PLMqB34dkJ6UFahLWXnGSlytFjk8fOFaMM&index=2>
- OneClick LCA. (2021). *Life cycle assessment for buildings*.
- Delem, L. [CSTC]. (2020, 19 octobre). *Impact environnementale des matériaux* [Vidéo]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=fDmmwMWBKwQ&list=PLMqB34dkJ6UFahLWXnGSlytFjk8fOFaMM&index=2>
- Datagir. (s. d.). *Mon Convertisseur CO2*. Mon Convertisseur CO2. Consulté le 27 janvier 2022, à l'adresse
https://monconvertisseurco2.fr/?co2=4500&equivalents=20689_20683_32_27976_206589_27012_27043_20587_26966_28081_27000_27002_24283_31000
- Charpente Bois. (2022, 17 mars). *Prix charpente bois lamelle, qualités, mise en œuvre*. charpentebois.com. Consulté le 23 mars 2022, à l'adresse
<https://charpentebois.com/charpentier/prix-tarif-charpente-bois/charpente-en-bois-lamelle-colle-decorative-et-fiable-en-tout-point-de-vue/#:%7E:text=Le%20prix%20charpente%20bois%20lamelle%20La%20base%20de,450%20euros%20pour%20les%20transporter%20et%20les%20installer.?msclkid=9edf00b6cecd11ec82f25f53a600cc0a>
- Vrijders, J., & De Bock, L. (2019, juillet). *Utilisation de granulats de béton recyclés dans le béton* (N° 32). CSTC.
https://www.cstc.be/umbraco/Surface/PublicationItem/DownloadFile?file=31400%2Ffr%2Fprotected%2Futilisation_de_granulats_de_beton_recycle_dans_le_beton.pdf&fbclid=IwAR0hEjGohNRy_OU6SDdhMtnCQfRXBnu4Vh833jUQJMoN7BWXel7I90qtL8I
- ArcelorMittal. (2019, mai). *Climate Action Report 1*.
<https://storagearcelormittalprod.blob.core.windows.net/media/31qlqwoo/climate-action-report-2019.pdf>